



УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ  
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ У НИШУ



**Саша Р. Павловић**

**ИСТРАЖИВАЊЕ ОПТИМАЛНИХ  
ПАРАМЕТАРА СОЛАРНИХ  
ПАРАБОЛИЧНИХ КОНЦЕНТРИШУЋИХ  
ПРИЈЕМНИКА ТОПЛОТЕ СА АСПЕКТА  
ПРИМЕНЕ У СИСТЕМИМА  
ПОЛИГЕНЕРАЦИЈЕ**

**ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА**

Ниш, 2017.



UNIVERSITY OF NIŠ  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING IN NIŠ



**Saša R. Pavlović**

**RESEARCH INTO THE OPTIMAL  
PARAMETERS OF SOLAR PARABOLIC DISH  
CONCENTRATING THERMAL  
COLLECTORS FROM THE ASPECT OF  
APPLICATION IN POLYGENERATION  
SYSTEMS**

**DOCTORAL DISSERTATION**

Niš, 2017.

## Подаци о докторској дисертацији

Ментор:

др Велимир Стефановић, редовни професор, Универзитет у Нишу,  
Машински факултет у Нишу.

Наслов:

Истраживање оптималних параметара соларних параболичних  
концентришућих пријемника топлоте са аспекта примене у системима  
полигенерације.

Резиме:

Рад у оквиру докторске дисертације укључује истраживање и развој енергетски и еколошки високоефективних параболичних концентришућих пријемника сунчевог зрачења. Параболични концентришући пријемник сунчевог зрачења се састоји од вишесегментног параболичног рефлектора и спирално набораног топлотног апсорбера. Истраживања параболичних концентришућих пријемника сунчевог зрачења биће фокусирана на анализу, развој и оптимизацију геометријских, оптичких параметара различитих нивоа генерисаних снага (до 10 kW). Циљ развоја оваквог типа соларног концентратора је повећање коефицијента концентрације сунчевог зрачења (концентрационог односа), повећање ефикасности искоришћења сунчеве енергије, повећање ефикасности конвертовања сунчеве енергије у друге облике енергије и смањење цене добијене топлотне, расхладне или електричне енергије. Развој соларног модула са параболичним концентратором је урађен на бази дугогодишњег прегледа литературе као и анализирања великог броја различитих решења. Предмет ове докторске дисертације представљају развој, пројектовање, изградња прототипа параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења са аспекта примене у системима полигенерације. Основни циљ израде ове докторске дисертације је да се применом савремених експерименталних и нумеричких метода истраживања изврши теоријско и експериментално истраживање параболичних концентришућих пријемника сунчевог зрачења, и да се дође до оптималног решења за наше услове. На основу добијеног оптималног решења, развијен је 3D модел параболичног концентратора и спроведена је нумеричка анализа са становишта оптичког дизајна соларног концентратора, термичког понашања топлотног апсорбера концентрисаног сунчевог зрачења, нелинеарна МКЕ анализа стабилности

система на утицај сопствене тежине и оптерећења од ветра. На основу геометријске и оптичке оптимизације израђен је коначан нумерички модел као и физички реалан прототип параболичног концентратора сунчевог зрачења који је и тестиран у реалним условима. На бази експеримента урађена је и верификација математичких модела соларног параболичног концентратора.

Научна област:

Техничко – технолошке науке

Научна  
дисциплина:

Термотехника, термоенергетика и процесна техника

Кључне речи:

геометријски модели, оптички модели, соларна енергија, соларни параболични концентратор, полигенерација, 3D симулације хода зрака, оптичка анализа, флуks зрачења, топлотни апсорбер, експериментално истраживање

УДК:

66.045.1:536.7[519.6+001.891.5(043.3)

CERIF  
класификација:

T200 Термички инжењеринг, примењена термодинамика

Тип лиценце  
Креативне  
заједнице:

**CC BY-NC-ND**

## Data on Doctoral Dissertation

Doctoral  
Supervisor:

PhD Velimir Stefanović, Full time professor, University of Niš,  
Faculty of Mechanical Engineering University of Niš.

Title:

Research Into the Optimal Parameters of Solar Parabolic Dish  
Concentrating Thermal Collectors from the Aspect of Application in  
Polygeneration Systems.

Abstract:

The work within the PhD thesis includes research and development of energy and environmental highly effective concentrating solar systems and receivers. The solar parabolic concentrator consists of a multi-segmented parabolic reflector and spiral corrugated heat absorber. Examinations of solar parabolic concentrating collectors are focused on the analysis of different concepts of solar optical concentrator, different concepts of solar receivers (absorbers), and the optimizing geometrical and optical parameters for different levels of generated power (up to 10 kW). The aim of developing this type of solar concentrator is to increase the coefficient of the concentration ratio, increase the efficiency of utilization of solar energy, increase the efficiency of converting solar energy into other forms of energy, and reduce the prices of the obtained heat, cooling or electricity. The development of the solar parabolic concentrator is based on a long-term review of the literature and analysis of a large number of different solutions. The subject of this PhD thesis is the development, design and construction of the prototype solar parabolic concentrating collector (concentrator of solar radiation plus receiver) from the aspect of the polygeneration systems. The main objective of creating this doctoral thesis is that by using modern experimental and numerical research methods perform theoretical and experimental research of solar parabolic concentrating heat collectors, and came to the optimal solution for our the conditions. Based on the obtained optimal solution was developed 3D model parabolic concentrators and numerical analysis was conducted from the standpoint of optical design concentrator solar, thermal behavior of concentrated solar radiant heat

absorber, non-linear FEM analysis of the stability of the system to the impact of its own weight and wind loads. Based on the geometric and optical optimization made the final numerical model and the physical prototype of real solar parabolic concentrator that is tested in real conditions. On the basis of the experiment was performed and verification of mathematical models of the solar parabolic concentrator.

Scientific  
Field:

Technical – technological sciences

Scientific  
Discipline:

Thermal Engineering, Thermoenergetics and Process Engineering

Key Words:

geometrical models, optical models, solar energy, solar parabolic dish concentrator, polygeneration, 3D Ray tracing simulations, optical analysis, radiant flux, heat absorber, experimental research

UDC:

66.045.1:536.7[519.6+001.891.5(043.3)]

CERIF  
Classification:

T200 Thermal engineering, applied thermodynamics

Creative  
Commons  
License Type:

**CC BY-NC-ND**

**Драгим родитељима Радосаву и Мирјани,  
супрузи Данијели и Ћерки Сари,  
у знак пажње и захвалности,  
за несебичну подршку у животу и раду**

## **ЗАХВАЛНИЦА**

Ова докторска дисертација је настала као резултат истраживања на пројекту Ш42006 Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије „Истраживање и развој енергетски и еколошки високоефективних система полигенерације заснованих на обновљивим изворима енергије“ под руководством проф. др Велимира Стефановића. Желим да се захвалим Министарству просвете, науке и технолошког развоја које је финансијском подршком помогло ово истраживање.

Своју дубоку захвалност дугујем мом ментору, др Велимиру Стефановићу, редовном професору Машинског факултета у Нишу, за свестрану помоћ, истраживачку слободу и корисне савете током израде ове дисертације. Захвалност дугујем свим члановима Катедре за термотехнику, термоенергетику и процесну технику који су ми током вишегодишњег рада пружали безрезервну помоћ. Желим да се захвалим професору др Дарку Васиљевићу са Института за Физику у Београду за несебичну помоћ и сарадњу у оквиру овог истраживања. Посебну захвалност желим да искажем професору др Градимиру Илићу од кога сам много тога научио и чији су ми савети значајно олакшали истраживачки рад. Такође желим да се захвалим професорима др Томиславу Павловићу са Природно–математичког факултета у Нишу, др Небојши Лукићу и доценту Новаку Николићу са Факултета инжењерских наука у Крагујевцу и покојном професору др Милораду Бојићу, са Факултета инжењерских наука у Крагујевцу, за несебичну помоћ и сугестије везане за израду докторске дисертације.

Захваљујем се свим пријатељима и колегама који су, свако на свој начин, помогли реализацији експерименталног дела докторске дисертације.

Бескрајну захвалност дугујем својим родитељима Радосаву и Мирјани на неизмерној подршци и разумевању коју су ми пружали током читавог мог живота и рада.

Неизмерну захвалност дугујем и мојој највећој подршци и животној снази, супрузи Данијели и малој ћеркици Сари на стрпљењу и разумевању.

У Нишу, \_\_\_\_\_, 2017. године

Аутор

Саша Павловић





## ПОДАЦИ О МЕНТОРУ И ЧЛАНОВИМА КОМИСИЈЕ

### Ментор

**др Велимир Стефановић**, редовни професор

Универзитет у Нишу, Машински факултет у Нишу

УНО: Термотехника, термоенергетика и процесна техника

### Чланови Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације

**др Небојша Лукић**, редовни професор

Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука

УНО: Термодинамика и термотехника

**др Томислав Павловић**, редовни професор у пензији

Универзитет у Нишу, Природно - математички факултет

УНО: Експериментална физика

**др Градимир Илић**, редовни професор у пензији

Универзитет у Нишу, Машински факултет у Нишу

УНО: Термотехника, термоенергетика и процесна техника

**др Новак Николић**, доцент

Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука

УНО: Термодинамика и термотехника

**Датум одбране докторске дисертације**

---



## САДРЖАЈ

СПИСАК НАЈЧЕШЋЕ КОРИШЋЕНИХ ОЗНАКА.....	iv
Латинични симболи .....	iv
Грчки симболи.....	ix
Индекси .....	xi
Бездимензиони бројеви.....	xii
Скраћенице .....	xii
<b>1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА .....</b>	<b>1</b>
<b>2. ПРЕГЛЕД СТАЊА И ИДЕНТИФИКАЦИЈА ПОДРУЧЈА ИСТРАЖИВАЊА .....</b>	<b>8</b>
2.1. Преглед истраживања у области параболичних концентришућих пријемника сунчевог зрачења.....	8
2.1.1. Кратка историја коришћења сунчеве енергије.....	8
2.1.2. Преглед литературе .....	13
2.2. Могућности примене параболичних концентришућих пријемника сунчевог зрачења у системима полигенерације.....	37
2.2.1. Полигенерацијски концепти .....	37
<b>3. ПОДЕЛА ПРИЈЕМНИКА СУНЧЕВОГ ЗРАЧЕЊА ПРЕМА ГЕОМЕТРИЈИ И КАРАКТЕРИСТИКАМА.....</b>	<b>51</b>
3.1. Топлотни пријемници сунчевог зрачења .....	53
3.1.1. Равни (нискотемпературни) пријемници сунчевог зрачења (FPC) .....	55
3.1.2. Пријемници са концентрисањем сунчевог зрачења .....	57
3.1.3. Средњетемпературни концентришући пријемници сунчевог зрачења.....	61
3.1.3.1. Сложени параболични концентришући пријемник сунчевог зрачења .....	62
3.1.3.2. Вакуумски цевни пријемник сунчевог зрачења .....	64
3.1.3.3. Параболоцилиндрични концентришући пријемник сунчевог зрачења.....	64
3.1.3.4. Линеарни Френелов рефлектор са апсорбером .....	65
3.1.4. Високотемпературни концентришући пријемници сунчевог зрачења .....	66
3.1.4.1. Параболични концентратори сунчевог зрачења .....	66
3.1.4.2. Хелиостатско поље концентришућих пријемника сунчевог зрачења.....	68
<b>4. УПОРЕДНА ОПТИЧКА АНАЛИЗА РАЗЛИЧИТИХ ТИПОВА ПАРАБОЛИЧНИХ КОНЦЕНТРИШУЋИХ ПРИЈЕМНИКА СУНЧЕВОГ ЗРАЧЕЊА .....</b>	<b>70</b>
4.1. Преглед софтвера за оптичко моделирање, симулацију и оптимизацију соларних концентришућих система.....	70
4.2. Структура коришћеног софтверског пакета .....	72



4.2.1. Избор софтверског алата за анализу оптичких перформанси.....	72
4.2.1.1. TracePro 7.3.4 софтверски пакет .....	73
4.2.1.2. Оптички модели расејања зрачења у оквиру TracePro софтвера .....	74
4.2.1.3. Нумеричка процедура.....	77
4.3. Моделирање оптичких параметара различитих конструктивних решења параболичних концентришућих система .....	78
4.3.1. Примена Monte Carlo методе прорачуна хода зрака и резултати симулације.....	78
<b>5. ПОСТАВЉАЊЕ ФИЗИЧКОГ, МАТЕМАТИЧКОГ И НУМЕРИЧКОГ МОДЕЛА ПАРАБОЛИЧНОГ КОНЦЕНТРИШУЋЕГ ПРИЈЕМНИКА СУНЧЕВОГ ЗРАЧЕЊА .....</b>	<b>97</b>
5.1. Математичко моделирање .....	97
5.1.1. Развој параметарског геометријског модела параболичног вишесегментног концентратора сунчевог зрачења.....	97
5.1.2. Развој параметарског геометријског модела соларног спирално попречно набораног топлотног апсорбера .....	106
5.1.3. Оптички модел соларног концентришућег система и нумеричко решавање .....	114
5.1.4. Термички математички модел соларног параболичног концентришућег система и нумеричко решавање .....	133
5.2. Нумерички термички модел.....	137
<b>6. КОМПЈУТЕРСКЕ СИМУЛАЦИЈЕ И ОПТИМИЗАЦИЈА ПАРАБОЛИЧНОГ КОНЦЕНТРИШУЋЕГ ПРИЈЕМНИКА СУНЧЕВОГ ЗРАЧЕЊА .....</b>	<b>146</b>
6.1. Нумеричко моделирање осенчења на површину параболичног концентратора сунчевог зрачења .....	146
6.1.1. Одређивање губитака упадног флукса зрачења на површину концентратора.....	146
6.1.2. Примена метода коначних елемената (FEA анализа).....	148
6.2. Савремене методе оптимизације параболичних концентришућих пријемника сунчевог зрачења.....	153
6.2.1. Оптимизација пројектовања оптичких система.....	153
6.2.2. Класичне методе локалне оптимизације.....	158
6.2.3. Модерне метахеуристичке методе .....	163
6.3. Оптимизације прототипа вишесегментног параболичног рефлектора соларног концентришућег система .....	169
6.3.1. Формулација проблема оптимизације.....	169
6.3.2. Нумеричка оптимизација параболичног рефлектора .....	171
6.3.3. Оптимизациони алгоритам .....	185
<b>7. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСТРАЖИВАЊЕ .....</b>	<b>190</b>
7.1. Циљ експерименталног истраживања .....	190
7.2. Реални соларни параболични концентришући систем и саставне компоненте експерименталног система .....	191
7.2.1. Избор система за позиционирање $\gamma$ параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења.....	192
7.3. Експериментална инсталација и принцип рада .....	197



---

7.4. Термотехничка испитивања .....	199
7.5. Мерење протока.....	201
7.6. Мерење температуре.....	201
7.7. Мерење дозрачене сунчеве енергије.....	204
7.8. Испитивање термографијом .....	206
7.9. Услови и процедура испитивања .....	208
7.10. Поређење експерименталних и нумеричких резултата .....	210
<b>8. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА И СМЕРНИЦЕ ЗА БУДУЋА ИСТРАЖИВАЊА.....</b>	<b>226</b>
ЛИТЕРАТУРА .....	231
Прилог .....	239
Списак слика.....	256
Списак табела .....	265
Биографија аутора .....	267

## СПИСАК НАЈЧЕШЋЕ КОРИШЋЕНИХ ОЗНАКА

## Латинични симболи

$A_{abs}$	$m^2$	Површина цеви соларног топлотног апсорбера концентратора
$CR_g$	-	Геометријски концентрациони однос концентришућег пријемника сунчевог зрачења
$CR_o$	-	Оптички концентрациони однос концентришућег пријемника сунчевог зрачења
$H$	$m$	Дубина соларног концентришућег пријемника сунчевог зрачења
$D$	$m$	Пречник апертуре параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења
$f/D$	-	Однос жижна даљина пречник концентратора сунчевог зрачења
$C_0$	€	Цена концентришућег пријемника сунчевог зрачења
$B(\theta)$	$\frac{Wm^{-1}}{steradian}$	Расподела ефективног извора зрачења, Гаусов модел зрачења
$x, y, z$	$m$	Картезијанске координате
$f_p$	$m$	Растојање између места рефлектованог зрака и жиже
$R_{min}$	$m$	Минимални полупречник кривине спиралног топлотног апсорбера
$R_{max}$	$m$	Максимални полупречник кривине спиралног топлотног апсорбера
$r_{mean}$	$m$	Средњи полупречник апсорбера концентратора сунчевог зрачења
$D_a$	$m$	Пречник апертуре соларног параболичног концентратора
$\vec{r}_{inc}$	-	Вектор упадног сунчевог зрачења
$\vec{r}_{refl}$	-	Вектор рефлектованог сунчевог зрачења
$A_{ap}$	$m^2$	Површина апертуре соларног параболичног концентратора
$S_a$	$m^2$	Површина параболичног концентратора сунчевог зрачења



$D_r$	m	Пречник апсорбера концентратора сунчевог зрачења
$d_i$	m	Унутрашњи пречник цеви спиралног топлотног апсорбера
$d_0$	m	Спољашњи пречник цеви спиралног топлотног апсорбера
$M$	-	Максимални број рефлексија сунчевог зрачења
$N$	-	Број симулираних сунчевих зрака у анализи хода зрака
$h$	Jkg <sup>-1</sup>	Енталпија
$h_{air}$	W/m <sup>2</sup> K	Коефицијент прелаза топлоте конвекцијом са апсорбера у околину
$k_d$	-	Коефицијент односа дифузног и дозраченог тренутног сунчевог зрачења
$F_{гр}$	-	Фактор облика
$h_{rec}$	m	Висина апсорбера у концентратору сунчевог зрачења
$L$	m	Дужина цеви апсорбера у концентратору сунчевог зрачења
$L_{scc}$	m	Дужина топлотног апсорбера у развијеном облику
$p_c$	m	Корак набора спиралног топлотног апсорбера
$e$	m	Дубина набора спирално набраног топлотног апсорбера
$e/d$	-	Релативна храпавост спиралног топлотног апсорбера
$l_{geo}$	(°)	Географска дужина локације концентратора сунчевог зрачења
$c_p$	Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	Специфична топлота флуида спирално набраног топлотног апсорбера
$g$	ms <sup>-2</sup>	Убрзање Земљине теже
$\lambda$	Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	Коефицијент топлотне проводљивости радног медијума
$I_j$	J	Укупно апсорбована соларна енергија концентратора сунчевог зрачења
$I$	Wm <sup>-2</sup>	Укупно апсорбовано соларно зрачење концентратора сунчевог зрачења
$I_d$	Wm <sup>-2</sup>	Укупно апсорбовано соларно зрачење доње површине апсорбера концентратора сунчевог зрачења



$i$	rad	Упадни угао соларног зрака
$I_m$	J	Месечна укупно апсорбована соларна енергија концентратора сунчевог зрачења
$\dot{m}$	$\text{kg s}^{-1}$	Масени проток радног медијума
$V$	$\text{kg h}^{-1}$	Запремински проток радног медијума
$m$	-	Оптичка ваздушна маса
$f$	-	Жижна даљина (фактор облика концентратора сунчевог зрачења)
$f_r$	-	Коефицијент трења
$e$	m	Дубина набора спиралног топлотног апсорбера
$\vec{n}_m$	-	Функција густине вероватноће
$p_{jj}$	-	Вероватноћа прелаза - транзиције
$\hat{s}$	-	Дискретна ордината
$SPP$	године	Период повраћаја инвестиције
$\hat{n}_{k,i}$	-	Јединични нормални вектор површине сегмента параболичног концентратора сунчевог зрачења
$sun$	$1\text{kW m}^{-2}$	Просечни флуks зрачења
$T_u$	K	Температура флуида на улазу у спирални топлотни апсорбер
$D_u$	m	Унутрашњи пречник цеви спиралног топлотног апсорбера
$D$	m	Спољашњи пречник цеви спиралног топлотног апсорбера
$p$	m	Растојање између места где сунчево зрачење пада на рефлектор и места где рефлектовано зрачење пада на доњи део апсорбера концентратора сунчевог зрачења
$T_i$	K	Температура флуида на излазу из спиралног топлотног апсорбера концентратора сунчевог зрачења
$S$	m	Дужина лука параболичног концентратора сунчевог зрачења
$T_o$	K	Температура околине
$p$	Pa	Притисак



$p_s$	m	Корак спиралног топлотног апсорбера
$\Delta p$	Pa	Пад притиска
$P_i$	W	Укупна снага сунчевог зрачења која доспева у живну раван
$P_w$	W	Снага сунчевог зрачења која доспева на површину апертуре апсорбера концентратора сунчевог зрачења
$T_{max}$	°C	Максимална температура у кавитету топлотног апсорбера
$r_{opt}$	-	Оптимална вредност полупречника апертуре апсорбера
$K_{heat}$	€/kWh	Цена произведене корисне топлотне енергије
$I_r$	Wm <sup>-2</sup>	Средња вредност топлотног флукса зрачења на површини апсорбера концентратора сунчевог зрачења
$\dot{Q}_{useful}$	W	Нето корисна количина топлотне енергије која се добије помоћу концентратора сунчевог зрачења
$\dot{Q}_{abs}$	W	Укупни флукс апсорбованог сунчевог зрачења на површину апсорбера концентратора сунчевог зрачења
$\dot{Q}_{loss}$	W	Укупни топлотни губици параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења
$d^*$	-	Универзални параметар случајне грешке услед неусаглашености профила површине рефлектора и апсорбера
$I_{ex}$	[Wm <sup>-2</sup> μm]	Екстратерестријално сунчево зрачење
$I_\lambda$	Wm <sup>-2</sup>	ASTM стандард AM1.5 Спектрална дистрибуција интензитета сунчевог зрачења
$K_\theta$	-	Фактор корекције упадног угла сунчевог зрачења
$\Delta$	-	Коефицијент осветљености неба
$\dot{Q}$	W	Корисна топлотна снага параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења
$q$	Jkg <sup>-1</sup>	Специфична топлота радног медијума
$Q_g$	W	Топлотни губици параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења
$Q_0$	%	Оптички губици параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења





$\dot{Q}$	$Wm^{-2}$	Густина флука концентрисаног сунчевог зрачења које пада на површину апсорбера концентратора сунчевог зрачења
$Q_{ij}$	$Wm^{-2}$	Снага емитованог сунчевог зрачења
$V_{wind}$	$ms^{-1}$	Брзина ветра
$T_f$	К	Температура флуида у апсорберу концентратора сунчевог зрачења
$T_{fm}$	К	Средња температура флуида у апсорберу концентратора сунчевог зрачења
$T_s$	К	Температура неба
$t$	°C	Температура
$t_h$	s	Време
$p_{atm}$	Pa	Атмосферски притисак
$U$	$Wm^{-2}K^{-2}$	Коефицијент пролаза топлоте
$R_S$	%	Спекуларна рефлексација
$R_H$	%	Директна полусферна рефлексација
$\vec{r}$	-	Вектор положаја
$\vec{S}$	-	Вектор правца
$\vec{S}'$	-	Вектор правца одбијеног или расејаног сунчевог зрачења
YSP	$kWh/m^2$	Потенцијал годишњег глобалног сунчевог зрачења
$\phi$	-	Зависно променљива, пасивни скалар
$\dot{V}$	$m^3s^{-1}$	Запремински проток
$R_r$	-	Случајни број
$n$	-	Индекс преламања светлости
$E_s$	-	Ексергија сунчевог зрачења
$E_u$	-	Корисна ексергија
$\eta_{ex}$	-	Ексергетски степен корисности

**Грчки симболи**

$\alpha_0$	rad	Угао нагиба параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења
$\alpha$	-	Коефицијент апсорпције апсорбера концентратора сунчевог зрачења
$\delta$	rad	Угао деклинације параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења
$\delta_{rms}$	rad	Средња квадратна девијација
$\varepsilon$	-	Коефицијент емисивности површине апсорбера концентратора сунчевог зрачења
$\gamma$	-	Фактор прихватања - фактор облика
$\gamma_P$	-	Локални фактор прихватања концентрисаног сунчевог зрачења
$\psi$	(°)	Ивични угао концентратора сунчевог зрачења
$\zeta$	%	Нагиб параболичног концентратора сунчевог зрачења
$\delta_i$	m	Дебљина изолације кућишта апсорбера концентратора сунчевог зрачења
$\delta_a$	m	Дебљина апсорбера концентратора сунчевог зрачења
$\eta$	-	Топлотна ефикасност параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења
$\varepsilon_a$	-	Коефицијент емисије површине апсорбера концентратора сунчевог зрачења
$\xi$	m <sup>2</sup>	Површина озрачености соларног апсорбера концентратора сунчевог зрачења
$\lambda_m$	nm	Таласна дужина сунчевог зрачења
$\rho$	kgm <sup>-3</sup>	Густина
$\Phi^{peak}$	kWm <sup>-2</sup>	Максимални флуks сунчевог зрачења који пада на апсорбер концентратора сунчевог зрачења
$\rho_m$	-	Коефицијент рефлективности концентратора сунчевог зрачења
$\sigma$	Wm <sup>-2</sup> K <sup>-4</sup>	Stefan-Boltzmann-ова константа
$\Theta_a$	(°)	Полу-прихватни угао



$\gamma_0$	rad	Азимутни угао
$\beta$	(°, rad)	Угао елевације
$\beta_s$	-	Осветљеност сунчевог диска
$\Omega'$	-	Просторни угао
$\sigma_s$	-	Коефицијент расејања сунчевог зрачења
$\tau$	-	Коефицијент трансмитивности стакленог покривача
$\hat{n}$	-	Јединични нормални вектор површине
$(\tau\alpha)_n$	-	Оптичка ефикасност параболичног концентратора сунчевог зрачења
$\varphi$	rad	Географска ширина локације концентришућег пријемника сунчевог зрачења
$\theta$	(°)	Упадни угао на површину апертуре параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења
$\theta_s$	mrad	Грешка праћења параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења
$\omega_{optical}$	mrad	Укупна оптичка грешка нагиба површине концентратора сунчевог зрачења
$\omega_{slope}$	mrad	Површинска оптичка грешка параболичног концентратора сунчевог зрачења
$\omega_{specularity}$	mrad	Грешка рефлектованог зрака на површини параболичног концентратора сунчевог зрачења
$\sigma_{1D}$	mrad	Једнодимензионе оптичке грешке
$\sigma_{2D}$	mrad	Дводимензионе оптичке грешке
$\sigma_{sun}$	mrad	Видљива ширина сунца (угао сунчевог конуса)
$\sigma_{sensor}$	mrad	Грешка одзива сензора система за позиционирање концентришућег пријемника сунчевог зрачења
$\sigma^*$	-	Параметар универзалне случајне грешке
$\beta^*$	-	Универзална не случајна грешка услед угаоних грешака



$\theta_s$	(°)	Прихватни угао
$\eta_{ass}$	-	Ефикасност апсорпције сунчевог зрачења
$\sigma_f$	-	Неуниформност флукса сунчевог зрачења на апсорберу концентратора

### Индекси

<i>tot</i>	-	Тотално
<i>e</i>	-	Експериментално
<i>albedo</i>	-	Коефицијент рефлексије површине тла
<i>th</i>	-	Термални, топлотни
<i>DNI</i>	$Wm^{-2}$	Директна компонента глобалног сунчевог зрачења
<i>amb</i>	-	Амбијент
<i>in</i>	-	Улаз
<i>sun</i>	-	Сунце
<i>cav</i>	-	Кавитет апсорбера концентратора сунчевог зрачења
<i>r.opt</i>	m	Оптимални апсорбер концентратора сунчевог зрачења
<i>max</i>	-	Максимално
<i>min</i>	-	Минимално
<i>out</i>	-	Излаз
<i>ref</i>	-	Референтно
<i>sr</i>	-	Средња вредност
<i>sim</i>	-	Вредност добијена на основу резултата нумеричке симулације
<i>dif</i>	-	Дифузно сунчево зрачење
<i>dir</i>	-	Директно сунчево зрачење
<i>ap</i>	-	Апертура апсорбера концентратора сунчевог зрачења
<i>w</i>	-	Вода



<i>sys</i>	-	Систем
<i>coll</i>	-	Колектор
<i>conc</i>	-	Концентратор
<i>opt</i>	-	Оптимум
<i>g</i>	-	Геометријски
<i>ray</i>	-	Стохастички зрак
<i>rec</i>	-	Рисивер
<i>ref</i>	-	Рефлектор
<i>spillage</i>	-	Губици рефлектованог зрачења на ободу кућушта апсорбера концентратора сунчевог зрачења
<i>ex</i>	-	Ексергетски
<i>carnot</i>	-	Карноов циклус

### Бездимензиони бројеви

$$j = \frac{Nu}{RePr^{1/3}} \quad \text{Колбурнов фактор}$$

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda} \quad \text{Нуселтов број}$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda} \quad \text{Прантлов број}$$

$$Pe = RePr \quad \text{Пеклеов број}$$

$$Re = \frac{uL}{\nu} \quad \text{Рејнолдсов број}$$

### Скраћенице

*CPC* Сложени параболични колектор

*TA* Топлотни апсорбер

*DISH* Параболично тањирасти концентратор



<i>FFC</i>	Соларни концентратор са равним рефлектујућим сегментима
<i>STC</i>	Соларни топлотни колектор
<i>PDC</i>	Параболично тањирасти колектор
<i>EHC</i>	Елиптични хиперболоидни колектор
<i>FPC</i>	Равни - плочасти колектор
<i>PMMA</i>	Полиметилметакрилат
<i>PTC</i>	Параболо - цилиндрични колектор
<i>MCRT</i>	Монте Карло метод прорачуна хода зрака
<i>TIR</i>	Тотална унутрашња рефлексија
<i>LFC</i>	Линијски Френелов колектор
<i>ETC</i>	Вакуумски цевни колектор
<i>AM</i>	Ваздушна маса
<i>BRDF</i>	Функција расподеле двосмерне рефлексије
<i>BSDF</i>	Функције расподеле двосмерног расејања
<i>BTDF</i>	Функције расподеле двосмерног преламања
<i>CPV</i>	Концентришући фотонапонски колектор
<i>CSR</i>	Сунчево зрачење на граници атмосфере
<i>CFD</i>	Рачунска динамика флуида
<i>FOE</i>	Коначни оптички елемент
<i>ECPC</i>	Елиптични параболични концентратор
<i>HPC</i>	Хиперпараболични концентратор
<i>CHC</i>	Кружни хиперболоидни концентратор
<i>CCPC</i>	Кружни сложени параболични концентратор



# Глава 1

## 1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА

---

Обновљиви извори енергије су они чији се капацитет не смањује и поред интензивнијег коришћења истих. Природни процеси, који се непрекидно догађају на Земљи, утичу да се ови извори стално обнављају и да се као такви не могу потрошити. Сунце, вода, ветар, биомаса и топлота земљиног језгра су основни видови обновљивих извора енергије. Већина ових енергетских ресурса су, у суштини, последица сунчевог зрачења, као у осталом и сва фосилна горива (угаљ, нафта, земни гас) која сада чине базу модерних енергетских система. Фосилна горива нису ништа друго до милионима година “складиштена Сунчева енергија”. Како је количина фосилних горива на земљи ограничена, она чине категорију конвенционалних или необновљивих извора енергије. Имајући у виду да су количине фосилних горива на Земљи ограничене и да услед њиховог коришћења долази до емисије  $\text{CO}_2$  који негативно утиче на животну средину, у свету се све више користе обновљиви извори енергије међу којима значајно место заузима Сунце. У обновљиве изворе енергије спадају соларна енергија, енергија ветра, геотермална енергија, енергија вода, енергија биомаса, биогаз итд. Најдоступнија од свих њих је енергија Сунца. Када би се у потпуности искористила енергија Сунца која у току само мало више од једног сата стигне на Земљу, та количина енергије би била

довољна за све потребе Земље на годишњем нивоу, док енергија ослобођена са Сунца сваке секунде је неколико десетина пута већа него што је укупна енергија која је утрошена на Земљи од њеног настанка. Побољшање технологије се огледа у повећању степена искоришћења апсорбоване соларне енергије. Истражују се нове врсте флуида који се могу користити, нове врсте фотонапонских ћелија и користе се нови материјали. Тежи се да се што више енергије добије како по заузетој површини тако и по уложеном новцу.

Максимална количина Сунчеве енергије се може прикупити када су Сунчеви зраци нормални на површину соларног концентратора, односно када су паралелни са нормалом на површину параболичног концентратора. То се може постићи једино коришћењем уређаја за праћење положаја Сунца (*Sun tracking system*), који модификују вредност нагиба и/или азимута соларног концентратора како би се он позиционирао оптимално у односу на Сунце. Постоје бројне студије које показују да коришћење ових система омогућава знатно већу количину прикупљене енергије по јединици површине у односу на енергију која се може прикупити по јединици површине код фиксних (стационарних) система. *Sun tracking* системи повећавају укупну дневну сакупљену енергију за 43.87% у односу на фиксне системе. Међутим, *Sun tracking* системи су прилично скупи, троше енергију и нису препоручљиви за употребу код система мале снаге (до 2 kW), док су за велике системе (изнад 3 kW) веома ефикасни и неопходни за економичан, поуздан и функционалан рад.

Постоји широко распрострањено мишљење да будућност припада такозваним нековенционалним енергетским изворима. Сунчева енергија не може у потпуности да замени традиционалне енергетске изворе пошто Сунце не сија током целог дана. Без обзира на то сматра се да соларни енергетски уређаји и системи имају озбиљан потенцијал. Употреба соларних концентратора је један од могућих начина развоја примене сунчеве енергије. Коришћење енергије Сунца је веома актуелно како у Европи тако и у свету, међутим код нас још увек није узело пуно маха. Ово је један од начина концентрисања енергије сунчевог зрачења и њеног конвертовања, ради добијања топлотне, расхладне или електричне енергије.

Сунчево зрачење се као директан извор енергије може користити тј. трансформисати применом различитих технологија. Резултат ове трансформације је



топлотна, расхладна или електрична енергија. Када се ради о топлотној енергији, у зависности од температура које се достижу, разликују се системи ниске, средње и високе температуре.

Електрична енергија се може произвести директном трансформацијом сунчевог зрачења помоћу фотонапонских ћелија или на индиректан начин где се сунчево зрачење прво претвара у топлотну енергију високе температуре, а затим ова у електричну (микрoгасне турбине, стирлингов мотор, итд).

Уколико се сунчево зрачење применом одговарајуће секундарне оптике (огледала, сочива, “*booster*” рефлектора и сл.) концентрише, могуће је добити знатно више температуре, концентрационе односе као и равномернију дистрибуцију флукса сунчевог зрачења. Такозвани системи средњих температура, подобни су за расхладне системе и индустријске процесе, полигенерацијске системе, док се системи високих температура, користе у индустријским процесима као и у великим соларним електранама. Концентратори сунчеве енергије су 2-5 пута ефикаснији од свих других система, али су нажалост и скупљи од свих других. Унапређеним техничким решењима и њиховом оптимизацијом, предвиђа се да ће цена јединице произведене енергије посредством концентратора сунчевог зрачења бити и нижа од цене из фосилних горива.

Истраживања соларних параболичних концентришућих пријемника сунчевог зрачења фокусирана су на анализу различитих концепата концентришућих пријемника сунчевог зрачења (концентратора), различитих концепата апсорбера концентратора сунчевог зрачења као и на оптимизацију геометријских и оптичких параметара различитих нивоа генерисаних снага.

Централно место истраживања је испитивање функционалних карактеристика параболичног концентратора у реалним радним условима и утврђивање критеријума за оцењивање поузданости концентришућег система у целини. Експериментална истраживања овог типа су због своје сложености малобројна, а у нашим условима их практично и нема у овом облику па се се на основу експерименталних резултата и савремених теоријских поставки (нумеричких метода) може доћи до веома значајних резултата оваквог типа пријемника сунчевог зрачења. Систем је пројектован са аспекта примене у системима полигенерације. Параболични концентратор је најефикаснији од

свих осталих типова концентратора јер укупно соларно зрачење које падне на рефлектујуће површине се одбија од њих и фокусира тј. концентрише на апсорберу тј. на апсорберској површини (спирални топлотни апсорбер). У односу на тренутно доступна решења познатих светских произвођача, развијено техничко решење дакле карактеришу јефтинија израда, већа компактност конструкције, лакша конструкција, естетски изглед, лакши начин монтаже и демонтаже елемената система, побољшана стабилност и бржи одзив позиционирања/репозиционирања система из фокуса применом система управљања домаће радиности. Истраживања соларних параболичних концентришућих пријемника биће фокусирана на анализу, развој и оптимизацији геометријских, оптичких параметара концентратора сунчевог зрачења различитих нивоа генерисаних снага (до 10 kW). У циљу постизања већег температурског нивоа као и веће топлотне ефикасности са прихватљивим трошковима приликом развоја параболичних концентришућих пријемника топлоте и система неопходно је изабрати оптималну комбинацију параметара који су од суштинске важности за реализацију соларних пријемника и система. Развијени прототип соларног параболичног концентратора за област средње и високо температурне конверзије сунчевог зрачења у топлоту представља решење које је намењено пре свега у системима полигенерације, индустријским постројењима, домаћинствима, јавним објектима, итд. Систем се може применити за продукцију топле воде, у КГХ системима, продукцију паре високих топлотних перформанси итд. За потребе већих топлотних капацитета постоји могућност повезивања већег броја соларних јединица у тзв. соларне паркове. На тај начин се може омогућити производња топлотне, расхладне или електричне енергије за читава насеља и квартове великих градова.

Уколико се сунчево зрачење применом одговарајуће оптике (огледала, сочива и сл.) концентрише, могуће је добити више температуре. Такозвани системи средњих температура, подобни су за расхладне системе и индустријске процесе. Код високотемпературних пријемника се сунчеви зраци, захваћени са веће површине, фокусирају на неку мању површину, при чему се, у зависности од конструкције, остварују високе радне температуре – и до неколико хиљада степени Целзијуса.

Резултати ових истраживања могу имати директну примену при изградњи малих соларних система али и при конципирању и изградњи великих полигенерацијских

система. Когенерација и полигенерација представљају енергетске системе за производњу два или више облика енергије. Когенерација се односи на истовремену производњу механичког рада (или електричне енергије) и топлотне енергије. Полигенерација представља истовремену производњу два или више облика енергије или још неког производа у оквиру једног процеса, где је излаз или нус-производ једног подпроцеса улаз за следећи процес. Оваква суперпозиција термодинамичких процеса чини систем за снабдевање енергијом. Полигенерација описује интегрисани процес који има један или више излаза укључујући и производњу неке врсте енергије применом једног или више природних ресурса.

Главна предност примене полигенерационих система је уштеда енергије у поређењу са конвенционалним системима, где се под конвенционалним системима подразумева појединачна производња сваког од облика енергије. Идеја је да се сунчева енергија користи као примарни извор енергије у овим системима, а конвенционални извори се користе као допуна, у данима када сунчево зрачење не задовољава укупне потребе.

Да би се направила једна добра конструкција параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења неопходно је пре свега осмислити добру концепцију која испуњава техничке захтеве и економска ограничења. Процес конструисања се креће од техничког задатка и постављања листе захтева, па преко конципирања конструкције. Ту се идентификују битни проблеми и дефинишу основне функције које конструкција мора да испуни. На основу њих се усваја концепција конструкције. Затим се формира конструкција при чему се дефинишу саставни елементи конструкције, њихов облик и димензије. Облик и димензије се одређују различитим прорачунима са циљем да обезбеде извршење функције у задатом периоду и за задате услове рада. У току процеса формирања конструкције неопходно је мислити и на ергономију, процесе производње, квалитет саме конструкције, монтажу, трошкове, одржавање. Данас се процес развоја нових производа не може замислити без употребе рачунара и софтверских програма који потпомажу тај развој и знатно скраћују време потребно за нов производ. CAD (Computer Aided Design) је алат који помаже кориснику како за извођење прецизних цртежа и проверу нових производа. Његовом применом је могуће пратити производ од идеје, преко развоја конструкције, прорачуна, монтаже па све до



краја животног века производа. Савремени CAD софтвер поседује велику базу стандардних делова и стандардизованих делова, стандардних прорачуна, модуле за проверу структурне анализе применом методе коначних елемената. Поред структурне анализе могуће је урадити и динамичку и кинематску анализу производа. Израда техничке документације доведена је до савршенства због прецизности и тачности цртежа.

Циљ овог рада је да споји актуелне потребе за повећањем добијања енергије стварањем нове концепције која ће бити моделирана, тестирана и прорачуната у савременом окружењу софтверских пакета. Постојећа решења праћења Сунчевог кретања у обе осе се заснивају на постојању два погона која независно раде један од другог при чему један прати алтитуду, а други азимут. За потребе рада развијена је нова конструкција која прати Сунчево кретање и по азимуту и по алтитуди. Такође, конструкција има могућност преласка у "*safety mode*" положај у случају временских непогода или других непредвидивих прилика. Соларни параболични концентратор (СПК) се састоји од вишесегментног параболичног рефлектора и спирално набораног топлотног апсорбера. Концентратор је параболичног облика јер се рефлектор концентратора састоји од једанаест високо рефлектујућих површина које могу да буду или параболичне или сферичне. У нашем случају то су параболичне површине. Ротациони концентратор је несиметричан јер његова површина није пун параболоид. (недостаје 12-ти рефлектујући) сегмент. Употреба савремених параболоидних концентратора за трансформацију сунчеве енергију у топлотну енергију захтева и развој и примену компактних топлотних апсорбера (ТА) у оквиру рисивера сунчевог концентрисаног зрачења. Направљен је оптички модел система соларни параболоидни концентратор - спирални топлотни апсорбер (модел хода зрака) применом Monte Carlo методе. Ово је јако велики допринос у делу оптичког моделирања сложене геометрије склопа параболични сегментни рефлектор + спирални ТА. Карактеристика ТА примењених на параболоидне концентраторе је да се само једна половина укупне расположиве површине излаже концентрисаном зрачењу. Параболични/параболоидни тањирасти концентратори сунчевог зрачења спадају у групу концентришућих пријемника који укупно упадно сунчево зрачење које доспе на површину апертуре фокусирају у малу жижну област (тачкасту), тако да се с обзиром на геометрију



концентришућих пријемника топлоте фокусирање врши по линији (line focus) и у тачки (point focus). Иако савршена рефлексија параболоидног концентратора рефлектује паралелне зраке у једној тачки, сунчеви зраци нису потпуно паралелни (јер сунце није тачкасти извор), такође сви реални концентратори нису идеално обликовани. Због тога је концентрисано зрачење у тачки расподељено на малу област са највећим концентрационим флуksom у центру, опадајући експоненцијално ка ивици. С обзиром на принцип апсорпције зрачења разликују два основна типа ТА, површински и запремински (директно изложен концентрисаном зрачењу и индиректно). Код површинских ТА рефлектовано зрачење од концентратора се апсорбује на површини размењивача топлоте и они су најчешће у облику цеви различитих геометријских конфигурација. Ови ТА се обично постављају у тзв. кавитете - шупљине рисивера ради смањења конвективних и радијационих губитака.

## Глава 2

### **2. ПРЕГЛЕД СТАЊА И ИДЕНТИФИКАЦИЈА ПОДРУЧЈА ИСТРАЖИВАЊА**

---

#### **2.1. Преглед истраживања у области параболичних концентришућих пријемника сунчевог зрачења**

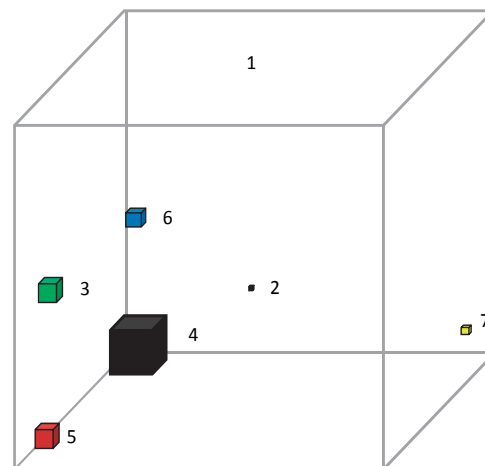
##### **2.1.1. Кратка историја коришћења сунчеве енергије**

Сунце представља отворени фузијски реактор, који у свакој секунди претвори око 600 милиона тона водоника у хелијум, при чему се ослобађа огромна количина енергије-**соларна енергија** која се шаље у свемир.

На Земљу доспева само 0.5 милијардитог дела израчене сунчеве енергије, што одговара снази од  $175 \times 10^9 \text{ MW}$ . Та снага је реда  $10^5$  пута већа од снаге свих електрана на Земљи када су у пуном погону. Површина Сунца која се види са Земље назива се фотосфера и има просечну температуру  $6000^\circ\text{C}$  и притисак од 0,01bar, а дебљине је неколико стотина километара. Са спољне стране фотосфере је хромосфера, дебљине 3.000 до 10.000km, а састоји се од ужареног водоника. Изнад хромосфере је корона, развучен омотач од гасова мале густине, чији слој варира од више стотина хиљада до

преко милион километара. У дубини сунчеве масе одвијају се бројне термонуклеарне реакције. Температура од  $15 \times 10^6 \text{K}$ , са притиском од  $70 \times 10^9$  атмосферског притиска омогућава фузију лаких честица (језгро водоника) и стварање течних честица (језгра хелијума). Фузијом се сматра процес у коме се честице атома водоника спајају формирајући један атом хелијума уз губитак мање количине масе, која се појављује у другој форми према Ајнштајновој релацији  $E = mc^2$ .

Ако замислимо запремину коцке и доведемо је у аналогију са енергијом Сунца која доспе на Земљи у току једне године (1), поређење са резервама примарних извора енергије и укупном годишњом светском потрошњом енергије (7) гласи: све резерве угља (4), природног гаса (3), нафте (5) и урана (6) заједно. Износ тренутно коришћене сунчеве енергије приказује најситнија коцка (2). За разматрање коришћења сунчеве енергије важни су подаци који се тичу трајања инсолације и енергије укупног и дифузног сунчевог зрачења које пада на хоризонталну (вертикалну или под нагибом) површину. Највећи извор зрачења за планету Земљу јесте Сунце, при чему се директно упадно зрачење са Сунца на површину Земље зове **директна соларна ирадијација**. Зрачење које долази до спољних ивица атмосфере зове се **екстратерестрично зрачење**.

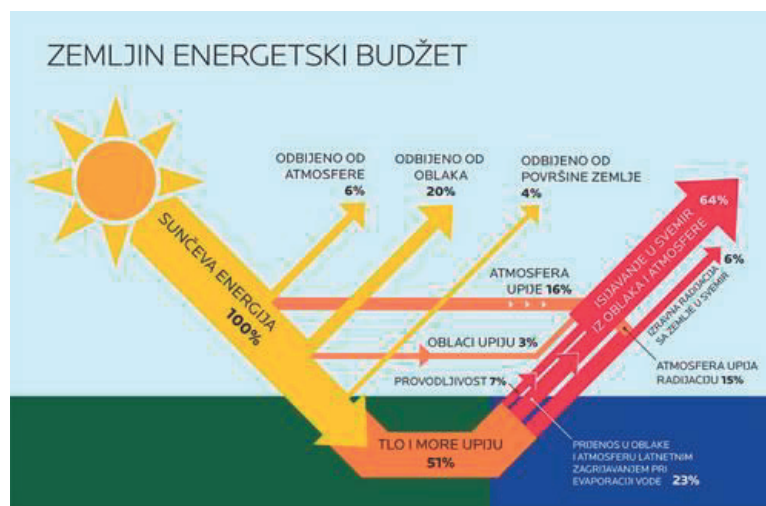


Слика 2.1. Поређење енергије сунца са осталим изворима

Трансмисијом се мења брзина и таласна дужина таласа али фреквенција не. Код рефлексије разликујемо **угаону рефлексију** и **рефлексију расејања зрака** у свим правцима.

У првом случају (*reflection*) познат је угао рефлексије-одбијања светлости

(једнак упадном), док се у другом случају (*"scattering"*) ради о многим угловима одбијања. Али се не мења ни таласна дужина ни брзина зрачења јер не пролази кроз медијум. Абсорпцијом се чини медијум непрозиран за дату таласну дужину. Сама апсорпција праћена је поновном радијацијом и повећањем температуре атмосфере. Дакле, интеракција са атмосфером одређује колико ће се енергије добити на самој површини, а додатна интеракција са површином, сумарно гледано, колико ће се вратити у космос. На слици 2.2 се може видети који проценат долазне светлости пада на површину, који се рефлектује и од чега одређено у односу на укупно зрачење, као и зрачење Земље такође у приказу удела ефеката на њега (са грешком око 2%).



Слика 2.2. Утицај атмосфере на упадно сунчево зрачење [1]

Најзначајнији апсорбери у атмосфери су: Озон, угљен диоксид, водена пара, кисеоник и азот.

Код *"scattering"*-а долази до расејања светлости у свим правцима, тако да агенци који утичу на ову појаву су: молекули гасова, аеросоли (ситне чврсте честице), облаци (честице водене паре). Кретање планете Земље се одвија по елиптичној путањи, тако да се мења растојање од Сунца у току године. Природа Сунца је таква да она има активности које се огледају поред осталог у промени интензитета зрачења. Зато се дефинише **соларна константа  $S_0$**  као средња енергија екстратеристичног зрачења када доспе до спољашне границе атмосфере Земље, која износи  $1373 \pm 20 \text{ W/m}^2$ . Количина соларне енергије која прође атмосферу и доспе на површину планете зависи од *географске ширине, годишњег доба, доба дана, временских услова, загађења*

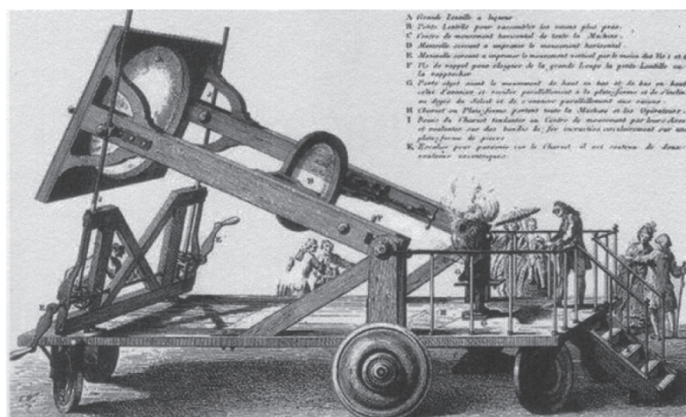


атмосфере. Такво зрачење се назива **инсолација („Incoming Solar Radiation“)** или **инцидентно Сунчево зрачење**.

**Максимум инсолације се дешава када Сунце има највећу висину тј. када има најмањи зенитни угао.** У Екваторијалном појасу Сунце два пута годишње се налази у зениту, а за Екватор су то дани равнодневнице.

Постоје записи давне 1774. године да је постојао покушај да се сунчева енергија искористи за добијање топлотне и електричне енергије. Први документовани покушај је дао Француски хемичар Лавозије и енглески научник Јозеф Престли који су развили теорију сагоревања гаса у цеви применом концентрисаних сунчевих зрака. Слика 2.3 приказује илустрацију соларног концентришућег уређаја који користи Лавозије.

**Екстратерестрично зрачење** може, када дође на површину атмосфере, да се **апсорбује, одбије или трансмитује** кроз **атмосферу**. Шта ће се десити зависи од физичких параметара медијума као и њихове расподеле, од таласне дужине **инцидентне-долазне светлости** и угла под којим пада на површину.

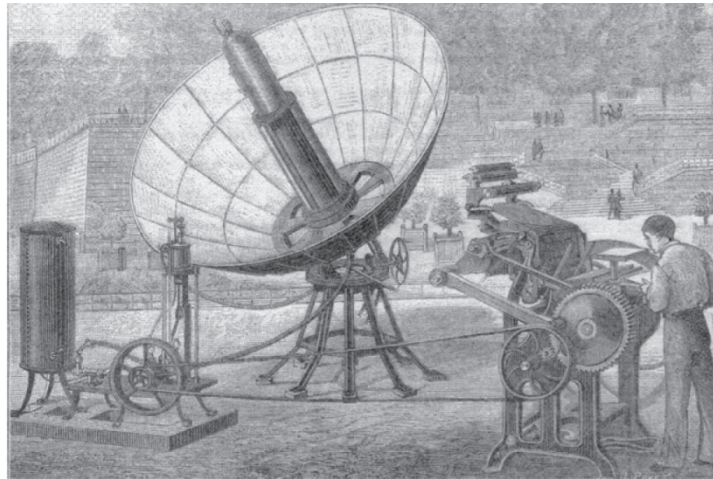


**Слика 2.3.** Соларна пећ конструисана од Лавозије из 1774.  
(Courtesy of Bibliotheque Nationale de Paris. Lavoisier, Oeuvres) [2]

1878. године, једна мала соларна електрана је била изложена на светском сајму у Паризу (слика 2.4). Ово постројење се састоји од параболичног рефлектора који фокусира сунчеву светлост у апсорбер кроз који циркулише вода, постављен у фокусу параболоида, где се производи водена пара која је била коришћена за мале парне машине за покретање машина за штампу у великим штампаријама. 1901, А.Г. Енеас у Пасадени, Калифорнија, је радио са 10-коњских снага парном машином која је погоњена била рефлектујућим параболичним соларним огледалом површине око 65 m<sup>2</sup>.

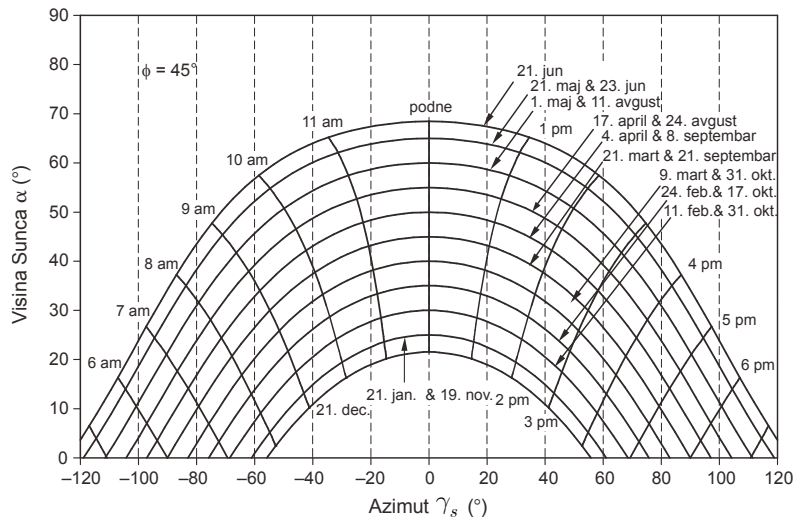
Између 1907. и 1913. год., документација из тог периода показује да је Амерички инжењер F. Shuman, развио хидрауличну пумпу погоњену сунчевом енергијом и 1913., он је изградио соларни мотор од 50 коњских снага за систем наводњавања из реке Нил за град Каиро, Египат.

Сунце је нама најближа звезда те, непосредно или посредно, извор готово све расположиве енергије на Земљи. Ова енергија се у виду светлости и топлоте шири у свемиру, па тако један мали део долази и до Земље. Ову енергију користимо одувек и свакодневно, а да тога најчешће нисмо ни свесни.



**Слика 2.4.** Штампарија погоњена соларним параболичним системом 1878.,  
Изложба у Паризу [3]

Као што се може видети са дијаграма путање Сунца (Слика 2.5), максимална висина Сунца сваког дана се постиже у подне када је Сунце у зениту. За датуме када је Сунце на најнижим максималним висинама, пожељно је поставити колекторе са великим нагибним углом  $\beta$ , како би се смањио угао између Сунчевих зрака и нормале на површину колектора. За периоде када Сунце има више путање на небу,  $\beta$  мора бити мало.



Слика 2.5. Дијаграм путање Сунца за  $45^\circ$  северне географске ширине

Максимална количина Сунчеве енергије се може прикупити када су Сунчеви зраци нормални на површину соларног колектора, односно када су паралелни са нормалом на површину колектора. То се може постићи једино коришћењем уређаја за праћење положаја Сунца (*Sun tracking system*), који модификују вредност нагиба и/или азимута соларног колектора како би се он позиционирао оптимално у односу на Сунце. Постоје бројне студије које показују да коришћење ових система омогућава знатно већу количину прикупљене енергије по јединици површине у односу на ону енергију која се може прикупити по јединици површине код фиксних система.

### 2.1.2. Преглед литературе

Од свих до сада развијених и реализованих соларних система највећу распрострањеност и најширу примену имају равни застакљени водени пријемници. Разлог за то су релативно нижи инвестициони трошкови у односу на остале развијене моделе пријемника, пре свега вакуумске или концентришуће. Претходних деценија спроведена су различита истраживања на пољу побољшања перформанси односно ефикасности поменутих конвенционалних пријемника. Теоријски, највећи допринос повећању ефикасности функционисања ових пријемника може се постићи, под одговарајућим условима, оребрењем спољашњих површина апсорберских цеви ( $\eta=60-72\%$ ) као и применом концентришуће или рефлектујуће површине соларних рефлектора ( $\eta=50-68\%$ ). Због своје важности код расхладних циклуса и

полигенерацијских система, концентришући соларни пријемници за област средње температурне конверзије сунчевог зрачења у топлоту су интензивно изучавани. Циљ ових теоријских и експерименталних истраживања концентришућих соларних пријемника је био да се утврде различите геометрије истих, размотре сви утицајни геометријски и радни параметри на механизам трансформације сунчеве енергије у топлотну енергију, пренос топлоте у условима остваривања средњих температура од 100-400 °C, као и могућности за повећање ефикасности поменутих пријемника.

Код различитих типова концентришућих пријемника сунчевог зрачења су истраживани утицаји разних параметара на њихове перформансе. Поједини аутори су уградњом система за праћење положаја Сунца испитивали утицај (прецизност) праћења на перформансе концентришућих пријемника.

Директна Сунчева енергија може да се искористи у пракси њеном трансформацијом у топлотну, расхладну, електричну и хемијску. У овом подпоглављу ће бити приказан велики број геометријских концепата параболичних концентришућих пријемника сунчевог зрачења који се користе у свету. У овом раду ће бити речи о параболичним концентраторима сунчевог зрачења у спрези са класичним топлотним апсорбером и Стирлинговим мотором у циљу производње топлотне и електричне енергије. Дат је преглед неких основних система изведених током 80-их и почетком 90-их који су темељ данашњих изведених апликација у свету. Највећи део овог поглавља биће посвећен прегледу соларних параболичних концентришућих пријемника у свету. Спроведена су многа научна истраживања везана за соларне пријемнике са рефлектујућом површином. Истраживања се пре свега разликују по томе да ли је рефлектујућа површина равна, цилиндрична, параболична, сферична, итд.

Трошкови самог концентратора износе око 25% од укупних трошкова параболично тањирастих стирлинг система. Концентратори произведени крајем 1970. и почетком 1980. су генерално веома ефикасни али скупи за производњу. Они су обично конструисани коришћењем више стаклених ћелија (сегмената-енгл.-facets) индивидуално монтираних на носећој конструкцији. У покушају да се повећа економичност соларних концентратора, пројектанти су покушали да формирају пун параболоид од листова метала и уз помоћ развучених мембрана. Такође су били у

развоју концентратори састављени од више развучених мембрана (велики број огледаластих мембранских сегмената чији облик се формира вакуумом са предње и задње стране мембранских сегмената).

Andreas Polullikkas, George Kourts, Ioannis Hadjipaschalis [4] су урадили студију изводљивости која је урађена у циљу испитивања одрживости постројења/инсталације за производњу електричне енергије у области Медитерана. Они су урадили студију изводљивосту где су показали да је изградња оваквог постројења економски исплатива и изводљива. Од средине 80-их до средине 90-их изграђен је велики број демонстрационих постројења која користе соларне параболично/тањирасте системе. Распон снага оваквих система који су изграђени је од 5kWe to 50kWe (Сједињене Америчке Државе, Немачка, Шпанија и Јапан). У табели 2.1. приказано је девет највећих и најразвијенијих система чије су карактеристике приказане.



Слика 2.6. Приказ истраживања концентришућих соларних система у свету према години и врсти истраживања

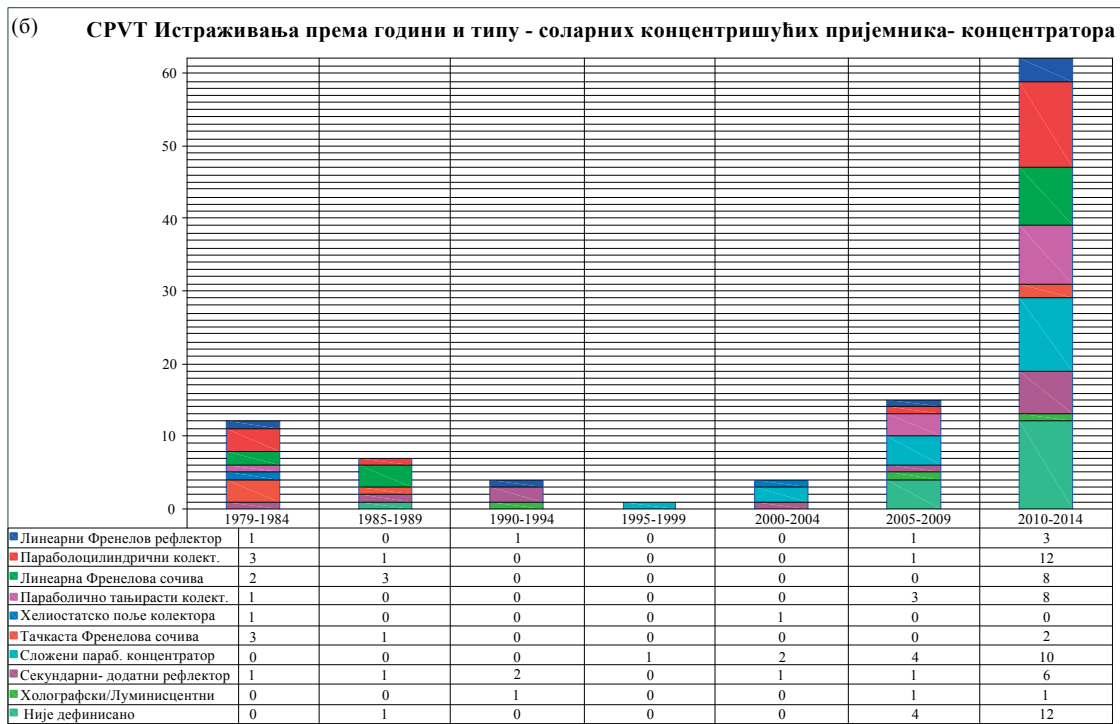
**Табела 2.1.** Преглед комерцијалних соларних параболичних стирлинг система

Назив система	Место	Произвођач	Активна површина (m <sup>2</sup> )	Ефикасност (%)	Капацитет (kWe)
Vanguard 1	California, USA	Advanco	86.7	23	25
Riyadh	Riyadh, Arabia	Saudi Schaigh-Bergermann und Patner	227	N/A	2×50
MDAC/SES	California, USA	McDonnell Douglas	91	23	28
Phorzheim	Phorzheim, Germany	Schaigh-Bergermann und Patner	44	N/A	9
SAIC/STM	N/A	Science Applications International	107	18.5	20
CPG 7 kWe	N/A	Cummins Power Generation	44	15	7
CPG 25 kWe	N/A	Cummins Power Generation	145	N/A	25
DISTAL I	Plataforma, Solar de Almeria, Spain	Schaigh-Bergermann und Patner	44	N/A	3×9
DISTAL II	Plataforma, Solar de Almeria, Spain	Schaigh-Bergermann und Patner	57	18	3×10

Тренутно се налази у свету 9 параболичних концентришућих система који користе Стирлинг-ов мотор. Техничке карактеристике ових постројења су приказане у табели 2.2.

**Табела 2.2.** Преглед параболичних концентратора у Европи и свету

Место	Произвођач	Активна површина (m <sup>2</sup> )	Капацитет (kWe)
Шпанија	Infinia Corporation & Schaigh-Bergermann und Patner	N/A	3
Odeillo, Француска	Schaigh-Bergermann und Patner	57	10
Seville, Шпанија	Schaigh-Bergermann und Patner	N/A	10
Eibstadt, Немачка	Schaigh-Bergermann und Patner	57	10
Vellore, Индија	Schaigh-Bergermann und Patner	57	10
Milan, Италија	Schaigh-Bergermann und Patner	57	10
Almeria, Шпанија	Schaigh-Bergermann und Patner	57	2×10
Canbera, Аустралија	Austalian National Universitz/Wizard Power Pty	400	150
Plataforma Solar de Almeria, Шпанија	Sandia National Laboratories/Stirling Energy Systems	N/A	150



Слика 2.7. Приказ истраживања према години и типу соларних параболичних концентришућих пријемника - концентратора

#### ❖ Концентратори са стакленим сегментима (engl.-glass facet)

Концентратори са стакленим ћелијама развијени за тањирасте параболичне Стирлинг системе који користе сферно закривљена, индивидуално нагнута стаклена огледала као ћелије (енгл.-facet), монтираних на параболично обликованој структури. Неки од ових типова су:

Manchini и његови сарадници [5] развили су 1997. године „Vanguard” концентришући систем. Систем је пречника апертуре 10,5 m, топлотне снаге 25 киловата.

**Табела 2.3.** К-ке параболичних концентратора са стакленим сегментима

Карактеристике концентратора	
Пречник апертуре концентратора	17 m
Жижна даљина	13,6 m
Геометријски концентр. однос	2750
Број сегмената - фасета	336
Пречник апертуре пријемника	200 mm
Величина сегмента	451 mm × 603 mm × 50 mm
Полупречник кривине	13,16 m и 15,80 m
Коеф. рефлексије огледала	92 %
Оптичка ефикасност концентратора	89%
Ефикасност пријемника	90%
Тип мотора	Кинематски
Радни гас	Водоник
Максимални притисак	20MPa
Температура загрејаног гаса	720°C
Ефикасност	41%



**Слика 2.8.** Vanguard соларни параболични концентратор - прва генерација [5]



**Слика 2.9.** Vanguard соларни параболични концентратор - друга генерација [5]

Надзирање и управљање система је засновано на програмабилном логичком контролеру (PLC), уређају за аутоматско регистровање података и сензорској мрежи



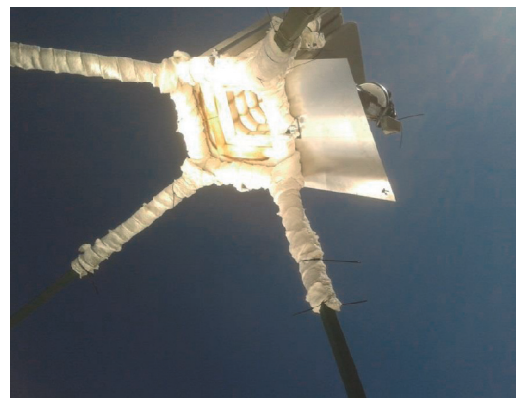
која омогућава надзирање и складиштење података одговарајућих променљивих. Вредности ових променљивих прикупљају се различитим сензорима и складиште у уређају за аутоматско регистровање података. Многи аутори у Европи и Свету су радили на дизајнирању и развоју соларних параболичних концентратора. Различити истраживачи су предложили различита решења. Неки од најистакнутијих истраживача у овој области у свету су приказани овде.

Le Roux, W., Bello-Ochende, T. and Meyer, J. (2012). [6] су 2012. године развили концентришући параболични пријемник пречника 4.8m, жишне даљине 2.4m. Примена система је веома значајна у системима тригенерације као и за системе за десалинизацију морске воде. Систем је развијао тим истраживача у Преторији (Department of Mechanical and Aeronautical Engineering, University of Pretoria). Систем се састоји од параболичног рефлектора израђеног од алуминијумских фолија које су додатно полиране како би се добио значајно бољи квалитет рефлектујуће површине.

Соларни пријемник/рисивер се састоји од квадратног кавитета у који је смештен цевни апсорбер квадратног облика димензија 0.5 m×0.5 m. Кроз цевни квадратни апсорбер струји ваздух. Оптимизован соларни рисивер је направљен од нерђајућег челика са квадратним апсорбером, чије су цеви пречника 88.9 mm. Систем поседује рекуператор топлоте.



а)



б)

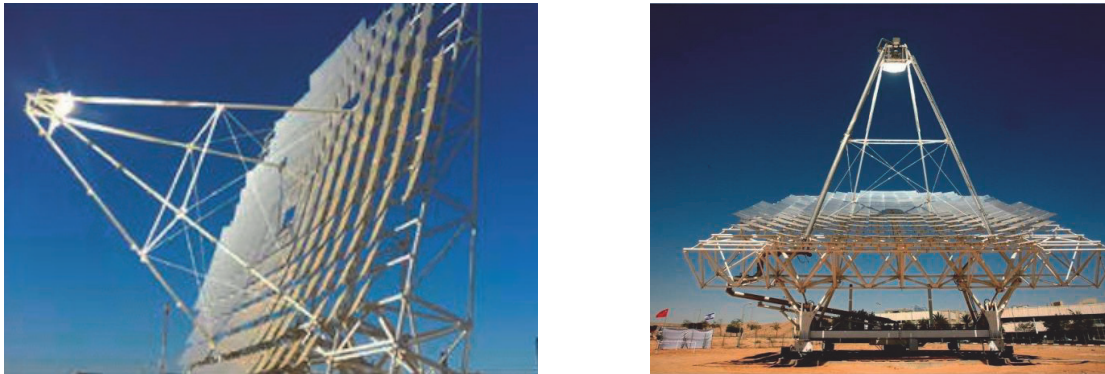
**Слика 2.10.** а) Соларни параболични концентришући систем; б) Озрачена апертура пријемника и апсорбер у фокусу концентратора у току експеримента [6]



**Слика 2.11.** Solar CAT концентришући параболични систем [7]  
(Southwest Solar Technologies, 2013).

Развој овог концепта и тестирање приказаног соларног концентришућег система је извршено у лабораторији Southwest Solar Technologies (2013), познатој као *SolarCAT* систем. (Слика 2.11). Систем је дизајниран са становишта стабилности и у конструкцију система је укључен систем подупирача (слично као код кишобрана) јер је пречник концентратора јако велики и износи 20 m (фокусира 230 kWt сунчеве енергије у фокусу). Носачи су додати са циљем додатне стабилности структуре параболичних сегмената - латица, међутим на тај начин се формира сенка од самих носача на рефлективној површини огледала што додатно смањује ефикасност система.

Френелов концепт параболичног концентратора приказан је на слици 2.12. Он се разликује од осталих типова соларних колектора. Систем се састоји од великог броја равних рефлективних огледала која су постављена на равној платформи за разлику од претходних модела где су рефлектујући сегменти били на параболичној платформи. Свако огледало је појединачно оријентисано према фокусу. Рефлектујући сегменти су смештени у Френеловој конфигурацији на равној металној структури, тако да је сложени профил свих огледала који формирају апроксимира параболични облик, док концентратор има двоосно праћење трајекторије сунца. HelioFocus (Smith and Cohn, 2010.) је развио *HelioBooster system* (слика 2.12), који користи низ равних огледала у циљу смањења комплексности производње закривљених тродимензионалних сегмената - латица.



**Слика 2.12.** HelioFocus концентришући соларни пријемник са равним квадратним огледалима [8] (Smith and Cohn, 2010).

Приказани дизајн соларног концентратора резултира нижим трошковима производње у односу на ефикасније класичне параболоидне концентраторе.

У поређењу са конвенционалним концентришућим пријемницима топлоте, овај соларни концентратор са равним сегментима не изазива значајне промене у равнотежи система за праћење, када се повећава величина концентратора.

Слика 2.14 представља два слична модела концентратора са сличним системом за праћење трајекторије сунца, наиме (а) Schlaigh Bergermann дизајнирао је Eurodish, компанија из Немачке који је пречника 3m снаге 10kWe (Mancini, 1997.) и (б) патентирани двоструки концентратор пречника 3.2m. Titan Tracker соларни колектор пројектован је у Шпанији [9]. Оба типа концентратора се заснивају на сличном геометријском концепту, односно са кружним пружним механизмом који формира путању за праћење по азимуту (концепт зупчасте летве). Овај концепт са праћењем азимута по зупчастој летви пружа доста користи у делу стабилности приликом ротације по азимуту. Једини проблем који се може јавити код оваквих система јесте присуство прљавштине и прашине што значајно смањује прецизност и тачност позиционирања система. Овакав тип соларног концентратора се налази у 4 истраживачка центра у Европи: CRU -Milano/Italy, CRU - Seville/Spain, CRU - Würzburg/Germany, CRU - Odeillo/France, где се примењују нове методе експерименталног истраживања као и тестирање различитих параметара на квалитет финалне енергије - топлотне и електричне. У Шпанији се налази читаво постројење снаге 500kW–1MW (50–100 јединица). Укупни инвестициони трошкови за имплементацију оваквог соларног парка су око 4 милиона евра.



Слика 2.13. Соларни парк састављен од соларних концентратора EURODISH- Немачка

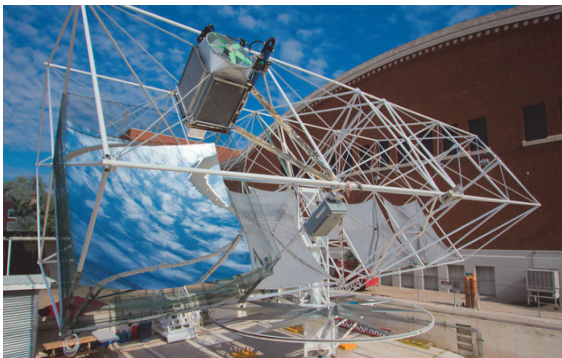


а)



б)

Слика 2.14. (а) Eurodish параболични концентратор (Mancini, 1997) и  
(б) систем праћења "Titansolar" [9]



Слика 2.15. Телескопски концентришући пријемник са системом за праћење,  
Arizona Универзитет, [10]

Истраживачи Универзитета у Аризони су развили и патентирали потпуно нови тип соларног параболично-тањирастог пријемника и система за праћење путање сунца.

(слика 2.15). Овај нови модел соларног тракера је развијен од стране истраживачког тима који су радили у астрономској лабораторији где је направљен јефтини високо прецизни телескопски дизајн који се показао веома ефикасним у пракси, (Angel and Davison, [10]). Њихов дизајн соларног тракера укључује већи број параболичних огледала која могу бити обликована у параболичном облику и постављена у специјално дизајнираној конструкцији за подешавање и повезивање. Монолитна рефлектујућа огледала су направљена од јефтиног флотираниог стакла. Ови елементи су коаксијално поравнати у низу са лаким кутијастим челичним носачима и кутијастим оквиром. У циљу минимизирања силе гравитације и силе ветра на самој структури на челичном оквиру је постављен против тег који одржава равнотежу приликом праћења система по углу елевације.

Solartron [11] соларни параболични концентратор је развила група истраживача из Канаде. Компанија Солартрон (слика 2.16) је развила два модела соларних концентратора: пречника апертуре 4.5m и 7m. Параболични рефлектор је састављен од алуминијума са стакленом високо рефлективном површином од 95% (са додатком оксида сребра) која је отпорна на атмосферске прилике. Систем се примењује за директну производњу електричне и топлотне енергије применом фото ћелија које су смештене у самом пријемнику и имају свој систем хлађења. Систем се користи и у постројењима за десалинизацију морске воде.



а)



б)



**Слика 2.16.** Solartron концентришући систем - New Zealand  
(а) праћење елевације помоћу линераног актуатора и  
(б) редуктор за азимутно праћење [11]

Систем производи 31,5kW топлотне енергије, температуре флуида од 275°C, факторе геометријске концентрације до 1000, док је температура стагнације на површини рисивера у фокусу 800°C. Систем је пројектован да издржи ударе ветра од 150km/h са минималним дилатацијама параболичне површине рефлектора и високу прецизност праћења трајекторије сунца (минималне грешке праћења). Веома прецизно позиционирање се постиже са релативно малим DC степ моторима са сталним магнетима за погон кретања соларног концентришућег система око азимутне осе. Позиционирање Solartron параболичног концентратора по осе елевације се постиже применом независног линеарног актуатора који је довољне снаге и силе да може да подиже и спушта јако тежак соларни систем. Предност овог решења система позиционирања код Solartron концентратора је у томе што линеарни актуатор сам по себи гарантује висок преносни однос на зупчастој летви без имало зазора што захтева мање моторе који троше много мање електричне енергије.

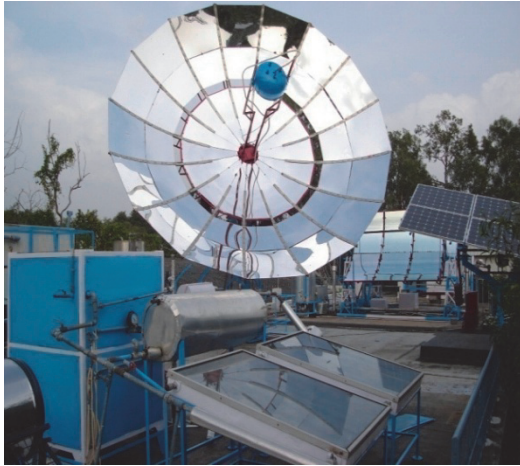
**KIER** (*Korea Institute of Energy Research, Korea*). Развојно - истраживачки центар у Кореји развио је прототип соларног параболичног концентратора са Стирлинг - овим мотором SOLO 161. Систем је површине 40.3m<sup>2</sup>. Систем се састоји од великог броја равних правоугаоних рефлектујућих сегмената - фасета на 5 различитих полупречника кривине. Укупан број рефлектујућих сегмената је 120. Систем је 2007. године тестиран у истраживачком центру. Сваки сегмент је сачињен од огледаластог слоја који је нанешен на алуминијумској основи-структури. Систем поседује два спрегнута система- мотор-редуктор за праћење трајекторије сунца у току дана (азимут-елевација).



**Слика 2.17.** KIER прототип соларног параболичног концентратора [12]

Ефикасност производње електричне енергије параболичног концентратора путем Стирлинг-овог мотора је око 20.2%.

Истраживачи са Машинског факултета и технолошког института Мадрас у Индији (ИТМ) су развили прототип соларног параболичног концентратора активне површине  $20\text{m}^2$  (слика 2.18) [13].



**Слика 2.18** Концентришући соларни систем развијен на Технолошком Институту Мадрас [14]

ИТМ соларни параболични концентратор је направљен од високо рефлективних лаких пластичних огледала постављених на чврсту и стабилну конструкцију. Топлотни пријемник је постављен у жижној равни помоћу држача, док је против тег постављен са задње стране како би вршио балансирање соларног параболичног концентратора у односу на централни носећи стуб. Овај тип концентратора је познат као фази фокални, због тога што је састављен од три параболе чије су жижне даљине различите ( $f/D$  је променљива геометријска величина). Различите параболе могу имати различите жижне даљине. K.S. Reddy и сарадници.[14] су истраживали експерименталне карактеристике овог типа соларног концентратора. Истраживали су расподелу упадног флукса тоplotног зрачења на површини тоplotног апсорбера аналитичким поступком. Затим су извршили тоplotну анализу соларног апсорбера у кавитету, где су рачунали коефицијент конвективног прелаза тоplotе као и тоplotну ефикасност концентришућег пријемника сунчевог зрачења. Они су истраживали вредности коефицијента прелаза тоplotе у области термичке развојне дужине при ламинарном струјању, као и осциловање локалних вредности коефицијената прелаза тоplotе у зависности од растојања од улаза у хеликоидни цевни размењивач тоplotе.

Одељење за енергетику Pacific Northwest националне лабораторије (*Department of Energy's Pacific Northwest National Laboratory - PNNL*) узима најбоље из оба света у приступу развијања хибридног соларног/гасног система који повећава ефикасност и смањује емисију угљен-диоксида електрана на природни гас. Пречник апертуре приказаног параболичног концентратора је 4.7m, висине 4m. Конструкција је направљена од челика, као и пластике ојачане стакленим влакнима што додатно даје чврстоћу и крутост параболичних рефлектујућих сегмената. Тежина INFINIA соларног параболичног концентратора са Стирлинговим мотором је око 860 kg. Последњи модел који је INFINIA избацила на тржиште је 1kWe Powerdish-III (слика 2.24), који је пуштен у продају и експлоатацију почетком 2012. године. Концептуални дизајн овог соларног концентратора је на неки начин преузет из аутомобилске индустрије. На пример овакав дизајн конструкције која носи рефлектујуће сегменте је моделиран на бази концепта развоја комплексних геометријских модела шасија код аутомобила од лаких композитних материјала.

Powerdish-IV соларни параболични концентратор [15] подсећа на структуру спона код точкова конструисаног од стране Erez-a и других [16]. Овакви соларни концентришући системи се најчешће користе у системима полигенерације и тригенерације као и у системима гасних електрана где значајно побољшавају енергетску ефикасност. PNNL систем користи параболично огледало које фокусира сунчеву светлост на хемијски реактор (величине 1,2 m са 0,6 m) оивичен уским каналима ширине 8,1mm. Сунчева светлост загрева природни гас у каналима поред катализатора који разбија молекуле гаса у мешавину водоника и угљен-диоксида названу синтетички гас или *сингас* (*syngas*).

На реактору је повезан измењивач топлоте који сакупља отпадну топлоту из реакције и рециклира је назад у реактор у циљу унапређења процеса све док се 60% сунчеве светлости претвори у хемијску енергију. Тестови показују да систем омогућава да електрана на природни гас функционише са око 20% веће ефикасности. У исто време, систем смањује гасове који изазивају ефекат стаклене баште електране по цени која је конкурентна са традиционалним фосилним горивима.





Слика 2.19. Powerdish III - 3 генерација [15]

Није ни чудо да систем функционише боље у областима где има доста сунчеве енергије и према PNNL-у, он је прилагодив различитим величинама електрана на природни гас (електрана са 500MW капацитета треба око 3.000 соларних тањира). Поред тога, *sangas* се такође може користити за производњу синтетичких горива за возила. Такође, методе са циљем масовне производње система ће се развијати у Институту *Microproducts Breakthrough*, истраживачкој и развојној установи са седиштем у Корвалису, Орегон, док индустријски партнер, компанија *SolarThermoChemical LLC*, планира да производи и продаје системе након развоја.



Слика 2.20. Powerdish IV - Концентратор 4- те генерације [16]

Zenith соларни параболични концентратор [17] развијен је као прилагодљив модуларни концентришући фотонапонски систем опремљен актуаторима за двоосно праћење позиције сунца (слика 2.20). Систем за позиционирање је дизајниран тако да механичке компоненте система буду јефтине за одржавање, поготову за велике системе где је потребно повезати већи број соларних јединица. Што се тиче двоосне конфигурације, Zenith соларни оптички концентратор (конфигурација) сачињена је од

великог броја малих огледала исте величине и облика на пластичну параболичну структуру (кућиште). Површина апертуре соларног концентратора је  $11\text{m}^2$ . Површина је параболична и добијена бризгањем где је облик површине попримио перфектан параболичан облик. Површина је подељена на 4 квадранта. Систем двоосног праћења (азимутни и елевациони соларни тракер су монтирани на металну конструкцију система. Систем је јако прецизан и не захтева никакво превелико одржавање. Израелска фирма *Zenith Solar* дизајнирала је нови соларни концентришући пријемник сунчевог зрачења за Kibbutz Yavne. Соларни концентришући систем је јако ефикасан. Састоји се великог броја малих равних огледала који апроксимирају параболични облик. на тај начин повећавајући енергију сунчевог зрачења која доспе на површину апертуре 1000 пута уместо стандардних ниско ефикасних соларних ћелија које се масовно користе данас у инжењерској пракси. Апсорбер сунчевог зрачења налази се у жижној равни. Приказани соларни параболични концентратор састоји се од вишеструких фото - ћелија у спрези са измењивачем топлоте који трансформишу енергију сунчевог зрачења у електричну и топлотну снагу. Ово је јако ефикасан систем у когенерационим и тригенерационим постројењима као и у системима уличног осветљења.



Слика 2.21 . Zenith соларни концентришући систем из Израела [17]

*Renovalia Energy* - Компанија смештена у Шпанији која се бави развојем нових енергетских система који користе обновљиве изворе енергије, управо су представили резултат четворогодишњег истраживања концентришућих соларних пријемника у сарадњи са Америчком компанијом SunPower. Шпанска компанија која се бави развојем и истраживањем соларних система [Renovalia](#) потписала је ексклузивни

уговор за заједничко улагање са Америчком компанијом [Infinia](#) за изградњу соларних топлотних постојења и соларних електрана за трећа лица у Шпанији и Италији као и заједничком пројекту развоја у остатку Јужне Европе, Северне Америке, Северне Африке и осталих држава.

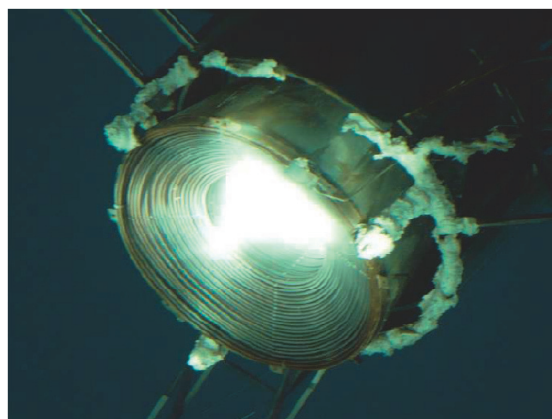
На наредној слици 2.22 приказан је соларни параболични систем RENOVALIA. Систем има јако прецизан хардверски и софтверски део за позиционирање соларног параболичног концентратора у две осе (праћење по азимуту и елевацији) применом астрономских *on line* података). Систем RENOVALIA припада групи хибридних соларних концентришућих система. Поред продукције топлотне енергије систем поседује фотонапонски модул за производњу електричне енергије. RENOVALIA спада у групи најјефикаснијих соларних концентришућих фотонапонских система на свету. Фотонапонски систем се заснива на коришћењу троструких високо ефикасних спојених фото - ћелија које се користе у авио индустрији од 90- их година, достижући коефицијент конверзије изнад 40%.



**Слика 2.22.** CPV 3000 Соларни параболични концентришући пријемник [18]

Аустралијски национални Универзитет је развио највећи тренутно на свету соларни параболични концентришући пријемник “SG4” прототип површине 500m<sup>2</sup>. SG4 соларни систем је највећи те врсте на свету. Систем SG4 је систематски оптимизован са становишта јефтине производње и малих трошкова улагања уз добијање квалитетне финалне енергије у топлотним системима. Висок квалитет оптичких перформанси соларног концентратора може бити постигнут уз идентичне соларне панеле постављене на подструктури која формира параболични облик.

Конструкција прототипа је изведена у кампусу ANU почетком 2008 године. Прво тестирање је извршено 29 Јуна 2009. године. SG4 тренутно функционише са цевним хеликоидним апсорбером који производи прегрејану водену пару до  $550^{\circ}\text{C}$  на притиску 5.0 МПа. Соларни параболични концентришући систем у фокусу генерише просечну вредност концентрације од 2,100 suns ( $\text{suns}=1\text{kW}/\text{m}^2$ ) на кружном диску. Максимална концентрација зрачења која се може постићи у фокусу топлотног цевног апсорбера је 14.000 suns. Геометријски концентрациони однос који концентратор може постићи је 2240 (95% фактор прихватања сунчеве енергије). Greg Burgess, Keith Lovegrove [19] и други истраживали су ефикасност соларног цевног апсорбера применом експерименталног истраживања, мерењем температурског профила на површини апсорбера. Затим су дали зависност ефикасности топлотног апсорбера од излазне температуре апсорбера.



**Слика 2.23.** SG4” прототип површине  $500\text{m}^2$  Соларни параболични концентришући пријемник - лево и соларни цевни апсорбер у кавитету- десно [19]

Профил температуре је добијен експерименталним мерењем применом термопарова типа "К". Већина термопарова је заварена на спољну површину цеви са стране изолације да не би дошло до прегоривања завареног споја. Прорачун топлотних губитака природне конвекције у кавитету соларног апсорбера је спроведен на бази CFD (Computational Fluid Dynamics), где је доказано да се топлотни губици повећавају линеарно са углом инклинације параболичног концентратора сунчевог зрачења.

ARUN соларни концентратори припадају класи Френелових параболичних рефлектујућих концентратора сунчевог зрачења приказаних на слици 2.24, који су у стању да испоруче топлотну енергију високих термичких перформанси. ARUN

поседује три типа соларних концентришућих пријемника сунчевог зрачења: ARUN 160 површине  $169\text{m}^2$ , ARUN 100 површине  $104\text{m}^2$  и ARUN 30 површине  $34\text{m}^2$ . Систем користи воду и термичко синтетичко уље као радни флуид. Температура флуда која се постиже на излазу из топлотног апсорбера је око  $350^{\circ}\text{C}$ . Систем користи Френелов параболоид сачињен од великог броја рефлектујућих сегмената квадратног облика који су део параболоидне површине. Систем поседује двоосни аутоматизовани систем за праћење путање сунца (тракер). Систем налази примени у индустрији за пастеризацију млека, у индустрији хране, пића, десалинизацију морске воде, сушење, производњу топлотне енергије за загревање објеката, загревање базена, итд.

AEDesign је развила и пројектовала компанија из Франкфурта - Немачка. Они су развили соларни параболни концентратор са двоосним праћењем у реалном времену са могућношћу уградње Стирлинг - овог мотора (Specifically for Powering Solar Stirling Engine). Компанија је развила неколико типова параболних концентришућих пријемника сунчевог зрачења: за продукцију паре применом термичког уља, као и хибридни систем са фотонапонским модулом. Ефикасност оваквих модула је побољшана и креће се до 42%. Високо прецизна и квалитетна оптика код оваквих система омогућује јако високе вредности концентрационих односа флукса у жижној равни (500 - 1000 suns). Систем генерише прегрејану пару температуре  $565^{\circ}\text{C}$ , чиме се избегава коришћење горива на бази угљеника за повећање температуре паре пре уласка у процес убризгавања код парне или микро гасне турбине.

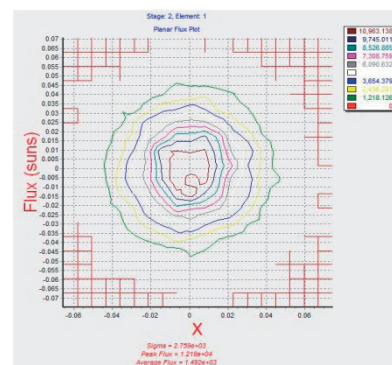


Слика 2.24. "ARUN" Соларни параболни концентришући пријемник [20]

AEDesign's соларни параболни концентратор (слика 2.25) у старту елиминира потребу за масивним подконструкционим елементима и челичним носачима, помоћу јаких и чврстих рефлектујућих параболних панела (латица) постављене на

затегнутим челичним ужадима повезаним за носач који носи Стирлингов мотор на другом крају.

Ова геометријска конфигурација соларног концентришућег оптичког система спада у групу пријемника лакше конструкције (*light weight design solution*), модуларног типа, преносиве, економичне и лаке за монтажу и демонтажу на терену. У поређењу са осталим технологијама као што су фотонапонски системи, соларни концентратори могу да раде 20 година са деградацијом од само 2% у току читавог радног века. Рефлектујући параболични сегменти прихватају сунчево зрачење на апертури концентратора који се окреће и прати путању сунца у току дана према *on-line* подацима азимута и елевације. Параболична огледала концентришу сунчеву енергију у фокусу Стирлингов-ог мотор, где водоник у гасовитом стању пролази кроз низ апсорберских цеви. Експандирани гас покреће клипове Стирлинг-овог мотора без емитовања - испуштања издувних гасова. Генератор затим трансформише кинетичку енергију у електричну и на тај начин се циклус затвара. Ови рефлектујући сегменти генеришу висок концентрациони однос (степен концентрације), фокусирајући сунчеву светлост (зрачење) са рефлектора пречника 9m на веома малу површину (жижна област) Стирлинг-овог мотора, где се огромна снага сунчевог концентрисаног зрачења конвертује у електричну енергију. Структура овог соларног концентратора је пројектована и симулирана са становишта стабилности при брзинама ветра 16m/s односно максималној брзини која се може јавити од 44m/s. Тежина соларног концентратора је око 3000kg. Пречник апертуре концентратора је око 9m. Рефлектујућа површина апертуре је 53m<sup>2</sup>. Жижна даљина је око 5m. Систем је сачињен од 30 независних соларних сегмената - латица које су спојене у централни стуб.



**Слика 2.25.** ”AEDesign” Соларни параболични концентришући пријемник (лево), расподела флукса упадног топлотног зрачења на површини апсорбера - Стирлинг мотор (десно) [21]

MWS соларни параболични топлотни концентратор користи параболичну рефлектујућу површину за добијање високих температура за процесну индустрију, системе грејања у сектору прераде млека, фармацеутској индустрији, индустрији прераде гуме итд. Вода/термичко уље долази у апсорбер/измењивач топлоте где циркулише уз помоћ циркулационе пумпе. Површина апсорбера се загрева концентрисаним сунчевим зрачењем, тако да долази до преноса топлоте са стране површине цеви на флуид и одношења топлоте радном медијуму. MWS соларни концентратори поседују аутоматизовани начин двоосног праћења (Sun-Tracking mechanism) како би се обезбедила највећа топлотна ефикасност соларног система /максимална прикупљена- концентрисана енергија на апертури концентратора. MWS соларни концентришући систем се може повезати у већи број јединица (од једне до стотинак) ако је то потребно, могуће је имплементирати овакве системе у већ постојеће индустријске системе за продукцију топлотне енергије високих перформанси. MWS Соларно поље са концентришућим пријемницима сунчевог зрачења је 100% аутохтоно решење, направљено у Индији. Систем налази примену и индустрији производње гуме за загревање термичког уља у процесу вулканизације гуме, затим у млекарској индустрији и фармацеутској индустрији. Постоје читава постројења са интеграцијом већег броја оваквих соларних параболичних концентришућих система. MWS Solar Dish поседује два типа соларних параболичних система: M55 и M95. M95 је површине  $95\text{m}^2$ , пречника 11 метара, тежине око 3 тоне. Максимална температура коју постиже овај тип концентришућег пријемника је око  $400^{\circ}\text{C}$ . Оба система имају аутоматизовано управљање у две осе применом соларног тракера и логичко - управљачке јединице која управља и контролише рад и одржава систем у оптималном положају (максимални прихват сунчевог зрачења). Систем M55 је површине  $55\text{m}^2$ , пречника 8m, тежине око 1.5 тона. Максимална температура коју постиже овај тип концентришућег пријемника је око  $400^{\circ}\text{C}$ .

Топлотна ефикасност оба типа соларних концентришућих пријемника је 70%. Као радне флуиде систем користи воду и термичко уље Therminol VP-1 [22].

Систем се користи тамо где постоји потреба за производњом паре високих термичких перформанси као и примене топлотне енергије за разне индустријске процесе (спрега са апсорпционим технологијама, КГХ системи, тригенерација, полигенерација, итд.)



**Слика 2.26.** "MWS" Соларни параболични концентришући пријемник [23]

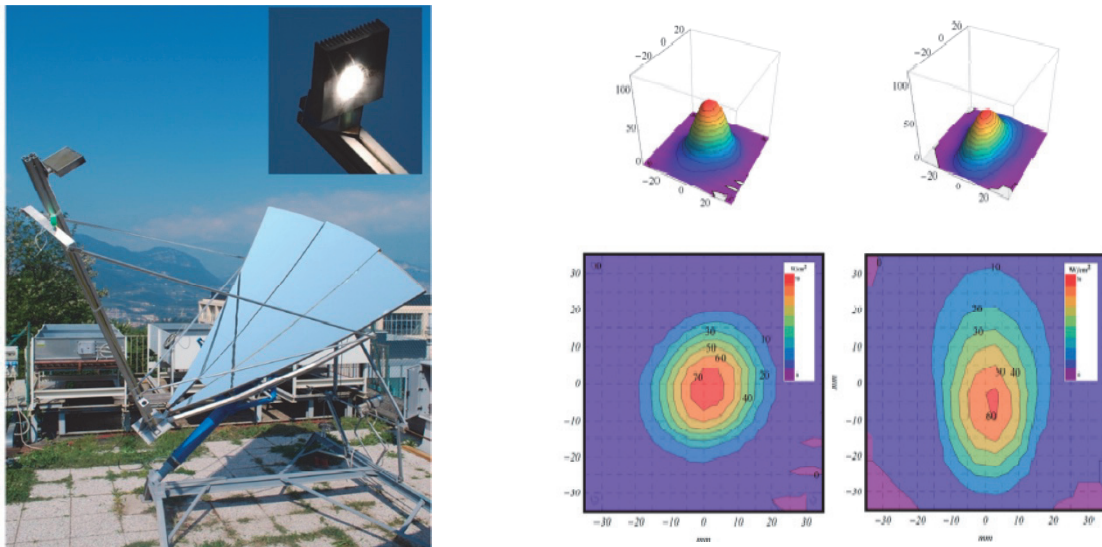
Е.М.Тоугар, Т. Ваугат и остали истраживачи су развили и пројектовали јефтин соларни параболични концентришући систем са равним огледаластим сегментима (фасетама) који генерише топлотну и електричну енергију, као и акумулатор топлоте који има улогу складиштења топлотне енергије у тренутку смањене инсолације у атмосфери. Компанија која је финансирала ово истраживање је Solarux CSP. Параболични облик рефлектора је дискретизован равним сегментима у 4 реда (прстена). Овај модел соларног система је нашао примену у системима климатизације, системима грејања, као и производњи електричне енергије. Циљ овог проналазка је коришћење равних огледала уместо параболичних у циљу смањења трошкова производње и саме технологије израде. На овај начин систем је веома лак за производњу и може се користити у свим подручјима од каменитих, равних, неприступачних терена [24]. Компанија Solarux развила је два типа оваквих система за различите намене. Први модел је намењен за домаћинства и мање капацитете, пречника апертуре 3m, док је други тип за индустријску примену и знатно је већи (8m) пречника апертуре концентратора. Оба система су са равним рефлектујућим сегментима (фасетама).





Слика 2.27. "Solarux" Соларни параболични концентришући пријемник [24]

Massimo Escher и сарадници [25] радили су на развоју хибридног соларног параболичног концентришућег пријемника (термални + фотонапонски концентришући пријемник сунчевог зрачења). Ово њихово истраживање приказује примену параболичног концентратора са топлотним апсорбером у низу који се састоји од вишеструких соларних фото ћелија. Соларни параболични концентратор, потпуно је пројектован и направљен на Универзитету Тренто у Италији у циљу добијања униформне расподеле светлости (флуksа зрачења) на површину фото-напонског пријемника. Неуниформност флуksа концентрисаног зрачења утиче на смањење ефикасности трансформације сунчеве енергије у електричну услед неуједначене индукције струје на фото - ћелијама. Хибридни тип апсорбера/рисивера се састоји од водом хлађених апсорберске цеви чија отпадна топлота се користи за загревање радног медијума и преко измењивача топлоте се преноси до топлотног резервоара. Слика 2.28 (десно) приказује дистрибуцију густине флуksа зрачења у жишној равни хибридног рисивера ( $W/cm^2$ ), као резултат интерполације експерименталних података. Облик профила концентрације флуksа се мења по Гаусовој кривој - расподели са просечним градијентом снаге око  $2.23W/(cm^2mm)$  и максималном густином флуksа од  $73W/cm^2$ , док је максимални концентрациони однос 870 X.



**Слика 2.28.** Прототип соларног концентратора (лево); фокус концентратора - област максималне озрачености (горњи десни угао; 2D и 3D профил густине флуksа зрачења на површини хибридног рисивера [25]

Приказани пројекат је урађен под руководством организације [26] (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO)). Назив пројекта је: Развој термоелектричног генератора са применом концентришућих пријемника сунчевог зрачења у циклусу горњег нивоа (topping cycle). Пројекат обухвата развој и боље разумевање применљивости постројења са термоелектричним генератором који у позадини користи соларни параболични концентратор. Комбинација технологија биће потребна за успешну примену и имплементацију концентришућих соларних технологија. Наиме, циљ овог пројекта је пре свега да се процени и пројектује концентришући соларни термални систем мале снаге ( $\sim 10\text{kW}$ ) са уграђеним термоелектричним генератором (TEG) у соларном рисиверу као виши ниво производње топлотне енергије, тј. добијање високе температуре од  $400^\circ\text{C}$ .

Три различита концепта рисивера су развијена у другом делу задатка на пројекту. Прва генерација дизајна рисивера је коришћена са параболичном апертуром на предњој страни изложеној концентрисаном зрачењу и термоелектрични генератор са преградом која има улогу да оптимизује униформност осветљења (флуksа концентрисаног зрачења) које долази од параболичног концентратора. Приказани дизајн - геометријска конфигурација површине апсорбера захтева развој нових облика површина и облика термоелектричних елемената.



Слика 2.29. Параболични концентратор сунчевог зрачења са аспсорпционим чилером SASCs - испитна станица - CSIRO Energy Centre смештен у Њукастлу, NSW [26]

## 2.2. Могућности примене параболичних концентришућих пријемника сунчевог зрачења у системима полигенерације

### 2.2.1. Полигенерацијски концепти

Мали полигенерациони системи подразумевају комбинацију конвенционалних и нових технологија за грејање и хлађење, за производњу електричне енергије, али и друге производе као што су биогорива,  $\text{CO}_2$ , водена пара и сл. Најједноставнији полигенерациони систем, заправо подразумева тригенерацију, тј. комбиновану производњу електричне, топлотне и расхладне енергије.

Мали полигенерациони системи представљају релативно нови концепт за подмиривање локалних потреба на најоптималнији начин. У погледу снабдевања енергијом, највећа потрошња енергије модерног друштва, а самим тим и највеће потребе су: грејање, хлађење и електричне енергија. Најједноставнији облик полигенерационих система подразумева комбиновану производњу за задовољавање наведених потреба, али могу бити предвиђена и за подмиривање других специфичних потреба. Циљ интеграције малих полигенерационих постројења је производња са сврхом подмиривања локалних потреба са што већом ефикасношћу система, коришћењем доступних технолошких и енергетских ресурса.

Когенерација и полигенерација представљају енергетске системе за производњу два или више облика енергије. Полигенерација представља истовремену производњу два или више облика енергије или још неког производа у оквиру једног процеса, где је

излаз или нус-производ једног подпроцеса улаз за следећи процес. Оваква суперпозиција термодинамичких процеса чини систем за снабдевање енергијом јако ефикасним. Полигенерација описује интегрисани процес који има један или више излаза укључујући и производњу неке врсте енергије применом једног или више природних ресурса.

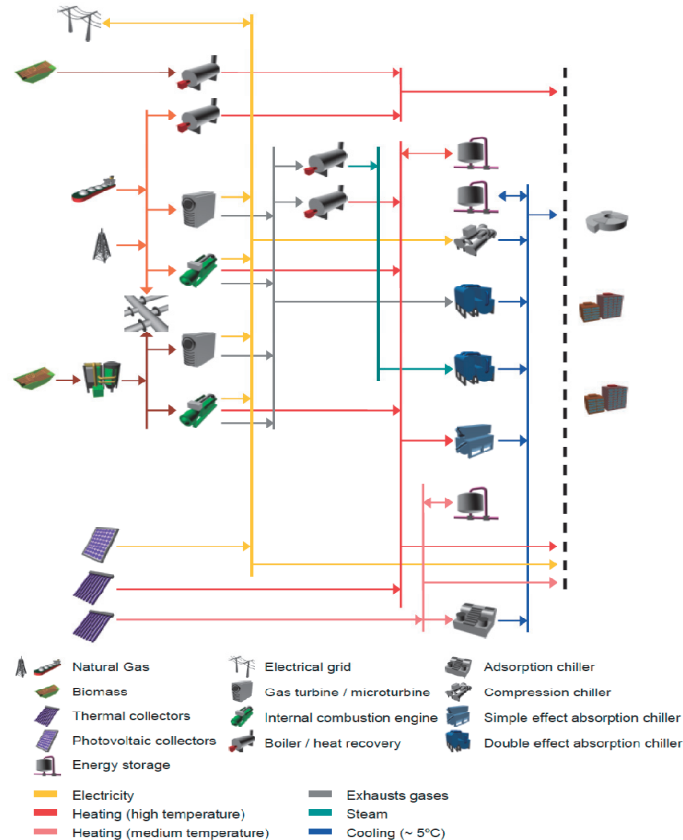
Главна предност примене полигенерационих система је уштеда енергије у поређењу са конвенционалним системима, где се под конвенционалним системима подразумева појединачна производња сваког од облика енергије. Ипак, употреба неких технологија за задовољење енергетских потреба носи одређене недостатке, попут поузданости произведене количине енергије нпр. због утицаја временских прилика што је карактеристично за ветрогенераторе и соларне пријемнике, што изискује интеграцију допунских система. Полигенерациони системи се најчешће дизајнирају да подмире основне енергетске потребе док се за подмиривање вршних оптерећења предвиђају резервни уређаји попут котлова, компресионих чилера и енергетских акумулатора [27].

Мали енергетски системи тзв. дистрибуирани енергетски системи [27] (Distributed Energy Systems) подразумевају системе за производњу енергије мањих снага, који могу бити изграђени ближе потрошачима. Енергија произведена оваквим системима се доставља потрошачу системима даљинског грејања и хлађења, где се као радни медијум за транспорт енергије најчешће користи вода. Овакви системи се могу користити за смањење потрошње енергије, услед мањих губитака за транспорт енергије и захваљујући интеграцији технологија са применом обновљивих извора енергије, смањење употребе примарне енергије и емисија полутаната у поређењу са великим системима.

Како је тренутно доступан велики број технологија за производњу електричне енергије, грејања и хлађења, могуће је извршити њихову интеграцију на више нивоа, те је одабир најисплативијег, најефикаснијег, најпоузданијег и најоптималнијег система значајно отежан [27]. На слици 2.30а приказане су различите опције за интеграцију једног полигенерационог постројења за производњу електричне, топлотне и расхладне енергије.

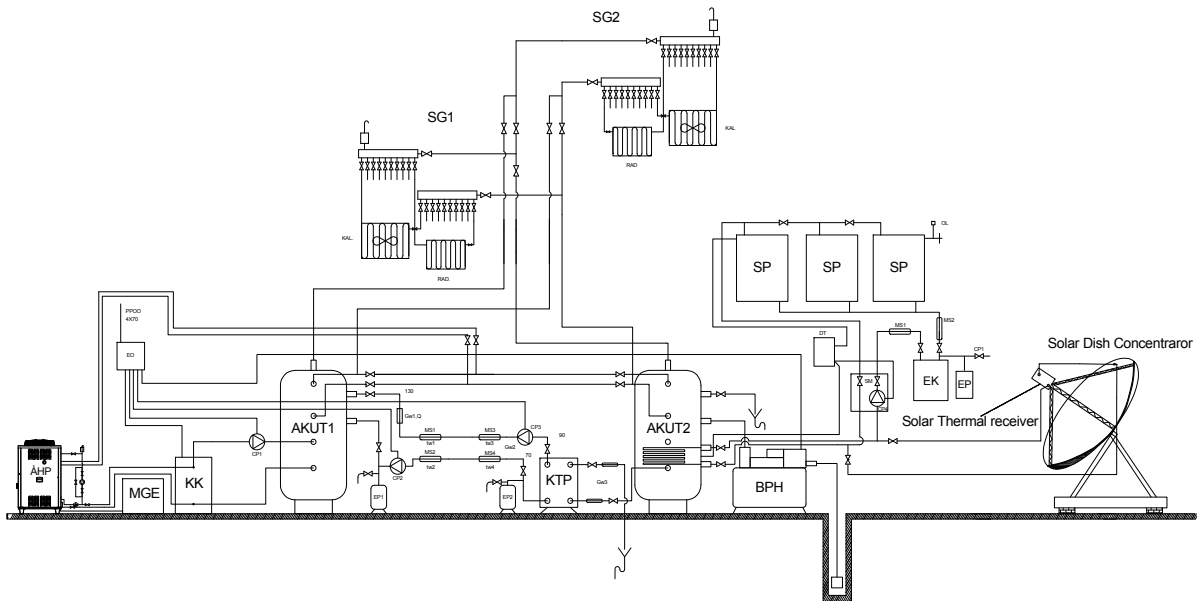
За производњу електричне енергије се предвиђа могућност употребе гасног мотора са унутрашњим сагоревањем или гасне турбине (микротурбине). Мотор и

турбина могу користити природни гас за свој погон, биогаз добијен из биомасе или њихову мешавину. Пример одлично илуструје могућност интеграције мањег полигенерационог постројења. Пример узима у обзир две основне врсте горива: природни гас и биомасу, који се могу користити директно у котлу, а предвиђена је и могућност гасификације биомасе тј. производње биогаза.



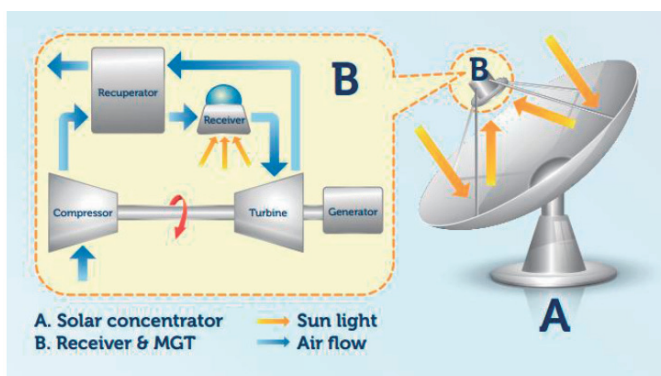
**Слика 2.30а.** Опције за интеграцију полигенерационог постројења за производњу електричне, топлотне и расхладне енергије [28]

Са слике се види да се за производњу топлотне енергије предвиђа употреба котлова (за вршна оптерећења и као резервна опција, као и када је потрошња сувише мала да би било исплативо користити турбину или мотор). Предвиђене су и додатне технологије попут топлотних соларних колектора, фотонапонских колектора, повезаност са мрежом електропривреде за преузимање или продају електричне енергије и сл. Произведени биогаз се може користити директно у гасној турбини или мотору, а могуће је и коришћење његове мешавине са природним гасом или неким сличним горивом. На слици 2.30а. се види мноштво могућности за интеграцију једног полигенерационог система.



Слика 2.30б. Шема лабораторијског полигенерацијског постројења применом параболичног концентратора сунчевог зрачења

Слика 2.30б приказује саставне елементе једног лабораторијског полигенерацијског постројења. За потребе хлађења предвиђене су технологије које користе топлотни извор за свој погон попут абсорпционих чилера и једностепених и двостепених адсорпционих чилера. Главна разлика између ових технологија је у њиховој ефикасности и потребном температурном нивоу за њихов рад. Компресиони чилери се могу користити као допунска/резервна варијанта за вршна оптерећења.



Слика 2.31. OMSoP - пројекат примене соларног концентратора у систему полигенерације [29]

Чланови конзорцијума OMSoP [29] покушавају да изграде конструкцију соларног полигенерационог постројења модуларног типа за област снага од 3-10kW [29].

Соларни параболични концентратор (приказан на слици изнад као компонента А) спрегнута је у Брајтонов кружни циклус; да би се остварио овај процес, класична комора за сагоревање чија је функција да произведе издувне гасове високе температуре као гориво за покретање турбине. Конвенционална комора за сагоревање је замењена са соларним параболичним концентратором. Параболични концентратор концентрише упадно сунчево зрачење на малу површину рисивера/апсорбера који је приказан као компонента В. Као радни флуид користи се ваздух: под притиском у компресору прва фаза је предгревање у рекуператору топлоте уласком ваздуха из турбине, а затим шаље у рисивер соларног концентратора. У рисиверу се налази запремински апсорбер са порозним медијумом који се загрева концентрисаним зрачењем које се фокусира на површину апсорбера и ту топлотну енергију предаје ваздуху као радном флуиду, који је на крају шаље турбини за производњу снаге. Соларни параболични концентратор постиже високе концентрационе односе, отуда рисивер-пријемник мора да издржи високе температуре у опсегу од 700-900°C.

Саша Р. Павловић и сарадници [30] развили су физички, математички и нумерички модел соларног параболичног концентратора састављеног од великог броја идентичних равних рефлектујућих сегмената квадратног облика. Сprovedено је моделирање геометријских и оптичких параметара применом Monte Carlo метода прорачуна хода зрака од извора зрачења до апсорбера параболичног концентратора. Развијен је математички модел соларног параболичног концентратора који генише топлотну снагу у фокусу од 19.6kW као и оптичку ефикасност 0.78.

Павловић С. и сарадници [31] радили су на развоју параболичног концентратора састављеног од трапезоидних криволинијских високо рефлективних сегмената. У овом истраживању описан је математички модел одређивања површине озрачености доњег дела апсорбера по фазама његовог формирања. На бази добро дефинисаног физичког и математичког модела направљен је нумерички модел. Решавање нумеричког модела је извршено применом Методе прорачуна хода зрака (Monte Carlo Ray tracing method). Оригиналност предложеног теоријског модела огледа се у могућностима његове примене у одређивању поменуте површине озрачености за различите, произвољне и коначне димензије пријемника и рефлектора, њихове међусобне положаје, произвољне углове нагиба, и оријентације соларног концентришућег пријемника, за било који дан и

време у току године односно привидни положај Сунца на небу. Као рисивер сунчевог зрачења изабрана су два типа: директно озрачен спирално наборан топлотни цевни апсорбер и рисивер са транспарентом (сафирским стаклом високог коефицијента трансмитивности).

Николић Н. и сарадници [32] су радили упоредну анализу класичног и двоструко - озраченог соларног пријемника. Извршено је упоређивање вредности њихових топлотних снага за 04. септембар 2012. године. Велики утицај на вредност топлотне снаге двоструко – озраченог соларног пријемника има вредност површине озрачености доњег дела његовог апсорбера. У периодима максимално остварене озрачености вредност средње процентуалне разлике између топлотних снага двоструко-озраченог и класичног соларног пријемника износила је 51,67%.

Павловић Т. и сарадници [33] приказали су прегледни рад који описује преглед соларних концентришућих система и њихову примену у соларним електранама у свету као и примену у Србији. Под соларним термоелектранама се подразумевају електране које под дејством концентрисаног сунчевог зрачења производе електричну енергију. Соларне термоелектране се састоје од концентратора сунчевог зрачења, парне турбине и генератора електричне енергије. Концентратори сунчевог зрачења могу бити цилиндрично-параболични, хелиостатски, параболично тањирасти и Френелови рефлектори. За континуиран рад соларне термоелектране у току ноћи и облачних дана користи се топлотна енергија из складишта топлоте или гас као додатни извор енергије. До сада је у свету инсталиран већи број соларних термоелектрана од којих је активно 19, а у изградњи је 27.

Павловић С. и сарадници [34] су радили на развоју концентришућег пријемника сунчевог зрачења, примена Monte Carlo методе прорачуна хода зрака за симулацију параметара соларног концентратора. Посебна пажња посвећена је развоју соларног система и топлотног апсорбера соларног концентратора. Извршена је анализа флукса концентрисаног зрачења на површини соларног апсорбера и дата оптимална вредност удаљености од темена параболичног концентратора. Оптичка анализа развијеног прототипа соларног концентратора даје јасну слику ефикасности и применљивости параболичних концентратора сунчеве енергије.



Станко Ковачевић, Самјуел Мравик и остали истраживачи [35] развили су и патентирали концентратор сунчевог зрачења који остварује одличне ефекте у комбинованој производњи електричне и топлотне енергије за грејање/хлађење са степеном ефикасности преко 80%, а само у производњи електричне енергије достиже 30% ефикасности. Најбољи ефекти патентираног концентратора сунчеве енергије постигао би се у комбинованом циклусу ТЕ-ТО и код система даљинског грејања/хлађења. Функционално посматрано, соларни концентратор врши аквизицију сунчеве енергије из инфрацрвеног спектра зрачења на бакарној кугли покривеној црним оксидом који добро апсорбује топлотну енергију. Висок степен ефикасности је постигнут на тај начин што је апсорбер сунчевог зрачења бакарна кугла која је озрачена концентрисаним зрачењем са свих страна. Наравно тај ефекат је постигнут на тај начин што је концентратор састављен од два рефлектора. Секундарни рефлектор је направљен у облику тракастих прстенова који формирају параболични облик (parabolic dish), док је примарни рефлектор такође направљен од тракастих рефлектујућих прстенова (ring array reflector). На тај начин директно сунчево зрачење које доспе на површину апертуре оба рефлектора бива рефлектовано и концентрисано на површину сферног апсорбера сунчевог зрачења.

Иако су у последње две деценије истраживачи уложили знатне напоре да израчунају, или бар процене, оптималне геометријске, оптичке и термичке параметере параболичних соларних концентратора, може се рећи да не постоји опште прихваћена методологија за одређивање и избор оптималних параметара соларних параболичних концентришућих система.

Kashika и сарадници [36] изабрали су параболични рефлектор коришћене сателитске антене, где су налепили алуминијумску фолију као рефлектујући слој. Сателитска параболична антена је пречника 2.405m. Систем је изабран са становишта лаке конструкције и јефтиног начина прављења соларног рефлектујућег концентратора. Средња температура воде које се добија у фокусу параболичног рефлектора је 300<sup>0</sup>С, када је апсорбер позициониран у жижи параболичног концентратора. Цена овог система је око US\$ 950.

Y Rafeeu и M. Z. Z. Ab Kadir [37] су представили једноставну вежбу у пројектовању, изградњи и испитивању (тестирању) лабораторијског модела соларног

параболичног концентратора. Представљена су два модела. Један је направљен од Акрил стирена (термопластични полимер који се лако термоформира) док је други од нерђајућег челика. Три експериментална модела соларних параболичних концентратора са различитим геометријским мерама и пречником 0.5m је анализирано како геометрија система утиче на оптичке и термичке перформансе у функцији инсолације (инцидентно зрачење). Поменути аутори су вршили анализу топлотне ефикасности соларног система у зависности од геометрије и величине концентратора. Три топлотна апсорбера концентрисаног зрачења су израђена од 85cm дужине бакарне цеви пречника 4mm. Бакарна цев је савијена у облику спирале и постављена у фокусној равни сваког понаособ параболичног концентратора. A.R.El. Ouederni, M. Ben Salah [38]. У овом истраживању аутори су пројектовали и направили соларни параболични концентришући систем пречника 1.6m примењен за загревање топле воде као и постизање производње водене паре. Концентратор је направљен коришћењем галванизованог челика где је његова унутрашња површина прекривена рефлексивним слојем са коефицијентом рефлексивности до 76% и спрегнутим топлотним рисивером постављеним у фокусу концентратора. Температура воде расте до 80<sup>0</sup>C, док је ефикасност система око 30% у току поднева када је сунце у зениту.

Zhiqiang Liu, Justin Lapp, Wojciech Lipinski [39]. представљају поступак за дизајнирање концентратора са равним сегментима (*Facet concentrator*) за лабораторијске услове испитивања и валидације нумеричких резултата. Систем припада групи средњетемпературним соларним термалним системима. Концентратор са равним фасетама/сегментима апроксимира параболичну/параболоидну површину са великим бројем равних сегмената квадратног облика постављених у параболични оквир са ивицама које су нормалне на осу концентратора. Концентришући параболоидни систем се састоји од 164 равна (планарна) високо спекуларно рефлектујућа сегмента који испоручује 8.15kW снаге на површини кружног апсорбера чији је пречник 150mm. Кружни апсорбер је постављен на оптималном растојању од темена параболоида (жична равна) са просечним вредностима концентрационог односа који достиже 100. За предикцију топлотног флуска зрачења у фокусној равни аутори су користили најчешће примењивану методологију хода (трага) зрака - Monte Carlo метод. На тај начин су уз помоћ нумеричких симулација добили жељене

карактеристичне величине флуksа зрачења у жижној равни (укупну снагу зрачења, просечну вредност специфичног флуksа зрачења као и фактор прихватања инцидентог зрачења). На основу извршене симулације они су анализирали оптичку ефикасност система.

Eswaramoorthy, M., Shanmugam, S [40]. У овом истраживању су представљена два прототипа соларних параболичних концентратора: *Shenandoah dish* и *JPL Parabolic Dish Concentrator*. Соларни концентратор је дизајниран са загревање силиконског уља у једном пролазу на  $400^{\circ}\text{C}$ . Први модел је са пречником рефлектора 7m, састављен од 21 сегмента који је са једне стране прекривен високо рефлектујућим филмом (фолијом). Други разматрани модел ових истраживања је JPL параболични концентратор пречника 12m који се састоји од 12 сегмента (латица) направљених од стакленог влакнастог материјала и балса дрвета у сендвич варијанти. На тај начин се добија чврста и композитна структура која може да балансира и прими јаке ударе ветра и да површину латица доведе у стање еластичних деформација. За овакав приступ направљен је мастер модел калуп где се вакуумским поступком добио крајње тачан параболичан облик. Ови истраживачи су применом нумеричких метода истраживали утицај струјања и брзине ветра на термичке параметре соларног система као и на топлотну ефикасност концентришућег пријемника.

A.R.El Ouederni, M. Ben Salah, F. Askri, F. Aloui и сарадници [41] правили су експерименталну студију соларног параболичног концентратора са становишта моделирања термичких карактеристика соларног рисивера. Експериментални систем се састоји од параболичног концентратора пречника апертуре 2.2m. Његова унутрашња површина је прекривена рефлектујућим слојем (фолијом), где је кружни рисивер постављен у фокусној равни. Вредност температуре у центру фокусне равни кружног рисивера (hot spot) достиже јако високе вредности - преко  $400^{\circ}\text{C}$ . Топлотна ефикасност соларног концентришућег система добијена експерименталним путем се креће у границама између 27-32%.

Rebecca Dunn, Keith Lovegrove, Greg Burgess, John Pye [42] истраживали су експерименталним путем соларни параболични концентратор површине  $9\text{m}^2$  са соларним рисивером који користи реакторске цеви смештене у конусном кавитету. Експеримент укључује разне варијетете геометријске конфигурације апсорберских

цеви у термохемијском реактору изграђеног од серије цеви постављених у унутрашњост кућишта конусног облика  $20\text{m}^2$  активне површине, соларни параболични концентратор је састављен од 2000 равних огледаластих сегмената поређаних у концентричне прстенове на параболоидној основи фиберглас носеће конструкције. Сваки сегмент огледала је у опсегу од 5cm - 10cm дужине странице квадрата. Поменути истраживачи су извршили оптичку анализу соларног концентратора са аспекта предикције апсорбованог флукса зрачења у фокусној равни. Применили су Monte Carlo метод хода зрака, где су у оквиру оптичког модела генерисали извор зрачења  $4 \times 10^6$  зрака. За валидацију нумеричког модела применили су нешто простији нумерички модел - СОБОЛ

Quianjun и сарадници [43] истраживали су фото - термалну конверзију у циљу побољшања исплативости посматраног соларног концентришућег система. Они су користили Monte Carlo метод хода зрака за прорачун дистрибуције флукса упадног зрачења на пријемнику као и ANSYS Fluent за срачунавање механизма радијационог и конвективног преноса топлоте. Њихови резултати су показали да је максимална енергетска ефикасност система око 52% када је интензитет директне компоненте сунчевог зрачења  $800\text{W}/\text{m}^2$ . Eswaramoorthy и Shanmugam [44] су испитивали топлотну ефикасност соларног шпорета (*solar cooker*) са параболичним рефлектором пречника 3.56m и укупне површине апертуре рефлектора  $10.53\text{m}^2$ , са коначном вредношћу топлотне ефикасности од 60%.

K.S. Reddy и остали [44] експерименталним путем су истраживали соларни параболични концентратор површине апертуре  $20\text{m}^2$  у циљу истраживања термичких карактеристика са посматраним модификованим пријемником са кавитетом. Просечна вредност укупног коефицијента топлотних губитака је око  $356\text{W}/\text{m}^2$ . K. Jones и Wang [45] су анализирали расподелу апсорбованог флукса зрачења цилиндричног рисивера концентрисаног зрачења параболичног концентратора користећи методу геометријске оптике. Параметри као што су грешка површине концентратора, грешка одступања (девијације) фокуса и дистрибуција упадног сунчевог зрачења са површине сунчевог диска (*sunshape*) били су разматрани применом метода геометријске оптике.

Thakkar и остали сарадници [46] су истраживали могућност коришћења параболичних концентришућих пријемника у процесној индустрији. Они су

представили математички модел за систем грејања соларним системом применом термичког уља. R. Blázquez и сарадници [47] описали су оптички тест за један прототип соларног параболичног концентратора под називом DS1 (parabolic Stirling dish), студија је изведена од стране института СТАЕР (Шпанија). Циљ овог веома скупог истраживања јесте да се окарактеришу оптички параметри, да се одреде вредности дистрибуције флукса зрачења применом фотограметријске методе и упореде са нумеричким моделима хода зрака.

Li Z и сарадници [48] представили су примену Монте Карло метод хода зрака за предикцију дистрибуције флукса зрачења за концентришући оптичко-термички систем концентратор - апсорбер. Профил зрачења који је добијен на бази оптичког моделирања и симулације је конвертован у анализу преноса топлоте (CFD код) као гранични услов у циљу симулирања струјања флуида као и симулације термичких параметара унутар домена топлотног апсорбера. Поред симулације струјних параметара, примењен је и метод коњугованог преноса топлоте у кавитету рисивера у спрези са радијационим преносом топлоте, природном конвекцијом и кондукцијом. Постоје процедуре које је потребно додатно програмирати (User Defined Function) у Фортрану или C++ да би се излазни профил флукса зрачења који се добија из оптичког домена конвертовао у термички CFD домен.

Saleh Ali и сарадници [49] представили су веома занимљиву студију која има за циљ развој тродимензионалног статичког (непокретног) соларног концентратора који се може користити у ниско буџетним технологијама са малим трошковима улагања и одржавања. Систем је развијан и пројектован за услове руралних области и сушних подручја Индије и Африке. Пре свега основна замисао концентратора у старту пројектовања је направити преносиви (*portable system - mobile system*) за припрему топле воде за домаћинства која немају могућност коришћења електричне енергије. Они су користили комерцијални софтвер OptisWorks (Ray tracing tool) за евалуацију оптичких перформанси 3Д елиптично - хиперболичног концентратора (ЕНС). Спроведена оптимизација у оквиру студије имала је за циљ сагледавање најбољег профила концентратора као и укупне геометрије система на укупну оптичку и топлотну ефикасност.

Sha Li, Guoqiang Xu и сарадници [50] истраживали су утицај геометријских параметера кавитета соларног пријемника и разумевање механизма оптичких перформанси. Ово укључује однос пречника (однос пречника апертуре према спољашњем пречнику апсорбера), однос висине (однос висине апсорбера према спољашњем пречнику апсорбера) и бочне апсорпције кавитета топлотног пријемника.

Разматрана анализа указује да оптичка ефикасност расте, а затим опада са повећањем односа висине, док криве оптичке ефикасности монотono опадају са односом пречника и жижне даљине. Истовремено, утицаји односа висине и односа пречника утичу на оптичку ефикасност и у функцији је од бочне апсорпције (апсорптивност зида апсорбера). На основу резултата аутори су пронашли корелацију која дефинише оптичку ефикасност која ће квантификовати утицаје свих наведених фактора.

Xian-long Meng, Xin-lin Xia и сарадници [51] развили су нови дизајн запреминског соларног ресивера са купастим порозним апсорбером од  $Al_2O_3$ . Извршили су нумеричку симулацију и експерименталну валидацију резултата. Пројектовани нови тип запреминског порозног апсорбера нуди низ предности у односу на досадашње моделе. Пре свега, генерише мање топлотне губитке као и већу униформност топлотног флуksа. Унутрашња размена топлоте зрачењем је решена уз помоћ (UDF- User Defined Function). Карактеристике преноса топлоте упоређене су на основу различитих параметара укључујући рефлективност прозирног транспарентног стакла, порозности и масеног протока. Експериментална верификација нумеричког модела (резултата нумеричке симулације) је спроведена на соларном параболичном концентратору састављеном од 16 индивидуалних рефлексионих сегмената.

Manav Sharma, Jaykumar Vaghani и сарадници [52] направили су параболични соларни концентратор са сталним фокусом са степеном концентрације у опсегу од 20 - 200. Приказани соларни концентратор је пречника 1.4m направљен од галванизованог челика где је његова унутрашња површина прекривена рефлективном Алу фолијом коефицијента рефлективности 92.5%. Систем је повезан са бакарним цевним апсорбером који је савијен у облику хеликоиде. Пречник ресивера је 10mm, а дебљина зида цеви 1mm. Истраживање је фокусирано на варијацијама температура у хеликоидном апсорберу са променом геометрије. У једном случају соларни апсорбер је

са кораком између цеви и обојен у црном, док у другом случају је без корака и без црног пигмента. Применом температурног сензора К-типа вршено је мерење температуре на улазу и излазу хеликоидног апсорбера.

Munir [53] представља експериментално истраживање трансформације соларне енергије у топлотну коришћењем параболичног соларног концентратора са системом за континуално праћење трајекторије Сунца у току дана. Експериментално испитивање је вршено на концентратору пречника 1m са бакарним апсорбером пречника апертуре 10cm и дужине 20cm. Соларни топлотни апсорбер је постављен у жижној равни параболичног рефлектора. Овај модел соларног параболичног концентратора продукује значајно високе температуре у жижној равни у границама између 200<sup>0</sup>C и 350<sup>0</sup>C.

Reinalter и сарадници [54] истраживали су термичке и геометријске особине 10 киловатног рисивера (10kW) CNRS-PROMES (параболични рефлектор је пречника 3.8m, жижне даљине 4.5m). Процес валидације термичког модела соларног апсорбера упоређен је са експерименталним резултатима. Munir и сарадници [8] су дали принцип пројектовања и прорачуна Scheffler концентратора са сталним фокусом површине апертуре 8m<sup>2</sup> са применом у средњетемпературним соларним термотехничким системима. Аутори су математички доказали да је могуће конструисати концентратор који пружа стални фокус за сваки дан у току године. Rapp and Schwartz [55] конструисали и успешно тестирали 2m<sup>2</sup> параболични концентратор (Scheffler Concentrator) за концентрисање сунчеве енергије у стационарни рисивер. Они су описали кроз своје истраживање неколико идеја око моделирања геометријског модела Scheffler рефлектора. Параболични Scheffler рефлектори могу обезбедити топлоту високе температуре за све типове кувања, припреме хране, печења, сушења, производње водене паре за многе индустријске процесе. Macosko и сарадници [56] описали су у свом истраживању соларни концентришући систем који обезбеђује производњу топлотне и електричне енергије за продукцију водоника у реактору моделираног од стране свемирске агенције (NASA Roxugen) прва генерација реактора ове врсте system. Концепт је конструисан на основу (*offset*) параболичног концентратора за прикупљање сунчеве енергије и фокусирање директно у Roxugen reactor. Offset параболични концентратор се може ротирати и на тај начин пратити трајекторију сунца. Систем за позиционирање концентратора са двоосним праћењем



путање сунца одржава површину апертуре концентратора управном у односу на правац вектора сунчевог зрачења које пада на рефлексиону површину пријемника. Patil и сарадници [57] истраживали су конвективне топлотне губитке који се неминовно јављају у високотемпературним рисиверима соларних концентратора. Они су експерименталним путем испитивали топлотне губитке природне конвекције полусферног рисивера са кавитетом пречника 540mm. Циљ овог пројекта је био развој методологије/процедуре за идентификацију укупних топлотних губитака и конвективних топлотних губитака које се јављају у апсорберима концентратора сунчевог зрачења. Cabanillas и Корр [58] су развили соларни параболични концентратор пречника 2.44m и жижне даљине 0.92m. Они су проучавали соларни спирални размењивач топлоте од нерђајућег челика у циљу мерења ефикасности и нето добијене количине топлотне енергије од концентришућег соларног система.



## Глава 3

### **3. ПОДЕЛА ПРИЈЕМНИКА СУНЧЕВОГ ЗРАЧЕЊА ПРЕМА ГЕОМЕТРИЈИ И КАРАКТЕРИСТИКАМА**

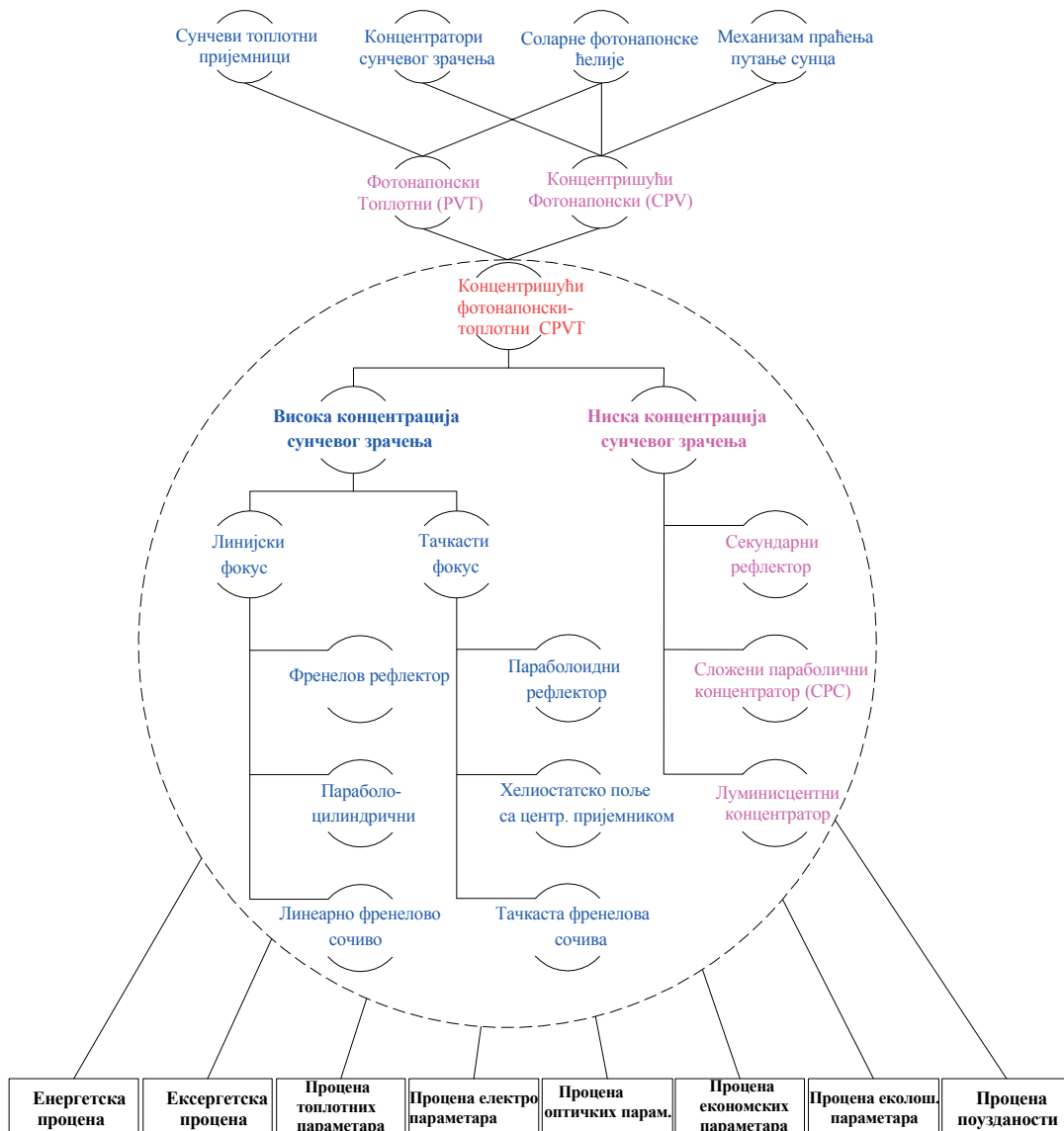
Објекти изложени дејству Сунца који примају део дозрачене енергије називају се пријемницима сунчевог зрачења. У зависности од карактера трансформације енергије сунчевог зрачења у њима, односно њеног излазног облика, разликују се следеће врсте пријемника:

- Топлотни пријемници, код којих се енергија сунчевог зрачења трансформише у топлоту. Код њих се кинетичка енергија фотона светлости трансформише у топлотну енергију апсорбера.
- Фотонапонски пријемници, код којих се сунчева енергија директно трансформише у електричну енергију у соларним ћелијама.
- Хемијски (биохемијски) пријемници, код којих се енергија сунчевог зрачења трансформише у хемијски енергетски потенцијал.

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 струји кроз колектор/пријемник. Овако трансформисана енергија може да се користи директно преко транспортног флуида или да се ускладишти, па да се користи касније.

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



Слика 3.1. Подела соларних концентришућих пријемника

Подела пријемника соларне енергије може се, пре свега, извршити према начину трансформације исте, на: соларне колекторе, хибридне соларне колекторе и

фотонапонске ћелије (фотонапонске панеле). 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 радне 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 (пријемник сунчевог зрачења) помоћу конкавне рефлектујуће површине пресеће 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.

### 3.1. Топлотни пријемници сунчевог зрачења

Пријемници код којих се енергија сунчевог зрачења директно трансформише у топлоту су данас технички, технолошки и економски најједноставнији и најприменљивији за широку употребу. Главна компонента неког соларног система је соларни колектор/пријемник. То је уређај који апсорбује соларно зрачење, конвертује га у топлоту, и ту топлоту предаје флуиду (обично ваздух, вода или уље) који струји кроз колектор.

Постоје два основна типа пријемника сунчевог зрачења : неконцентришући или статични и концентришући. Неконцентришући пријемници сунчевог зрачења имају исту површину за захват и за апсорбовање сунчевог зрачења. Концентришући пријемници сунчевог зрачења обично имају конкавну (издубљену) рефлексиону површину за прикупљање и фокусирање сунчевог зрачења са веће површине на малу пријемну површину, повећавајући тако флукс (густину) зрачења на пријемној површини апсорбера. Колектори соларне енергије се углавном разликују по њиховом кретању, тако да могу бити статични, са једноосним праћењем и двоосним праћењем Сунца, и према њиховој радној температури. Списак је приказан у табели 3.1

У зависности од температурског нивоа радног медијума који се у њима може достићи, пријемници сунчевог зрачења се деле на:

- нискотемпературне (радне температуре до  $100^{\circ}\text{C}$ ),
- средњетемпературне ( $100$  до  $400^{\circ}\text{C}$ ),
- високотемпературне (преко  $400^{\circ}\text{C}$ ).

У групу нискотемпературних пријемника спадају сви пријемници код којих се температура радног медијума креће најчешће до 100°C.

Код средњетемпературних и високотемпературних пријемника се сунчеви зраци, захваћени са веће површине, фокусирају (концентришу) на неку мању површину, при чему се, у зависности од конструкције, остварују високе радне температуре – и до неколико хиљада степени Целзијуса.

**Табела 3.1.** Пријемници сунчевог зрачења[59]

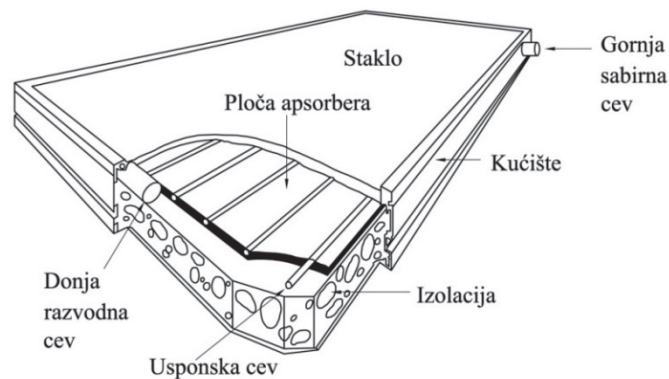
Кретање	Тип колектора	Облик апсорбера	Концентрациони однос	Индикативни температурни опсег (°C)
Статични	Равни колектор (FPC)	Раван	1	30-80
	Вакумски цевни колектор (ETC)	Раван	1	50-200
	Сложени параболични колектор (CPC)	Цев	1-5	60-200
5-15			80-300	
Једноосно праћење	Линеарни Френелов колектор (LFR)	Цев	10-40	80-250
	Параболоцилиндрични колектор (PTC)	Цев	15-45	80-300
	Цилиндрични колектор (СТС)	Цев	10-50	80-300
Дво-осно праћење	Параболични концентратор (PDR)	Тачка	100-1000	100-500
	Хелиостатско поље колектора (HCF)	Тачка	100-1500	150-2000

Према радном медијуму којим се топлота са пријемника одводи према потрошачу, ови пријемници се деле на:

- пријемнике са течним расхладним средством и
- пријемнике са ваздухом као расхладним средством.

### 3.1.1. Равни (нискотемпературни) пријемници сунчевог зрачења (FPC)

Просечна конструкција равног соларног колектора састављена је из кућишта, апсорбера, изолације, транспарента и елемената за везу и заптивање (слика 3.2). Када сунчеви зраци пролазе кроз транспарентни покривач и падају у правцу нормале на зацрњену површину апсорбера од материјала добрих апсорпционих особина, апсорбер се загрева тако да може постићи температуру до  $100^{\circ}\text{C}$ . На апсорберу се врши топлотна конверзија сунчевог зрачења. Абсорбована топлота се са апсорбера одводи до потрошача помоћу радног флуида (течности или ваздуха). Доња страна плоче апсорбера и бочне стране кућишта су добро изоловане да би се смањили кондуктивни губици. Цеви за течност могу бити заварене за плочу апсорбера или могу бити интегрални део плоче апсорбера.

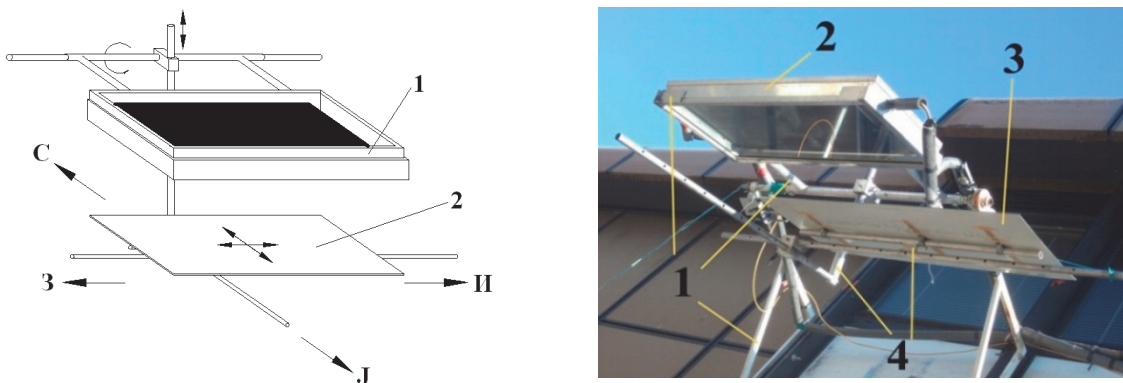


Слика 3.2. Детаљ равног (плочастог) пријемника топлоте [59]

Овако загрејана плоча апсорбера сунчевим зрацима таласних дужина  $0,3 - 3\mu\text{m}$ , зрачи топлотне инфрацрвене зраке већих таласних дужина  $3 - 7\mu\text{m}$  и тиме губи већи део апсорбоване енергије. У циљу коришћења добијене топлотне енергије, потребно је да се спречи овај губитак. То се може постићи покривањем апсорбера покривачем од материјала који добро пропушта сунчеве зраке кратке таласне дужине, односно видљиву светлост, а спречава пролаз невидљивог инфрацрвеног зрачења таласних дужина изнад  $3\mu\text{m}$  које зрачи апсорбер.

Ове услове испуњава у првом реду стакло, а затим и неки специјални пластични материјали. Стаклена плоча дебљине  $3\text{mm}$  има изврстан коефицијент трансмисије јер пропушта око  $90\%$  краткоталасног зрачења. Међутим, за дуготаласно инфрацрвено подручје изнад  $3\mu\text{m}$ , она је непропустљива па се каже да је на тај начин образована “замка” за инфрацрвено зрачење.

Постоји велики број различитих модела равних (плочастих) пријемника сунчевог зрачења. Подела је извршена према радном медијуму, према геометрији топлотног апсорбера, према материјалу апсорбера, према типу застакљења, затим постоје равни пријемници са додатним "booster" рефлекторима чиме значајно утичу на повећање топлотне ефикасности пријемника. Спроведена су многа научна истраживања везана за соларне пријемнике са рефлектујућом површином. Истраживања се пре свега разликују по томе да ли је рефлектујућа површина равна, цилиндрична или сферична. На тему рефлектора, чија површина није равна, постоје научни радови [60, 61]. У [61] анализиран је соларни пријемник, интегрисан са два стационарна цилиндрична концентратора (рефлектора), чија је ефикасност у поређењу са класичним пријемницима далеко већа при условима соларног зрачења малог интензитета. Сличан модел пријемника али са стационарним параболичним концентраторима експериментално је испитиван у [30]. Примењеним соларним системом грејања могуће је редуковати 30-70% топлотних губитака у поређењу са класичним соларним пријемником. Један од ефикаснијих модела равних соларних пријемника је тзв. двоструко-озрачен соларни пријемник са равним рефлектором [62].



**Слика 3.3.** Шема двоструко-озраченог соларног пријемника са равним рефлектором:  
1 - ДОП и 2 - рефлектор [62]

Предложени пријемно-рефлектујући систем је, у односу на претходне и горе поменуте системе, различит из неколико разлога. Први разлог је тај што је рефлектор постављен паралелно испод пријемника. На тај начин, омогућено је да упадни угао соларног зрака, који пада на горњу површину апсорбера, буде идентичан упадном углу соларног зрака који након рефлексије од рефлектора пада на доњу површину апсорбера (слика 3.3).

Други разлог се односи на то да је код овог система као рефлектујућа површина употребљено плексиглас огледало. Код огледала, површина рефлексије је спекуларна, односно упадни и одбојни углови соларног зрака су исти. Огледало има и високу вредност коефицијента рефлексије. Јединственост овог система је и у томе што је рефлектор покретан у сва три могућа ортогонална правца, правцу север-југ, правцу исток-запад и правцу нормалном на његову површину (слика 3.3).

### 3.1.2. Пријемници са концентрисањем сунчевог зрачења

Температура предате топлотне енергије може бити повећана смањењем површине на којој се јављају топлотни губици. Температуре далеко више од истих постигнутих са равним соларним колекторима, могу се добити ако је релативно велики износ соларног зрачења сконцентрисан на релативно малу површину апсорбовања. Ово је урађено уметањем оптичког уређаја између извора зрачења и површине која апсорбује енергију.

Пријемници са концентрисањем сунчевих зрака, у зависности од начина концентрисања сунчевих зрака, деле се на:

- пропусне (сабирна оптичка сочива), и
- рефлективне пријемнике (огледала).

Према могућности кретања ("праћења" Сунца) системи за концентрисање деле се на:

- статичне, и
- покретне (хелиостатске).

Код статичних система непокретни су и концентратор и апсорбер, због чега се током дана мења упадни угао сунчевих зрака на пријемни систем.

Покретни системи за концентрисање сунчевих зрака се деле на:

- системе код којих је апсорбер покретан, а концентратор непокретан,
- системе код којих се концентратор и апсорбер окрећу ка Сунцу "праћећи" његово "кретање" по небу,

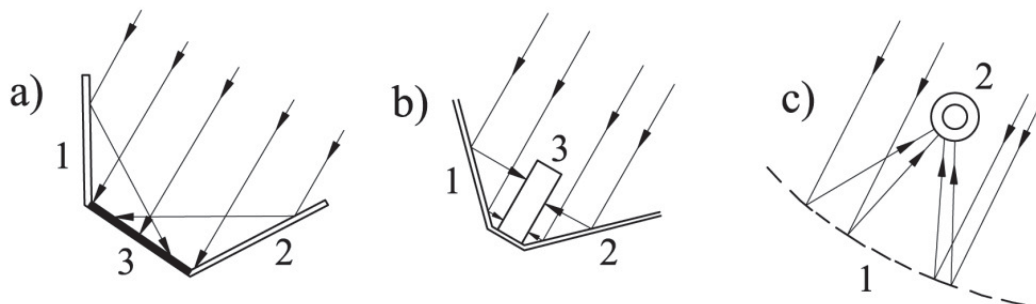
- системе код којих је концентратор покретан, а пријемник-апсорбер непокретан.

Пропусни (рефракторни) концентратори представљају пријемнике кроз које пролазе сунчеви зраци мењајући правац кретања у правцу једне тачке или линије (жичне тачке или жичне линије) – фокуса.

Рефлективни концентратори (огледала) представљају пријемнике сунчевог зрачења код којих се сунчеви зраци рефлектују са њихове површине и усмеравају у правцу жиже. Концентришуће површине пријемника сунчевог зрачења се могу генерално поделити, у зависности од закривљености рефлективне површине, на:

- равне и
- криве.

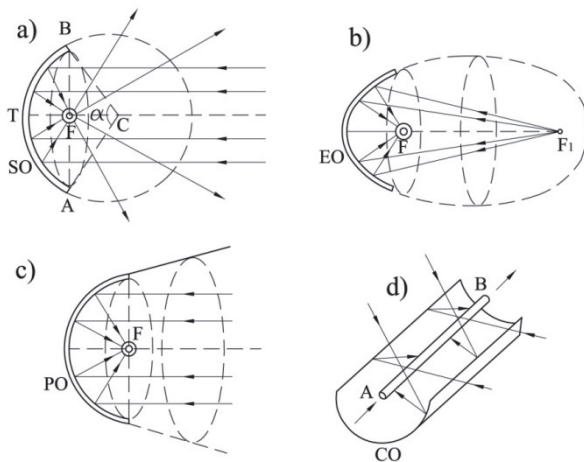
Концентратори са равним огледалима имају више равних огледала са којих се могу концентрисати сунчеви зраци на један пријемник сунчевог зрачења и тако добити топлотна енергија високе температуре (слика 3.4).



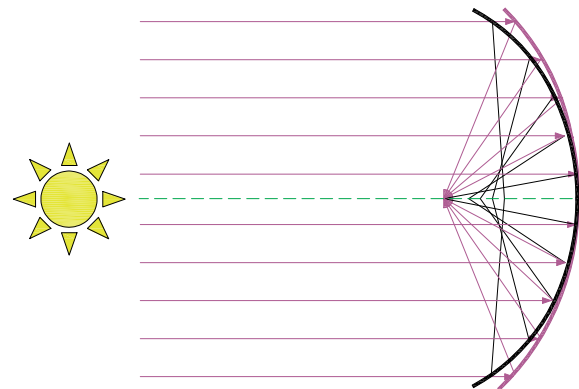
**Слика 3.4.** Концентратори са равним огледалима

- а) систем равних огледала (1) и (2) концентрише сунчеве зраке на тамну плочу (3) и загрева је до високе температуре; б) систем огледала (1) и (2) концентрише сунчеве зраке на цилиндричну површину (3) и загрева ову површину и њену унутрашњост до високе температуре; ц) више – или полиплочасти (Френелов) систем огледала (1) концентрише сунчеве зраке на цев (2).





**Слика 3.5.** Огледала са закривљеним површинама



**Слика 3.6.** Приказ сферног и параболичног соларног концентратора

а) сферно огледало или конкавно огледало  $CO$  је део површине сфере чија унутрашња страна одбија сунчеве зраке. Дуж  $CT$  између центра кривине огледала  $C$  и његовог темена  $T$  је полупречник кривине огледала. На средини између центра кривине и темена огледала налази се жижа или фокус  $F$ . Права  $TFC$  је главна оптичка оса огледала. Сунчеви зраци, који падају на огледало паралелно главној оптичкој оси секу се у жижи. Због велике даљине, сунчеви зраци падају приближно паралелно на ово огледало и концентришу се у жижи где се генерише топлота високе температуре која се може практично користити;

б) елиптично или елипсоидно огледало  $EO$  је део површине елипсоида чија унутрашња страна одбија сунчеве зраке. Сунчеви зраци који долазе из једне жиже  $F_1$ , после одбијања од огледала пролазе кроз другу жижу  $F$ ;

ц) параболично огледало  $PO$  је део површине параболоида чија унутрашња страна одбија сунчеве зраке. Када сунчеви зраци падну на ово огледало, после одбијања концентришу се у жижи  $F$  и дају топлоту високе температуре која се може практично користити.

д) параболоцилиндрично огледало је полуцилиндрична површина параболичног пресека чија унутрашња страна рефлектује сунчеве зраке. Паралелни сунчеви зраци се после одбијања концентришу дуж осе  $AB$ , тако да ово огледало уместо тачкасте има праволинијску жижу у којој се генерише топлота високе температуре која се може искористити постављањем цеви дуж осе огледала.

Величина образованог лика у жижи, код равних огледала, одређена је величином саме рефлектујуће површине – све док се она не смањи преко границе дејства сунчеве угловне величине од  $0.5^\circ$ . Даље смањивање јединичне површине огледала неће узроковати и смањивање лика Сунца. Преимућство параболичних огледала у односу на сферна огледала, је у томе што имају мању сферну аберацију. Код сферних огледала, паралелни сунчеви зраци се не секу сви у жижи па се уместо тачке појављује мали лик кружног облика. Ова оптичка појава назива се сферна аберација и она је елиминисана код параболичних огледала.

**Табела 3.2.** Максималне температуре код различитих конструкција концентришућих пријемника сунчевог зрачења [59]

<b>Концентришући пријемници сунчевог зрачења</b>		
Тип пријемника	CR	$T_{\max}$ [°C]
<b>Фокусирајућа површина добијена транслацијом криве</b>		
• Френелов линијски концентратор	6 do 30	100 do 200
• Параболоцилиндрични концентратор	15 do 50	200 do 300
• Френелово линијско огледало		300
• Концентратори са непокретним рефлектором и покретним апсорбером	20 do 50	концентратори са вакуумом и спектрално селективним апсорбером до $400^\circ$
<b>Фокусирајућа површина добијена ротацијом криве</b>		
• Непокретан рефлектор, покретан апсорбер	50 do 150	300 do 500
• Френелово сочиво	100 do 1000	300 do 1000
• <b>Параболични концентратори</b>	500 do 3000	500 do 2000
• Хелиостатски систем (соларно поље)	1000 do 3000	500 do 2000 (3000)

Рефлексионе карактеристике за неке материјале који се користе за израду огледала код фокусирајућих система дате су у табели 3.3.

**Табела 3.3.** Коefицијент рефлективности материјала за израду соларних рефлектора [59]

Материјал соларних рефлектора	Коefицијент рефлективности (%)
Сребро	94±2
Злато	76±3
Алуминизиран акрил	86
Анодно оксидован алуминијум	82±5
Различите алуминијумске површине	82-92
Бакар	75
<b>Стакло са слојем сребра</b>	<b>88</b>

### 3.1.3. Средњетемпературни концентришући пријемници сунчевог зрачења

Концентратори сунчеве енергије који се користе у средњетемпературној конверзији сунчеве енергије (100-400°C) не захтевају оштар фокус ни прецизно праћење привидне путање Сунца. Могу бити стационарни или са повременим покретањем колектора или апсорбера. Уређај који повећава густину енергије сунчевог зрачења (соларни флуks) у (на) апсорберу пријемника изнад околног нивоа назива се концентратор. Као чест назив за концентратор соларне енергије (зрачења) користи се и ”фокусирајући ПСЕ”. Једна од најважнијих карактеристика фокусирајућих система је концентрациони однос (фактор концентрације CR), који представља однос ефективне површине апертуре концентратора и површине апсорбера. Ефекат концентрације усавршен је коришћењем рефлектујућих и рефрактујућих елемената, који су постављени тако да је соларни флуks фокусиран у пријемну компоненту и то, условно, на тачку или линију. Отуда и називи: тачкасти и линијски концентратори сунчеве енергије/зрачења.

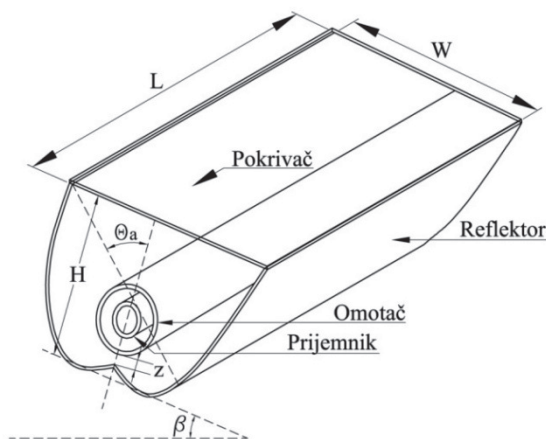
Могућа употреба ових концентратора је врло широка: за грејање санитарне и технолошке воде и просторија, за металуршке и индустријске потребе итд. У уређаје за средњетемпературну конверзију, са повременим или континуалним покретањем убрајамо:

- Параболично-цилиндрични концентратор (Parabolic Trough Concetrator)– РТС,
- Цевни вакуумски колектор (Evacuated Tubular Collector),
- Винстонов параболични концентратор (Compound Parabolic Concetrator) – СРС,
- Френелов колектор са огледалима или сочивима (Fresnel Mirror or Lens Collector),
- спирално фокусирајући колектор,
- трапезоидно фокусирајући колектор,
- разне типови соларних пећница итд.

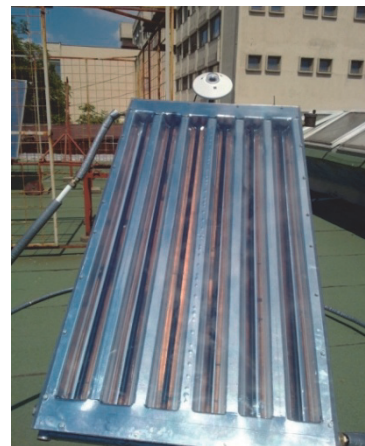
Температурни опсег примене ових типова соларних пријемника је између 150 - 300<sup>0</sup>С

### 3.1.3.1. Сложени параболични концентришући пријемник сунчевог зрачења

Сложени параболични колектори имају способност рефлектовања ка апсорберу целокупног упадног сунчевог зрачења, унутар широких граница. Потреба покретања концентратора због промене оријентације Сунца може бити смањена коришћењем "корита" са два профила параболе које гледају једна према другој (слика 3.7). Сложени параболични концентратори могу прихватити упадно зрачење у релативно широком опсегу угла. Коришћењем вишеструких унутрашњих рефлексија, зрачење које улази кроз апертуру, у границама прихватног угла колектора, проналази пут до површине апсорбера смештеног на дну колектора.



Слика 3.7. Шематски приказ Р2СС пријемника

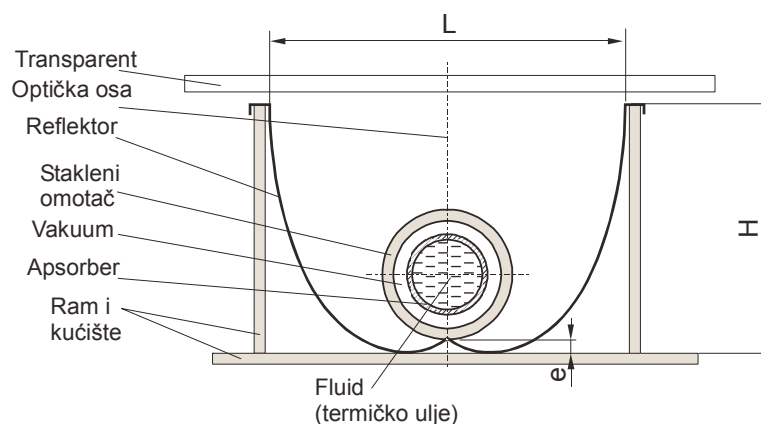


Слика 3.8. Прототип Р2СС пријемника [63]

На Машинском факултету у Нишу, на катедри за термотехнику развијен је један потпуно нови концепт Р2СС пријемника [63]. Прототипски концепт соларног пријемника (Р2СС) за област средње температурне конверзије сунчевог зрачења који има високи учинак, ниску цену, могућност производње у малим и средњим предузећима, широку дистрибуцију, са јасном тежњом да се његовом применом у великом делу године или целогодишње остваре значајне уштеде електричне енергије која се сада користи за припрему топле потрошне воде и у системима централног и даљинског грејања. Основне карактеристике, уједно и предности пријемника Р2СС у односу на, по намени сличне уређаје проистичу из остваривања следећих захтева:

- максимална искоришћеност директног сунчевог зрачења у XII месецу - чиме је одређен угао прихвата  $2\Theta_{\max}=110^\circ$ , а на основу средњег дневног положаја Сунца (излазак у  $7^{50}h$ , азимут  $125^\circ$ ; залазак у  $16^{10}h$ , азимут  $235^\circ$ ; дужина обданице  $8h\ 20'$ , при вертикалном положају цеви апсорбера под углом од  $45^\circ$ ;
- оптимални прихват дифузног зрачења током целе године (веома битно за зимски период)
- максимално умањење топлотних губитака - омогућено избором адекватног селективног апсорбера ( $\alpha_a/\epsilon_a > 4.5$ ) и вакуумираног стакленог омотача чиме су кондуктивни и конвективни губици са површине цеви апсорбера елиминисани;
- компактност и заштита конструктивних елемената колектора од спољних утицаја - избор транспарента, конструкција носећег рама и кућишта, умањење цена и масе уређаја кроз избор одговарајућих материјала и поједностављењем конструкције уређаја.

Схематски приказ попречног пресека једног модула Р2СС дат је на слици 3.9.

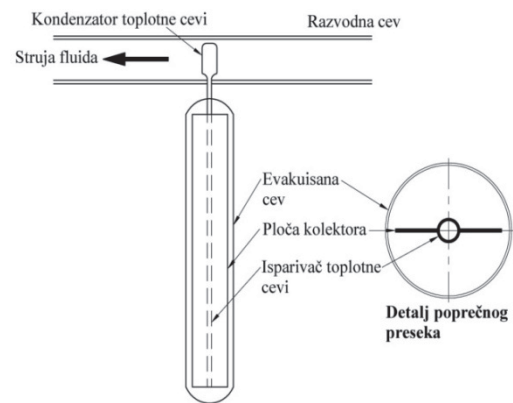


Слика 3.9. Попречни пресек једног модула Р2СС колектора [63]

### 3.1.3.2. Вакуумски цевни пријемник сунчевог зрачења

Вакуумски цевни колектори се састоје од топлотне цеви која се налази унутар вакуумско-заптивене цеви (слика 3.10). Вакуумски цевни колектори показују да комбинација селективне површине и ефективног пригушивача конвекције може довести до добрих перформанси при високим температурама. Вакуумски омотач смањује конвективне и кондуктивне губитке, дакле ови колектори могу радити при температурама  $\sim 150^{\circ}\text{C}$ .

Вакуумски цевни колектори користе парно-течне фазно променљиве материје за пренос топлоте уз високу ефикасност. Ове колекторе карактерише топлотна цев (високо ефикасни топлотни проводник), који је смештен унутар вакуумско-заптивене цеви. За заптивену бакарну цев је причвршћено црно бакарно ребро (плоча апсорбера), које испуњава вакуумску цев. На врху цеви је испупчена метална глава, која је причвршћена на заптивену цев (кондензатор). Топлотна цев садржи малу количину флуида (на пример метанол) који пролази кроз циклус испаравање – кондензовање. У овом циклусу, топлота конвертована од сунчевог зрачења испарава течност, и пара путује у потопљено подручје где се кондензује и ослобађа се њена латентна топлота. Кондензовани флуид се враћа назад у соларни колектор и циклус се понавља.



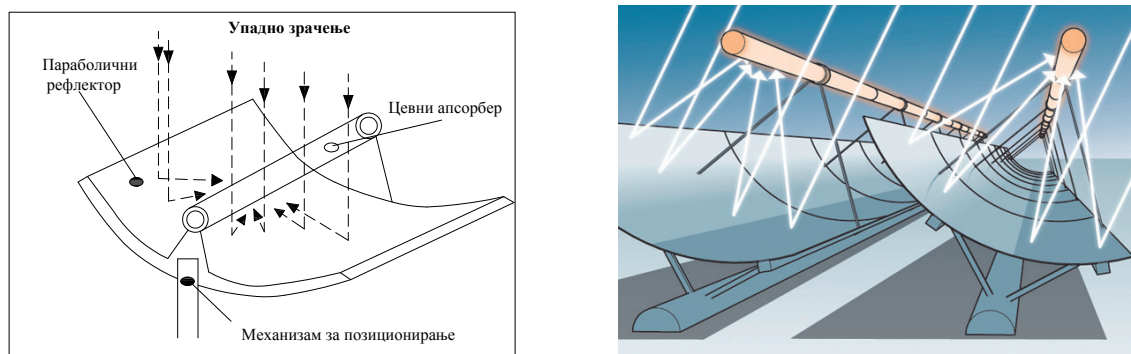
Слика 3.10. Шематски приказ вакуумског цевног колектора [64]

### 3.1.3.3. Параболоцилиндрични концентришући пријемник сунчевог зрачења

Параболоцилиндрични колектори се састоје од параболочно-цилиндричног рефлектора, у чијој жижи се налази пријемник-апсорбер. Пријемник је метална цев постављена дуж жижне линије пријемника (слика 3.11). Површина пријемника је обојена селективном бојом која има високи коефицијент апсорпције сунчевог зрачења

али низак коефицијент емисије. Кроз цев пријемника протиче флуид. Величина цеви и концентрациони однос су одређени величином рефлектоване слике Сунца и производним толеранцијама корита. Око пријемника је обично постављена стаклена цев, да би смањила конвективне губитке од пријемника. Постоји велики број различитих геометријских конфигурација овог типа соларног концентришућег пријемника. Пре свега се разликују по начину топлотног апсорбера. Соларни рефлектор је исти код свих концепата, док су апсорбери различитих облика, конструкција, са једноструким и двоструким омотачем, са секундарним оптичким елементима за повећање флукса зрачења итд.

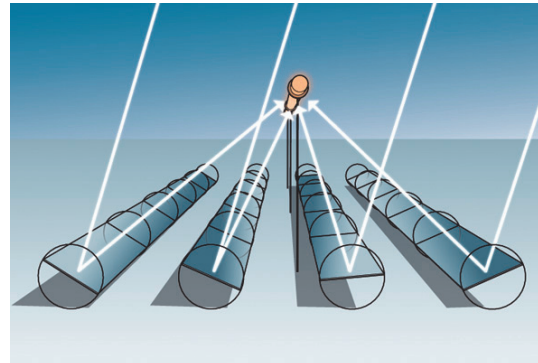
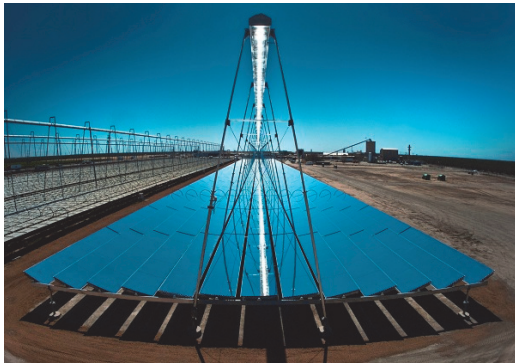
За време док је РТС (Parabolic Trough Collector) колектор усмерен ка Сунцу, паралелни сунчеви зраци се после одбијања од рефлектора концентришу на цев пријемника. За то је довољно да се употреби једноосно праћење Сунца. Један од начина праћења Сунца је да колектор буде оријентисан у правцу исток-запад, са хоризонталном осом закретања, пратећи тако дневну промену висине Сунца. Други начин је да колектор буде са осом закретања под пријемним нагибом, пратећи тако дневну путању Сунца од истока ка западу при средњој висини Сунца.



Слика 3.11. Шематски приказ параболоцилиндричног пријемника сунчевог зрачења

#### 3.1.3.4. Линеарни Френелов рефлектор са апсорбером

Технологија линеарних Френелових рефлектора (LFR) се ослања на линеарни низ тракастих огледала, која концентришу сунчеве зраке на непокретан пријемник постављен на линеарном торњу. На тај начин апсорбер може бити великих димензија и може бити непокретан. Приказ LFR колекторског поља је приказан на слици 3.12. Велика предност линеарног Френеловог рефлектора је да се користе равна огледала која су јефтинија у поређењу са параболоцилиндричним огледалима.



Слика 3.12. Линеарно Фреснелово колекторско поље [65]

### 3.1.4. Високотемпературни концентришући пријемници сунчевог зрачења

У ову групу концентратора спадају:

- Параболични концентратор (PDR),
- Хелиостатско поље колектора (HFC) или централни пријемни систем са торњем

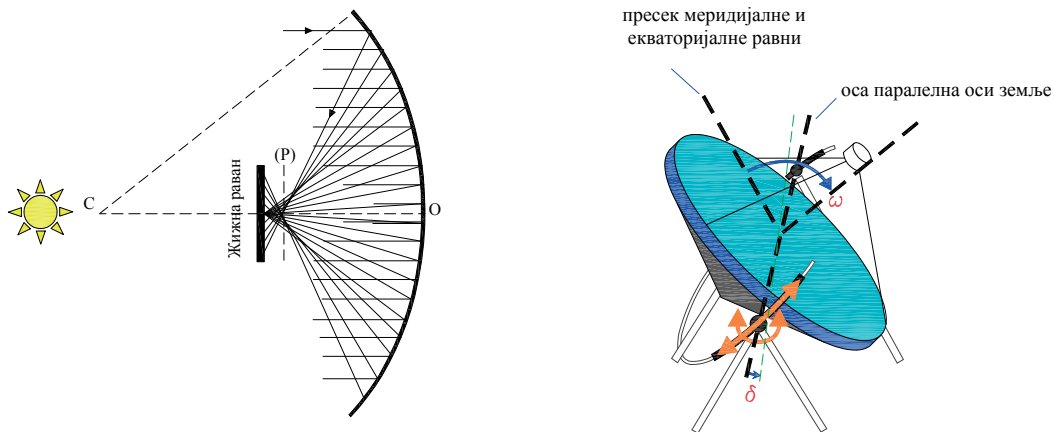
#### 3.1.4.1. Параболични концентратори сунчевог зрачења

Параболични тањирасти рефлектор (параболоидни концентратор), приказан на слици 3.13, је тачкасто фокусирајући концентратор у облику параболоида, који има двоосно праћење Сунца. Овај концентришући пријемник сунчевог зрачења мора потпуно да прати путању Сунца, како би се обезбедило да рефлектовани сунчеви зраци падају на апсорбер лоциран у жижи концентратора. Помоћу овог концентратора врши се захват директног сунчевог зрачења. Параболоидни/параболични (Parabolic Dish) концентратори могу постићи температуре од  $1500^{\circ}\text{C}$ .

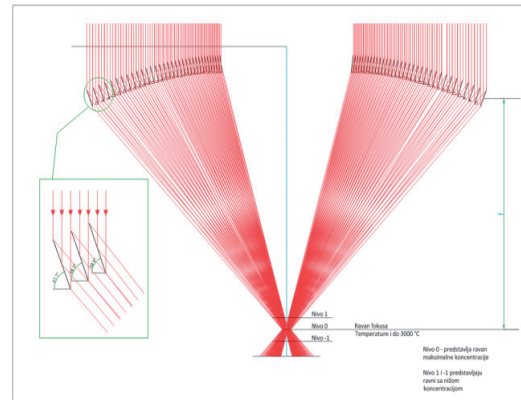
Постоји велики број различитих параболичних/параболоидних концентратора сунчевог зрачења што је приказано у поглављу 2. Две основне варијанте соларних параболоидних концентратора сунчевог зрачења се односе на начин концентрисања сунчевог зрачења: концентрисање сунчевог зрачења рефлектовањем снопа светлости ка небу (слика 3.13) и концентратори који концентришу снап сунчевог зрачења са супротне стране састављени од коничних огледала (Ring array solar dish, слика 3.14). Предност првог концепта у односу на други је пре свега у начину одржавања рефлектујућег дела концентратора, лакше се чисти и скида склоп огледаластих сегмената, док је код другог решења знатно теже извршити чишћење и демонирање



огледаластих површина. С друге стране друго решење је оптималније са становишта стабилности услед утицаја ветра и оптерећења које генерише сила притиска ветра (апсорбер - фокус концентратора окренут ка земљи) тако да се јављају знатно мање силе притиска ветра на површину апертуре концентратора.



Слика 3.13. Шематски приказ параболоидног концентратора

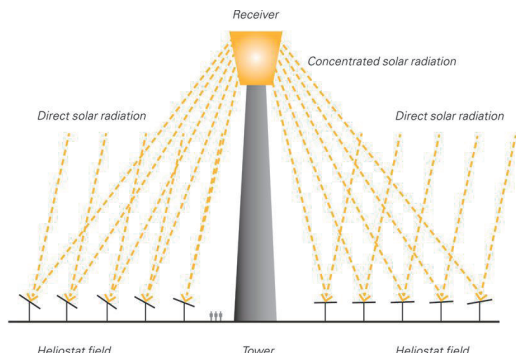


Слика 3.14. Соларни концентратор са фокусом на доле (Ring array solar parabolic concentrator) [66]

С друге стране, систем са фокусом окренутим на доле захтева такође систем праћења сунца за позиционирање у две осе (праћење по азимуту и елевацији). Овакви системи поседују кружну зупчасту пругу по којој систем ротира и прати положај сунца по азимуту док систем елевације је решен применом линеарних актуатора погоњених завојним вретеном и степ моторима мале снаге и великим преносним односом.

### 3.1.4.2. Хелиостатско поље концентришућих пријемника сунчевог зрачења

Код хелиостатског поља колектора (НСФ), концентратор је састављен од међусобно одвојених јединица равних огледала покретаних око две осе, која су лоцирана на посебним носачима на земљишту и која рефлектују сунчеве зраке ка жижи-пријемнику. На слици 3.15 је приказано хелиостатско поље колектора или централни пријемни систем. Хелиостатско поље колектора има примену у производњи електричне енергије. Сунчеви зраци се одбијају од великог броја огледала и усмеравају се ка жижи у којој је смештен пријемник где се услед високих температура генерише прегрејана пара под притиском, која даље експандира у турбини. Генератор електричне енергије, погоњен парном турбином, трансформише механички рад у електричну енергију. Огледала су код овог система покретна на свом носачу, тако да могу пратити “кретање” Сунца током дана и године, увек усмеравајући рефлектоване зраке ка апсорберу. Свака покретна јединица огледала засебно прати Сунце и усмерава рефлектоване сунчеве зраке на непокретну жижу – пошто је положај сваког покретног огледала у систему различит у односу на друга огледала. Оваква покретна огледала називају се заједничким именом хелиостати. Постоји велики број различитих конфигурација постављања равних панела за концентрацију сунчевог зрачења у кавитет- апсорбер соларног торња. Пречник апсорберске површине код оваквих типова хелиостатских концентришућих пријемника може да иде и до 5m. Површина коју једно хелиостатско соларно поље може да заузме је од 50 па чак до 100 хектара. Овакви системи су потпуно аутоматизовани двоосним позиционерима (solar tracking) који добијају импулс од астрономских станица које су у оквиру логичко- управљачке јединице соларног постројења. Систем прати сунце у сваком тренутку времена и коригује правац вектора снопа сунчевог зрачења. Грешка праћења која се генерише на реалном постројењу хелиостатског концентришућег система се отклања сензорима који су директно везани за апертуру сваког панела, на тај начин се у сваком тренутку времена коригује угао упадног сунчевог зрачења у односу на нормалу рефлексионе површине (преко фактора корекције упадног угла).



Слика 3.15. Хелиостатско поље колектора [67]

## Глава 4

### 4. УПОРЕДНА ОПТИЧКА АНАЛИЗА РАЗЛИЧИТИХ ТИПОВА ПАРАБОЛИЧНИХ КОНЦЕНТРИШУЋИХ ПРИЈЕМНИКА СУНЧЕВОГ ЗРАЧЕЊА

#### 4.1. Преглед софтвера за оптичко моделирање, симулацију и оптимизацију соларних концентришућих система

Приликом дугогодишњег истраживања у области соларних концентришућих система, извршена је анализа и различитих софтверских алата који се користе за предикцију оптичких параметара соларних оптичких система. Многи од софтверских алата је недоступно данас на тржишту, док је део софтверских решења избачен на тржишту- комерцијализован и може се купити од стране корисника. Велики број оптичких софтвера који се налазе на тржишту је јако скуп и није приступачан појединачном кориснику. Употреба овако сложених и комплексних софтверских решења (кодова) захтева познавање детаљне проблематике коју жели да реши одређени корисник.

Почетни корак у моделирању система је извођење неке структуре (објекта) која је употребљана да представља систем. Очигледно је да нема јединственог начина за представљање датог система. Структуру која представља систем не би требало помешати са реалним (стварним) системом. Структура ће увек бити несавршена копија стварности. Међутим, сам поступак развоја структуре система и сама структура ће потпомагати једно разумевање стварног система.

**Табела 4.1.** Преглед главних к-ка најчешће коришћених оптичких софтверских алата

	Компанија	Прорачунски метод	Доступност на тржишту	Формати увезених датотека	Формати извезених датотека
<b>Spray</b>	DLR	Monte Carlo ray tracing	Комерцијално доступан	DXF, IGES, Code V®, OSLO®, SYNOPSIS™, ZEMAX	DXF, IGES
<b>SolTrace</b>	NREL	Monte Carlo ray tracing	Слободан за коришћење	IGES, STEP, SAT, Code V	DXF, IGES
<b>Tonatiuh</b>	CENER	Monte Carlo ray tracing	Отворен код	IGES, STEP, SAT, Code V	DXF, IGES
<b>TracePro</b>	Lambda Research Corporation	Monte Carlo ray tracing	Комерцијално доступан	IGES, STEP, SAT, Code V	DXF, IGES
<b>ZEMAX™</b>	Focus Software	Monte Carlo ray tracing	Комерцијално доступан	IGES, STEP, SAT, Code V	DXF, IGES
<b>ASAP</b>	Breault Research Organization	Monte Carlo ray tracing	Комерцијално доступан	DXF, IGES, Code V®, OSLO®, SYNOPSIS™, ZEMAX	DXF, IGES
<b>APEX</b>	Breault Research Organization	Monte Carlo ray tracing	Комерцијално доступан	IGES, STEP, SAT, Code V	DXF, IGES
<b>STRAL</b>	DLR	Backward ray tracing	Комерцијално доступан	IGES, STEP, SAT, Code V	DXF, IGES, STEP
<b>LightTools™</b>	Optical Research Associates	Monte Carlo ray tracing	Комерцијално доступан	IGES, STEP, SAT, Code V	DXF, IGES, STEP
<b>ISOS</b>	Universidad Nacional Autónoma de México	Mathematical algorithm	Академски доступан	DXF, IGES	DXF, IGES, STEP
<b>HFLCAL</b>	DLR	Normal distribution	Комерцијално доступан	DXF, IGES	DXF, IGES, STEP
<b>HFLD</b>	Chinese Academy of Science	Edge ray	Комерцијално доступан	DXF, IGES	DXF, IGES
<b>OptiCAD™</b>	Focus Software	Monte Carlo ray tracing	Комерцијално доступан	IGES, STL, ZEMAX	DXF, IGES
<b>OptisWorks</b>	Dassault Systèmes SOLIDWORKS Corp.	Backward ray tracing	Комерцијално доступан	DXF, IGES	DXF, IGES
<b>Code V®</b>	Synopsis	Monte Carlo ray tracing	Комерцијално доступан	IGES, STL, ZEMAX	DXF, IGES
<b>OSLO®</b>	Sinclair Optics	Monte Carlo ray tracing	Комерцијално доступан	IGES, STL, ZEMAX	DXF, IGES

У развоју структуре која представља неки систем, прво су постављене границе система у складу са проблемом постојеће анализе. Доступни симулациони и

оптимизациони софтвери који ће бити приказани у овом раду су: Circe, SolTrace, TracePro, Tonatiuh, Helios, Trnsys, Mirval, Delsol, OptisWorks, ASAP и остали. Само три софтверска алата ће бити коришћена у оквиру моделирања и сумулације: TracePro, SolTrace и OptisWorks. До сада су у свету развијени многи софтвери за различите врсте симулација и оптимизација концентришућих соларних пријемника. Циљ овог прегледа јесте да се утврде и упореде карактеристике наведених софтвера, тако да указују на алате који су најпогодији за оптичко моделирање, симулацију и оптимизацију концентришућих пријемника сунчеве енергије, као и њихову интеграцију са осталим оптичким кодовима.

## 4.2. Структура коришћеног софтверског пакета

### 4.2.1. Избор софтверског алата за анализу оптичких перформанси

За симулацију и оптимизацију оптичких параметара и предикцију густине флукса концентрисаног зрачења код соларних параболичних система коришћен програмски пакет *TracePro*. На основу тестирања великог броја софтверских алата приказаних у горњој табели као и на основу урађеног великог броја анализа (прорачуна) хода зрака (применом Non - Sequential Ray - tracing Monte Carlo методологије), соларног параболичног оптичког система изабран је програм *TracePro*. *TracePro* (*Lambda Research Corporation*) [68] је комерцијални софтвер. *TracePro* оптички софтвер је изабран са становишта "user friendly" интерфејса као и лаког начина прилагођавања различитих геометријских модела приликом увожења (импортовања) и њихових извожења (експортовања). Софтверски алат поседује јако моћан солвер који није ограничен са бројем генерисања воксела (дискретизациона мрежа у тродимензионалном простору- пиксел у 3D) на одређеном дискретизационом домену (FFT - Fast Fourier Transform). Комерцијални софтвер *TracePro 7.3.4* у оквиру симулационог мода поседује и Оптимизатор (2D i 3D Interactive Optimizer), што је још један разлог за избор овог софтверског пакета. Још једна добра особина примене овог софтвера јесте да постоји могућност програмирања (писања изворног кода) у оквиру његовог Едитора за напредне кориснике. Систем у позадини користи Scheme macro језик. Scheme macro језик је тип програмског језика коришћен у софтверу. То је LISP (Locator/ Identifier Separation Protocol). Користи методологију вештачке интелигенције

за проширење стандардних могућности које омогућава *TracePro* и решавање високо специјализованих и сложених проблема у инжењерској пракси као и у научним истраживањима. Развијени програм у оквиру Scheme macro језика пружа могућност аутоматизованог начина креирања/моделирања различитих сложених геометријских модела које треба касније симулирати/оптимизовати.

#### 4.2.1.1. *TracePro* 7.3.4 софтверски пакет

*TracePro* је први програм за оптичку анализу са стандардном Solid Modelling платформом, ACIS®, на својој оперативној меморији (језгру). *TracePro* врши анализу осветљења у домаћинству, у ауто индустрији, оптичку анализу концентришућих система, соларне системе, оптичке системе у ласерској техници итд. Програм примењује Monte Carlo ray – tracing method (Монте Карло метод прорачуна хода зрака) за израчунавање дистрибуције флукса на пријемној површини топлотног апсорбера соларног концентришућег пријемника сунчевог зрачења, јер пропагира кроз модел [20]. *TracePro* прорачунава апсорпцију, рефлексију, рефракцију, расејање и дифракцију светлости на апертури рисивера/апсорбера. На развоју *TracePro*-а је радио велики број истраживача програмера. Софтверско решење је развијено на објектно оријентисаном програмирању (платформа C++). Резултати могу бити прорачунати у виду просторног дијаграма зрачења, дијаграм угаоног зрачења, контурне мапе, "candela" дијаграм или приказа историје сунчевих зрака са вектором правца у сва три правца X, Y, Z у табеларном приказу. Поред оптичке анализе и моделирања карактеристика оптичког система, *TracePro* симулира необичне геометријске моделе, системе сложене геометрије попут призматичних структура, рефлектора сачињених од већег броја истих или различитих сегмената различитог облика и величина, френелових сочива (рефлектора), параболичних соларних колектора, цилиндрично – параболичних колектора, хелиостатских соларних панела, LED осветљења итд.

Назив „Monte Carlo метод“ се односи на широк спектар математичких модела и алгоритама чија је главна карактеристика стохастички приступ, односно употреба случајних бројева у решавању различитих проблема. Методологија хода зрака копира реалну интеракцију фотона снопа сунчевих зрака са пријемном површином рефлектора и апсорбера. Покретање *TracePro* је крајње једноставно и спроводи се кроз четири корака - процеса. Прво, треба унети геометрију објекта у 3D облику који желимо да

симулирамо. У оптици генерално постоје два начина симулације хода зрака: секвенцијална и не - секвенцијална метода хода зрака.

Први се користи у пројектовању класичних оптичких система и он се карактерише са строго дефинисаним простирањем зрака кроз оптички систем. То је уобичајено са лева на десно и један зрак може да погоди рефлективну површину само једном. Код non-sequential ray-trace-a ситуација је у потпуности другачија. Зраци могу да се слободно крећу. И у принципу један зрак може више пута да погоди једну површину. Овај начин хода зрака се углавном користи код тзв. non-imaging optics тј. оптике, која не формира лик већ углавном служи за концентрацију оптичке (сунчеве) енергије (различити типови соларних концентратора, рефлектори различитих облика, итд.).

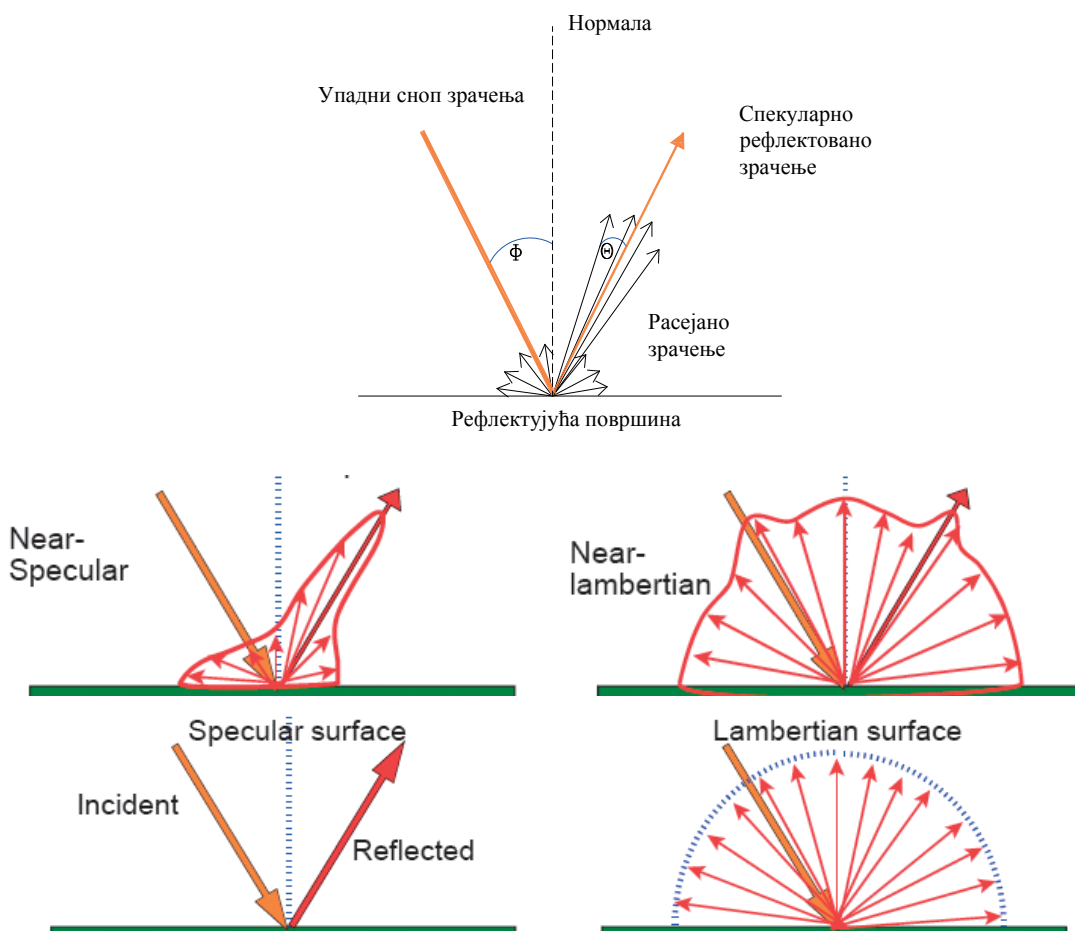
#### 4.2.1.2. Оптички модели расејања зрачења у оквиру TracePro софтвера

- ❑ Функција расподеле двосмерне рефлексије (BRDF) је димензиона ф-ја 4 реда која дефинише како је снап светлосних зрака рефлектован на непрозирним и закривљеним површинама. **Однос зрачења расипања и упадног зрачења.**
- ❑ BSDF=Bidirectional Scatter Distribution Function (Функција расподеле двосмерног расејања).
- ❑ BTDF=Bidirectional Transmission Distribution Function (Функција расподеле двосмерне трансмисије).
- ❑ TracePro поседује велики број модела расејања и модела дифузивности. Harvey-Shack модел и **ABg** BSDF модел су два најпопуларнија модела расипања у Ray – tracing анализама. Поред ова два постоје и следећи модели: Елиптични **ABg**, елиптични Гаусов модел, табеларни BSDF модел, асиметрични табеларни BSDF модел.

BRDF подаци могу бити фитовани различитим моделима рефлексије и расејања. Расипање (расејање) сунчевог зрачења је генерално физички процес у коме неки облици зрачења, као што су светлост, звук, или покретне честице, су приморане да одступе од праве путање од стране једне или више локалне неуниформности у медијуму кроз који пролазе. У конвенционалној употреби, ово укључује



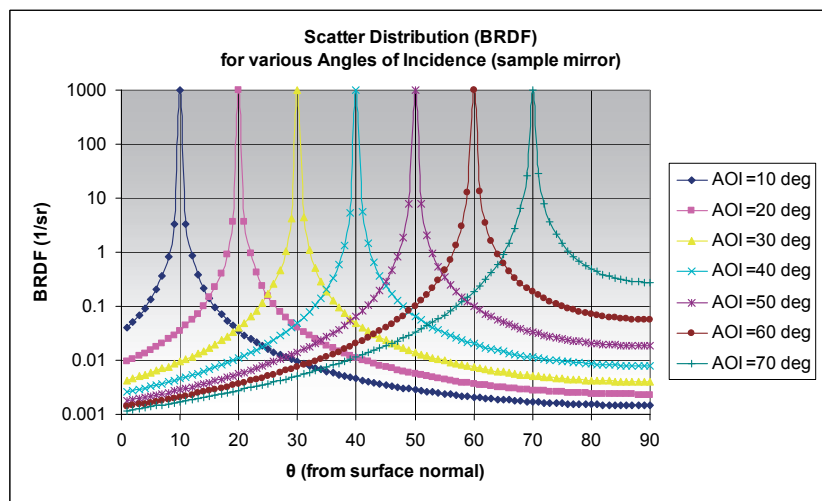
девијацију/одступање рефлектованог зрачења од угла предвиђеног законом рефлексије. Рефлективност која пролази кроз расејање често се назива дифузионом рефлексијом и рефлексије без расипања енергије зрачења је позната у литератури као спекуларна рефлексија (mirror-like). Постоје два типа расејања зрачења: површинско, које се јавља на повшини објекта. Ово може бити рефлектујуће (reflected scatter) или трансмитовано (transmitted scatter) расејање енергије сунчевог зрачења. Расејање је веома сложена оптичка појава тако да се може извршити експериментално мерење ове величине применом веома скувих уређаја. Schmitt Measurement Systems CASI (ScatterMaster ScatterScore3D) служи за мерење расејања енергије зрачења. Расипање соларног зрачења (соларна дисперзија) - дато преко параметара - угаона девијација снопа зрака



Слика 4.1. Модели рефлексије идеалних и реалних површина

Веома дифузиона површина, где не постоји повећање снаге са спекуларним углом познато је као Ламбертова површина. Тако да снага расипања опада са косинусом угла. Функција расподеле двосмерне рефлексије Ламбертове површине је константа на  $1/\pi$ . АВг модел може бити коришћен за прецизно предвиђање BRDF за било који упадни угао сунчевих зрака на неку сложујућу површину-познато као промена Инваријантности. Могућа су три процеса рефлексије: Огледаласта (спекуларна) рефлексија на равним површинама, када је храпавост површине мања од таласне дужине Сунчевог зрачења (0,4 до 2 nm). Ако је храпавост површине упоредива са таласном дужином зрачења, могућа је распршујућа рефлексија која се састоји од више огледаластих рефлексија у свим елементарним равнима од које се површина састоји. Запреминска рефлексија се догађа када сунчево зрачење продре кроз површину и одбије се од различитих слојева испод површине. Укупна рефлексија представља збир огледаласте, дифузне и запреминске рефлексије.

**Слика 4.2.** АВг модел BRDF у функцији угла упадних зрака (параболично огледало)



$$BRDF = \frac{P_s}{P_i \Omega} \quad (4.1)$$

$$BSDF = \frac{A}{B + |\bar{\beta} - \bar{\beta}_0|^g} \quad (4.2)$$

Још један заједнички показатељ расипања енергије зрачења је *укупно интегрисано расипање* Total Integrated Scatter (TIS). Ово је однос укупне снаге расипања (при свим инцидентним угловима) према снази спекуларне рефлексије

(идеалан случај).

$$TIS = \frac{P_s}{P_r} = \left( \frac{4\pi\sigma}{\lambda} \right)^2 \quad (4.3)$$

$$R_H = \frac{P_s}{P_i} = (TIS)R = \int_{hemisphere} (BRDF) d\Omega \quad (4.4)$$

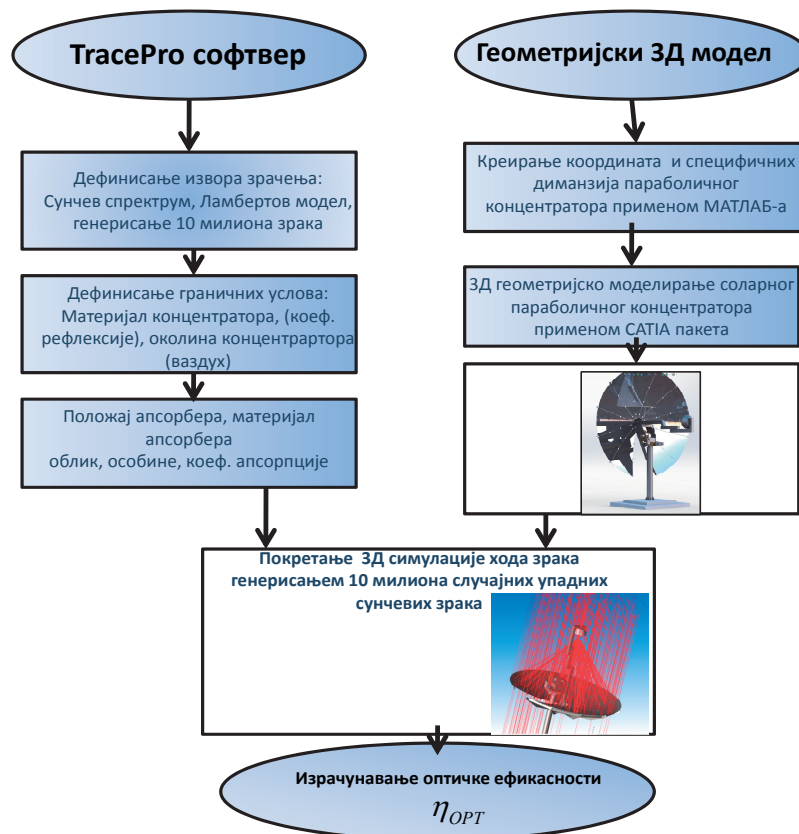
Полусферна рефлексија представља однос укупне снаге расејања према снази упадног (инцидентног) зрачења. То је једнако интегралу BRDF за цео опсег соларних углова укупне хемисфере.

$$\begin{aligned} R_H &= \int_{hemisphere} (BRDF)(\cos \phi) d\Omega \\ R_H &= (BRDF) \int_{hemisphere} (\cos \phi) d\Omega \\ R_H &= (BRDF) \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\pi/2} (\sin \phi \cos \phi) d\phi \\ R_H &= (BRDF)(2\pi) \frac{1}{2} \\ BRDF &= \frac{R_H}{\pi} \\ BRDF &= \frac{1}{\pi} \end{aligned} \quad (4.5)$$

#### 4.2.1.3. Нумеричка процедура

Решавање једначина рефлексије, рефракције, апсорпције, дифузије и расејања у оквиру једног оптичког модела соларног концентришућег система је јако сложен поступак, јер је просто немогуће аналитичким путем доћи до решења. Таква решења су могућа за мали број једноставнијих геометријских конфигурација. Код соларних концентришућих система постоји велики број сложених симетричних и несиметричних површина, различитих облика и геометрија, тако да је неизбежно користити нумеричко решавање истих. Нумеричка процедура се огледа у статистичкој методологији (метод вероватноће) Монте Карло. Назив „Monte Carlo metod“ се односи на широк спектар математичких модела и алгоритама чија је главна карактеристика стохастички приступ, односно употреба случајних бројева у решавању различитих проблема. За решавање овако случајних променљивих величина неопходан је случајни генератор (random and pseudorandom generator). Monte-Carlo ray-tracing техника је коришћена за симулирање

преноса топлоте зрачењем од извора до циља (рисивера/апсорбера) [69]. Ова техника је позната у литератури као “path-tracing” где сваки зрак постепени осиромашује своју енергију путујући кроз домен дискретизације, тј. ray-tracing сцену. Изворни кодови који се користе за ову врсту симулација су познати као “Tracers”. Један од бесплатних изворних кодова се налази у библиотеци која је направљена применом програмског језика Пајтон (Python) [70].



Слика 4.3. Методологија симулације оптичког модела параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења -TracePro модел

### 4.3. Моделирање оптичких параметара различитих конструктивних решења параболичних концентришућих система

#### 4.3.1. Примена Monte Carlo методе прорачуна хода зрака и резултати симулације

У овом подпоглављу биће приказане анализе оптичких параметара разних геометријских конфигурација параболичних концентратора сунчевог зрачења као и топлотног апсорбера. Биће извршена анализа два параметра: укупни флуks (снага) зрачења на површини апсорбера као и специфични флуks апсорбованог зрачења

(ирадијанца) - густина апсорбованог концентрисаног сунчевог зрачења. На основу извршеног великог броја оптичких (применом Non - Sequential Ray - tracing Monte Carlo методе) анализа дошли смо до закључка, који геометријски модел параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења је најоптималнији са становишта апсорпције концентрисане сунчеве енергије, смањења оптичких губитака, оптималне вредности специфичног флукса апсорбованог зрачења, расподеле флукса (упадног) апсорбованог зрачења на површини топлотног апсорбера. Ф-ја циља (merit function) је пре свега укупни флукс концентрисаног сунчевог зрачења (укупна нето снага) на рисиверу/апсорберу и ирадијанца (специфична) средња вредност флукса апсорбованог зрачења на површини апсорбера као и оптичка ефикасност. Конфигурација свих анализираних модела соларних концентратора је параболична рефлексивна површина састављена од одређеног броја сегмената - латица. Променљиве величине у оквиру оптичког моделирања су пре свега геометријски параметри: пречник апертуре параболичног концентратора, ивични угао, жижна даљина, величина рефлектујућих сегмената, облик сегмената, начин постављања сегмената, број сегмената, пречник рисивера/апсорбера, и многи други параметри. Поред неких основних геометријских променљивих у оптичким моделима су разматране различите оптичке променљиве као што су коефицијент рефлективности сегмената, коефицијент апсорптивности површине апсорбера/рисивера, спектар сунчевог зрачења, интензитет директне компоненте сунчевог зрачења, оптичке случајне и неслучајне грешке, мрежа дискретизације извора зрачења (circular, random, rectangular, cross, checkerboard, dithered rectangular), таласна дужина, угаони профил зрачења, просторни профил зрачења (angular и spatial profile), степен поларизације светлости, број симулираних зрака, профил упадног сунчевог зрачења и многи други параметри. У наредним поглављима биће више детаља о свим наведеним параметрима оптичког моделирања, симулације и оптимизације. У наредном подпоглављу биће приказане оптичке анализе и резултати неких од најбољих геометријских модела параболичних концентришућих пријемника сунчевог зрачења.

У наредној табели биће приказан преглед само неких типова соларних параболичних концентратора и апсорбера сунчевог зрачења за које су спроведене нумеричке симулације на бази којих су утврђене предности и недостаци појединих



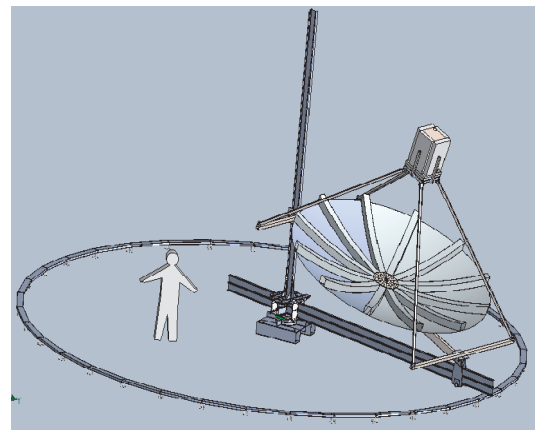
типова концентратора сунчевог зрачења. Велики број израђених геометријских конфигурација параболичних концентришућих пријемника сунчевог зрачења као и решавање оптичких модела нумеричким поступком има за циљ сагледавање основних карактеристика концентрисања и апсорбовања флуksа зрачења, као и предикцију дистрибуције упадног флуksа сунчевог зрачења на површину топлотног апсорбера.

На основу спроведеног великог броја нумеричких симулација дошли смо до коначног закључка везано за избор адекватног оптималног конструктивног решења геометријске конфигурације самог параболичног рефлектора и апсорбера као и могућности за његов развој прототипског решења. У овој анализи сви модели су сконцентрисани на тзв. параболично тањирасте (solar dish) системе. У наставку ће бити приказани геометријски 3D модели наведени у горњој табели као и резултати (Monte Carlo Ray - tracing) симулација одабраних решења параболичних концентришућих пријемника сунчевог зрачења. Постоји још на десетине различитих конструктивних решења која су анализирана у овом истраживању али неће бити приказана због ограничења простора у овој докторској дисертацији.

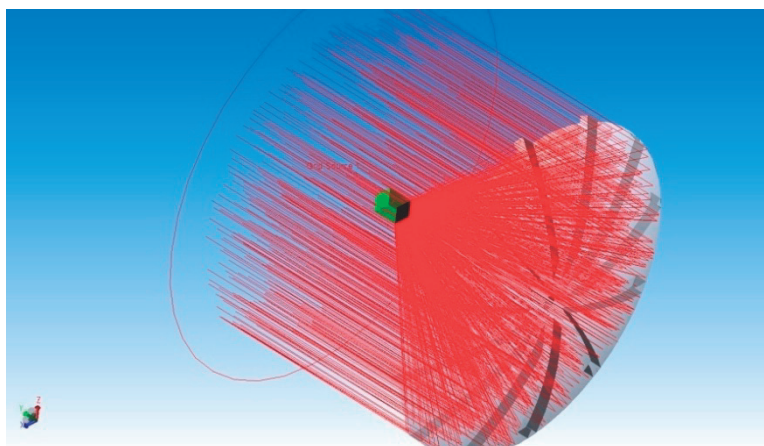
**Табела 4.2.** Преглед к-ка анализираних типова параболичних концентришућих пријемника сунчевог зрачења

Редни број	Облик сегмената	Тип концентратора	Пречник/жижна даљина (mm)	Пречник апсорбера (mm)	Тип соларног апсорбера	Укупна оптичка снага концентратора (W)	Специфични флуks абсорбованог зрачења ( $Wm^{-2}$ )	Оптичка ефикасност концентратора
1.	Криволинијски трапезоидни сегменти	Параболични концентратор	4800/2400	50.....250	Са квадратним кавитетом	13146	$2.103 \times 10^5$	0.75
2.	Равни конусни сегменти	Параболично Fuzzy фокални	2500/1600	200	Са равним апсорбером	3270.7	$1.04 \times 10^5$	0.82
3.	Шестоугаони сегменти	Шестоугаони параболични модел	1000-5000/1600	50.....400	Са равним цилиндричним апсорбером	9108	46390	0.40
4.	Квадратни сегменти	Параболични концентратор	12000/5800	500...600	Са равним цилиндричним апсорбером	44358	39221	0.6
5.	Криволинијски трапезоидни сегменти	Параболични концентратор	2800 /1250	50.....150	Са равним цилиндричним апсорбером	4487,9	$2.53 \times 10^5$	0.79
6.	Мозаик конфигурација	Параболични концентратор	5000/1840	200	Са конусним кавитетом	11570	$3.68 \times 10^5$	0.58
7.	Квадратни сегменти закривљени	Параболични Фреселов концентратор	Квадратна апертура $2952 \times 2952/2500$	100.....300	Са равним цилиндричним апсорбером	7348	$2.355 \times 10^5$	0.82
8	Квадратни сегменти равни	Параболични концентратор	2500/1500	200	Са равним цилиндричним апсорбером	3665.1	73376	0.68

❖ *Први оптички модел* у оквиру ових упоредних анализа урађен је на бази реалног соларног параболичног концентратора (модел развијен од стране University of Pretoria) пречника 4.8m и жишне даљине 2.89m. Истраживање овог типа концентратора је спроведено у сарадњи са колегом Willem Le Roux из Јужноафричке републике [71]. На основу реалних димензија соларног параболичног пријемника направљен је 3D модел. Соларни рефлектор је обликован од танког полираног алуминијумског лима димензија сваког сегмента 2.5m×1.25m. Топлотни апсорбер је сачињен од кружних цеви пречника 88mm кроз које струји ваздух као радни флуид. Цевни апсорбер је смештен у квадратном кавитетету димензија 0.25m×0.25m.



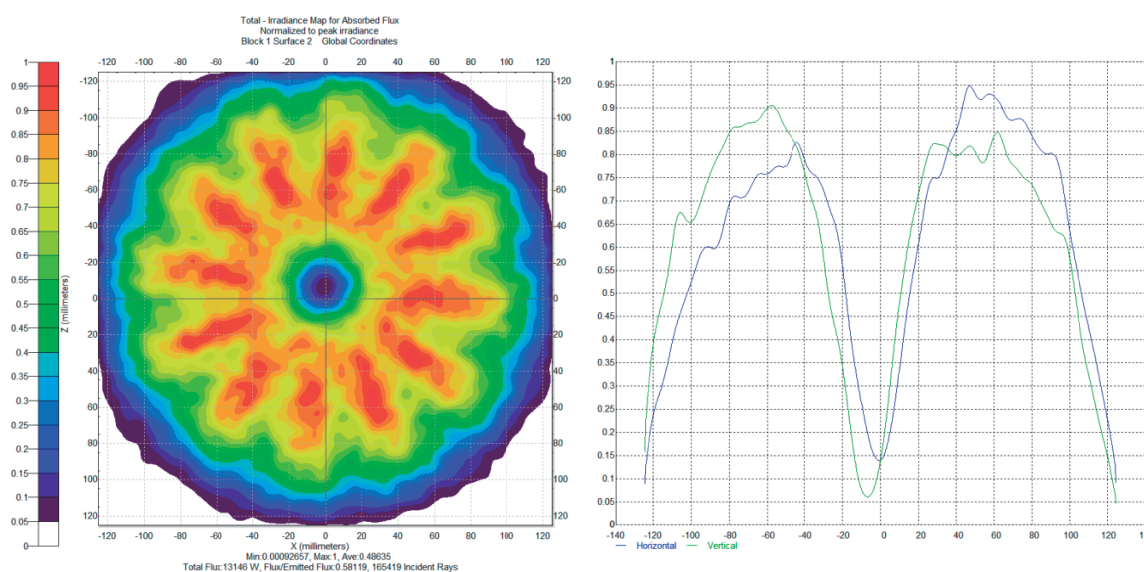
**Слика 4.4.** Реални систем (лево), 3D модел соларног параболичног пријемника са системом двоног праћења сунца (десно)



**Слика 4.5.** Оптички (Ray tracing) модел параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења



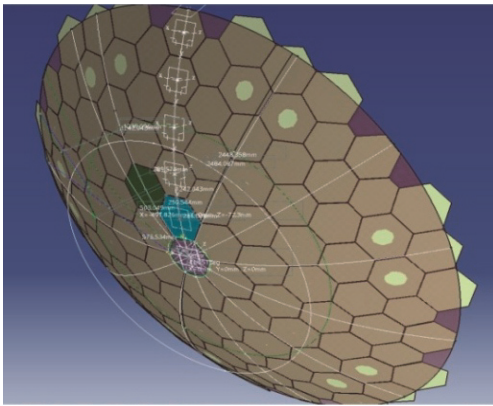
Извршена Ray - tracing анализа показује да је оптимални положај топлотног апсорбера на растојању од 2897mm. Укупни флуks (снага) који се генерише на површини апсорбера је 13.146kW, док је средња вредност специфичног флуksа апсорбованог зрачења  $2.103 \times 10^5 \text{ Wm}^{-2}$ , док је максимални специфични флуks концентрисног сунчевог зрачења на површину апсорбера  $4.32 \times 10^5 \text{ Wm}^{-2}$ . Фактор прихватања рефлектованог сунчевог зрачења износи 0.58.



**Слика 4.6.** Распoдела флуksа апсорбованог зрачења (профил ирадијансе) ефективне жижне равни на површини апсорбера

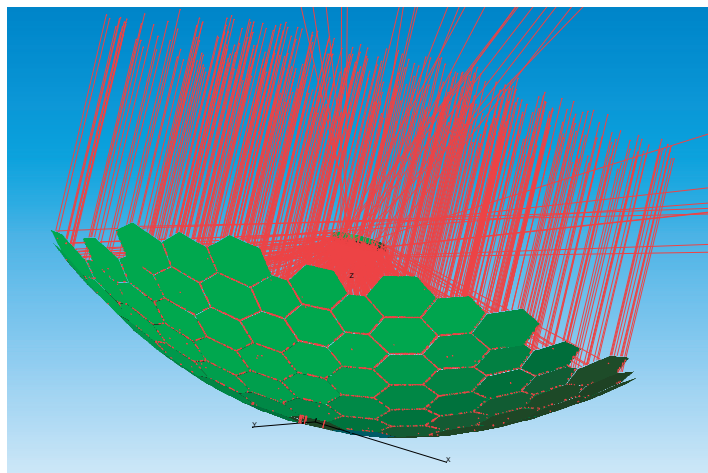
❖ *Друго конструктивно решење* представља развој параболичног концентратора сунчевог зрачења састављеног од шестоугаоних равних рефлектујућих сегмената исте величине на параболичној основи. Овакви системи су познати као "мозаик" конфигурација. 3Д модел је направљен применом CATIA V5R19. Идеја је да се направи такав распоред шестоугаоних сегмената са минимумом празнина између њих како би се повећала површина апертуре концентратора. Параметарски модел је генерисан на бази две величине: дужине странице шестоугаоника, као и угла који заклапа први ред шестоугаоника са хоризонталном равни. Пречник основе параболоида је 5m, док је жижна даљина 1.6m. Идеја је да се добије што затворенији облик концентратора како би се лакше извршило подешавање и поравнање великог броја равних фасета (сегмената). Величина странице шестоугаоника је 250mm. Урађена је параметарска оптичка анализа за различите пречнике концентратор (1-5m) као и

анализа са идеализацијом шестоугаоног параболичног концентратота (постављањем глатке рефлексивне површине преко равних сегмената-огледала). У наставку биће приказане неке од тих анализа. Израда оваквог типа концентришућег система је веома једноставна јер захтева само један технолошки поступак, а то је ласерско сечење шестоугаоних алуминијумских сегмената (огледаластих) или касније наношењем слоја сребра што додатно поскупљује израду. На тај начин ово техничко решење је могуће извести са већим инвестиционим трошковима. Поступак подешавања и постављања сваког сегмента захтева додатна улагања у подконструкционе елементе. Добијање параболичног облика применом шестоугаоних равних сегмената је сложен поступак поготову када се ради о већим површинама/пречницима концентратора.

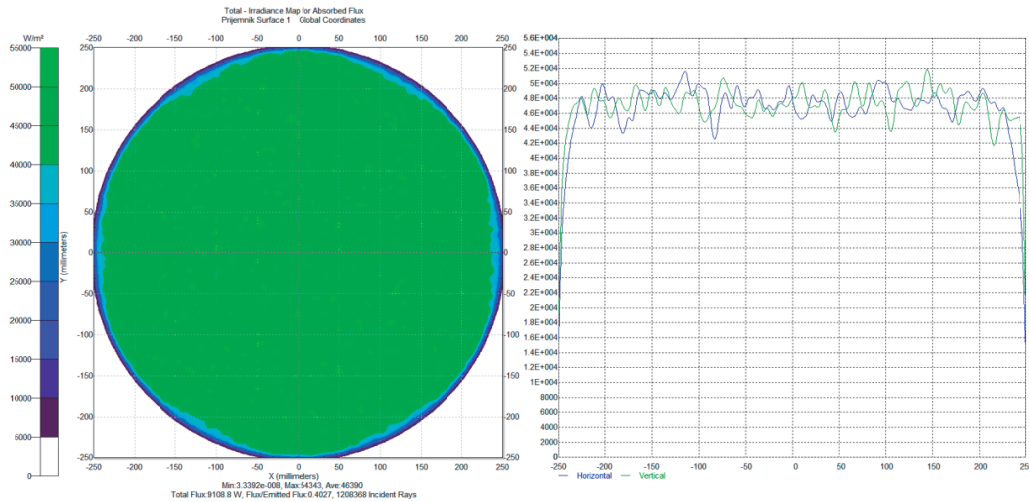


**Слика 4.7.** 3D модел параболичног концентришућег пријемника са равним шестоугаоним фасетама (лево); основа концентратора - параболоид ( $D=5\text{m}$ ,  $f=1.6\text{m}$ )

На наредној слици је приказан оптички модел (Ray - Tracing) модел.



**Слика 4.8.** Оптички (Ray - Tracing) модел параболичног концентратора са шестоугаоним равним сегментима



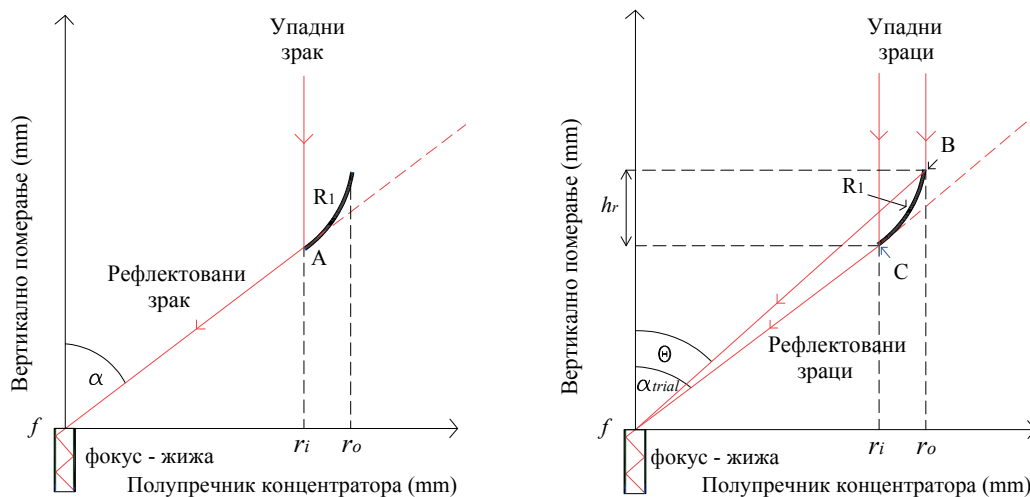
Слика 4.9. Распореда флуksа апсорбованог сунчевог зрачења (профил ирадијансе)

У наредној табели приказане су вредности укупног флуksа сунчевог зрачења као и средња вредност специфичног флуksа апсорбованог зрачења на површини апсорбера за 5 различитих пречника апертуре. Због једноставности оптичке анализе (брзине симулирања) узето је да сви апсорбери буду кружног облика са коефицијентом апсорпције 1 (идеалан случај). Док је коефицијент рефлективности огледаласте површине 0.9. За све случајеве у овом нумеричком моделу број случајних зрака које смо генерисали применом "*random generatora*" (емитовали) са извора зрачења је 3 милиона. Основа идеја ових упоредних анализа јесте генерисање мапе (карте) расподеле флуksа апсорбованог зрачења на површини апсорбера за различите конфигурације и димензије концентришућих пријемника сунчевог зрачења.

Табела 4.3. Резултати нумеричке симулације

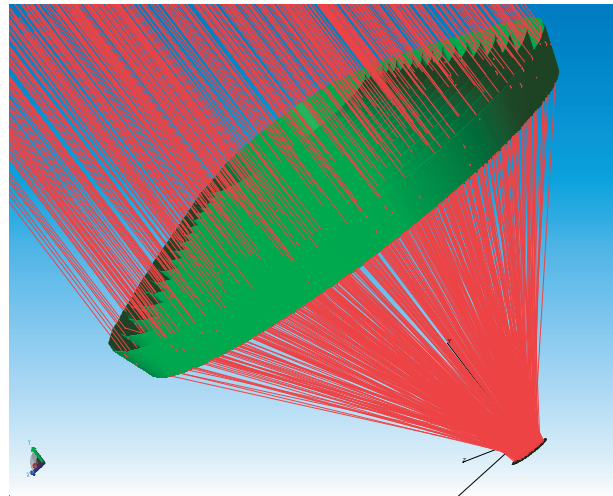
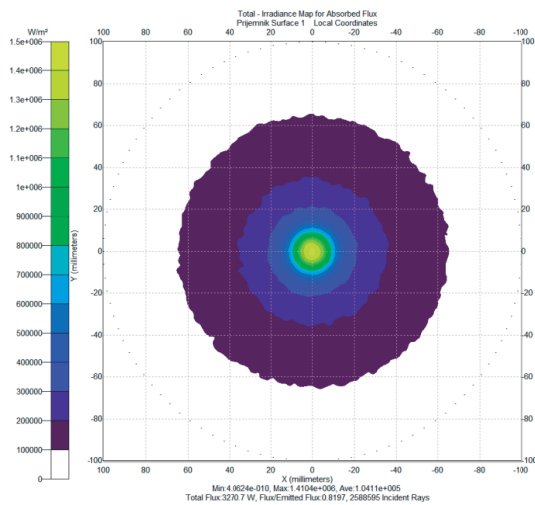
Пречник концентратора (m)	Пречник апсорбера (m)	Укупни флуks (снага) (W)	Положај апсорбера од темена концентратора (m)	Осредњени специфични флуks зрачења (ирадијанса) ( $Wm^{-2}$ )	Максимални специфични флуks (ирадијанса) ( $Wm^{-2}$ )
1	0.14	467.67	0.33	30380	48850
2	0.14	2017.7	0.64	28544	49706
3	0.5	4743.7	0.85	47546	50160
4	0.5	7226.7	1.28	36805	49162
5	0.5	9108	1.6	46390	54343

❖ *Треће конструктивно решење* представља развој соларног параболичног концентратора са апсорбером који је усмерен ка земљи. Систем огледала је тако пројектован да сво упадно сунчево зрачење које доспе на површину апертуре се рефлектује у једном заједничком месту - у фокусу концентратора. На наредним сликама приказан је геометријски модел овог типа концентратора.



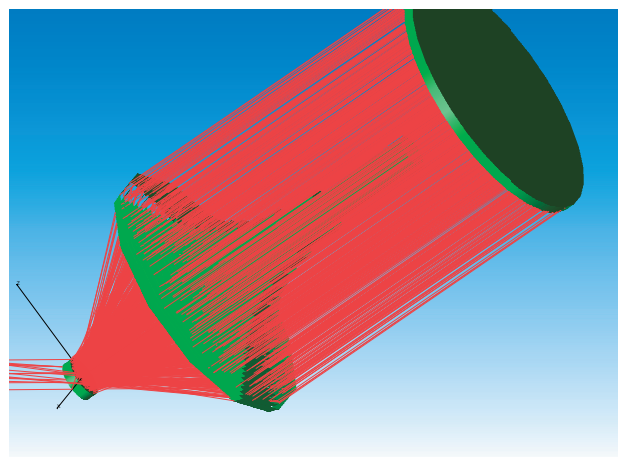
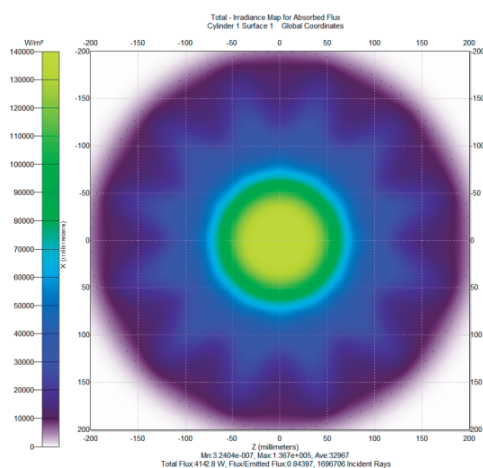
**Слика 4.10.** Концентрација рефлектованог сунчевог зрачења (Ring array) на површину параболичног концентратора

Пречник апертуре концентратора је 2500mm, жижна даљина 1500mm, док је пречник цилиндричног апсорбера 200mm. Коефицијент рефлективности 97%, коефицијент апсорптивности 90%. Фактор концентрације је 950. Укупни флуks зрачења на површини апертуре апсорбера је 3270.7W, док је густина флуksа зрачења (специфични абсорбовани флуks)  $1.04 \times 10^5 \text{Wm}^{-2}$ . Фактор хватања (пресретања) је јако висок 0.82, што показује да је 82% рефлектованог сунчевог зрачења са конусних сегмената пада на површину апсорбера концентрата. Овај тип параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења је јако ефикасан. Оптичка ефикасност је између 0.75-0.8. Интензитет директне компоненте сунчевог зрачења је  $800 \text{Wm}^{-2}$ .



Слика 4.11. Расподела флуksа абсорбованог сунчевог зрачења (лево);  
Приказ хода зрака (десно)

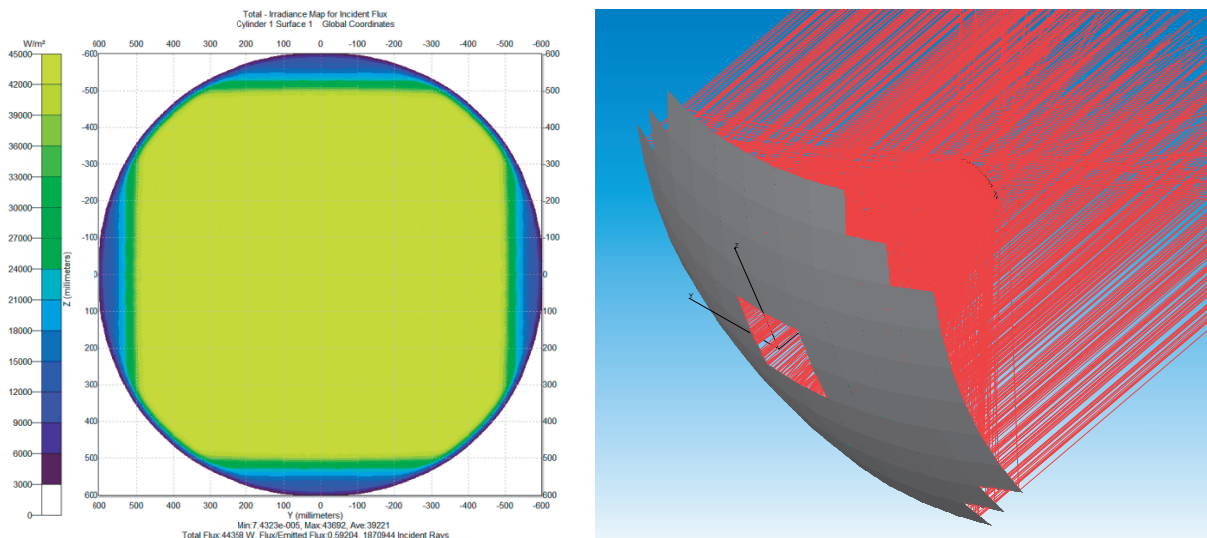
Поред овог модела са параболичним конусним сементима прстенастог профила, анализиран је још један модел где је сваки прстен подељен на 12 равних угаоника. Пречник цилиндричног апсорбера је повећан на 400mm како би сво рефлектовано зрачење било прикупљено. Нумеричка симулација је спроведена са 2 милиона емитованих зрака као и задовољења конвергенције решења због сложености профила рефлектујућих сегмената параболичног система. Интензитет сунчевог зрачења је симулиран са  $800\text{Wm}^{-2}$ .



Слика 4.12. Расподела флуksа абсорбованог сунчевог зрачења (лево);  
Приказ хода зрака (десно)

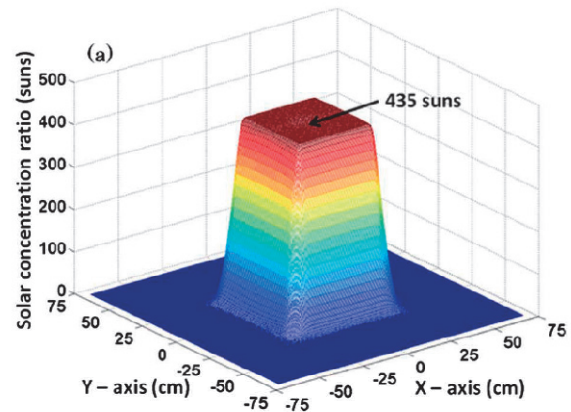
Укупни флуks зрачења на површини апертуре апсорбера је  $3314.2\text{W}$ , док је густина флуksа зрачења (специфични апсорбовани флуks)  $26374\text{Wm}^{-2}$ . Фактор хватања (пресретања) је јако висок  $0.84$ .

❖ *Четврто конструктивно решење* представља развој соларног параболичног концентратора са квадратним сегментима истих димензија и облика. На тај начин долазимо до технолошки веома јефтиног решења, при чему начин постављања и усаглашавања положаја сегмената на параболичној основи биће добијен на основу оптичког моделирања и одређивања слике флуksа концентрисаног сунчевог зрачења на површини апертуре апсорбера у жижној равни. Пречник апертуре концентратора је  $12\text{m}$ , док је апсорбер постављен на растојању  $5.8\text{m}$ . Број сегмената и димензије квадратних фасета - сегмената биће одређени на бази познате топлотне снаге коју желимо да добијемо. Са друге стране, распоред сегмената одређује и униформност флуksа апсорбованог зрачења на површини апсорбера. Укупан број квадратних сегмената је  $88$ .



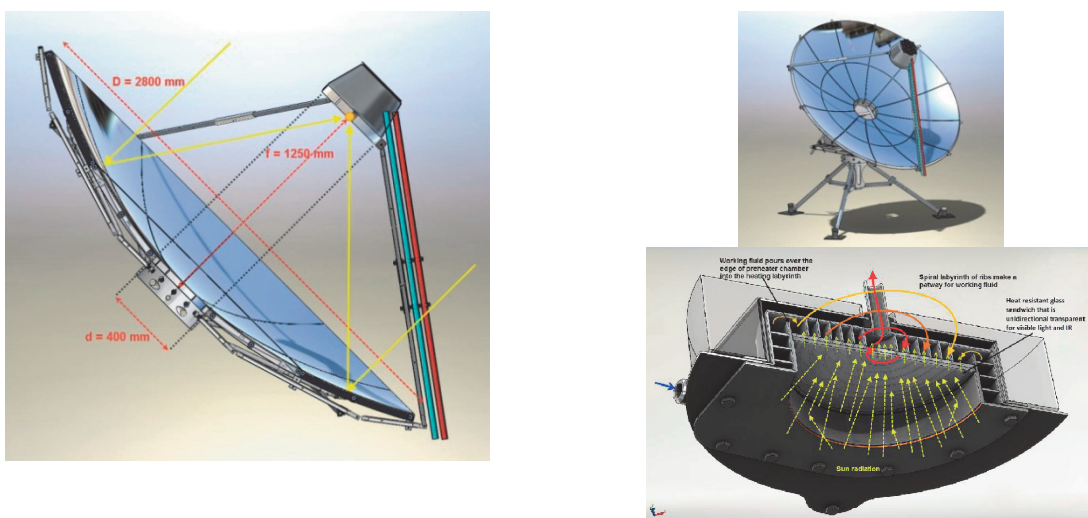
Слика 4.13. Расподела флуksа абсорбованог сунчевог зрачења (лево);  
Приказ хода зрака (десно)

Слика 4.14. 3D дистрибуција флукса абсорбованог зрачења

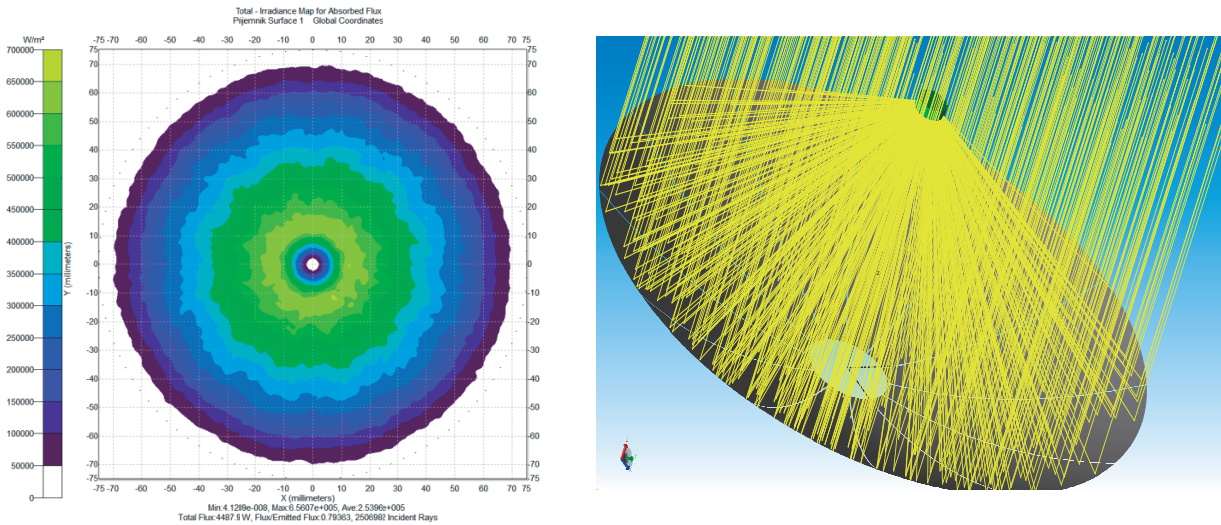


Укупни флукс зрачења на површини апертуре рисивера је  $44358\text{W}$ , док је густина флукса зрачења (специфични апсорбовани флукс)  $39221\text{Wm}^{-2}$ . Фактор хватања (пресретања) је 0.60.

❖ *Пето конструктивно решење се доста разликује од претходних по томе што је параболоидна површина подељена на 12 рефлектујућих сегмената - латица, где је свака са коефицијентом рефлективности 0.95, а апсорптивност 85%. Систем је моделиран са становишта добијања топлотне снаге између 3-5kW. Пречник топлотног апсорбера је 150mm. Систем се састоји из два концентрична прстена (реда) сегмената. Наравно, подела рефлексионе површине апертуре на два концентрична круга је извршена из разлога смањења дужине лука сегмента из технолошких разлога израде мастер калупа.*



Слика 4.15. Пречник концентратора и жижна даљина параболочног концентришућег пријемника сунчевог зрачења (лево); 3D модел апсорбера



Слика 4.16. Дистрибуција флукса апсорбованог сунчевог зрачења на површини апертуре апсорбера.

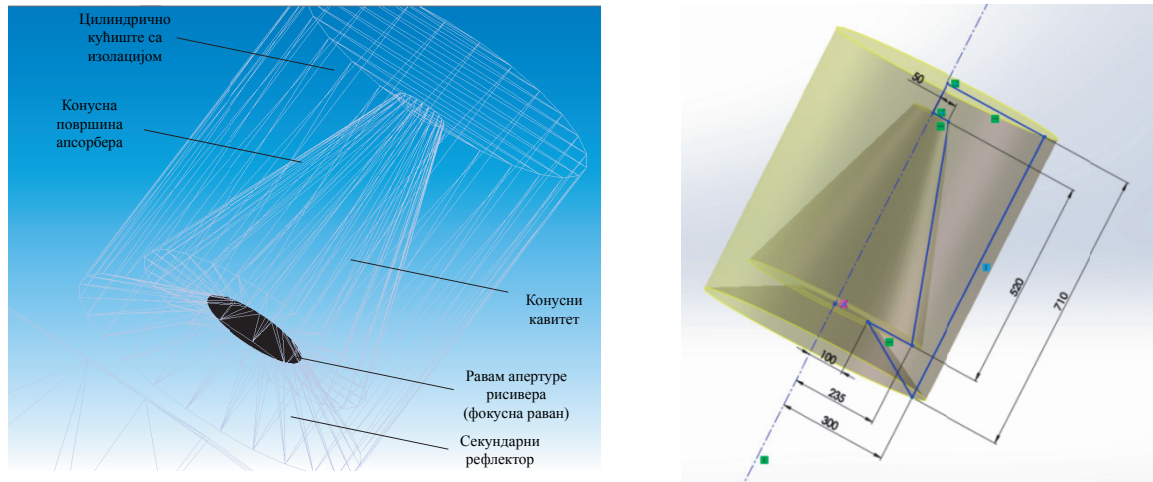
На овом моделу урађена је параметарска анализа за различите пречнике (1-5m) као и различит број сегмената по обиму површине концентратора (8-20). Спровођењем великог броја нумеричких симулација (30 симулација) и спроведених анализа за параметре као што су укупни флукс зрачења као и специфични просечни апсорбовани флукс на површини апсорбера усвојено је оптимално решење. Пречник рисивера је задржан да буде константан (100mm) у свим симулацијама.

Укупни флукс зрачења на површини апертуре рисивера је 4487.9W, док је густина флукса зрачења (просечни специфични апсорбовани флукс)  $2.53 \times 10^5 \text{Wm}^{-2}$ . Фактор хватања (пресретања) је јако висок 0.79, што показује да је 79% рефлектованих зрака са конусних сегмената завршило на површину апсорбера. Овај тип соларног параболичног концентратора је јако ефикасан. Оптичка ефикасност је 0.81. Интензитет сунчевог зрачења је  $800 \text{Wm}^{-2}$ .

❖ *Шесто конструктивно решење се доста разликује од претходних по томе што је соларни рисивер са кавитетом у облику конуса, као и са секундарним концентратором. Површина апсорбовања је коничног облика, тако да се остварује униформност флукса зрачења на унутрашњој површини зида. Апсорбер је моделиран тако да заузима облик кавитета, чиме се услед вишеструке рефлексије на унутрашњости зида апсорбује изузетно униформна расподела флукса зрачења.*

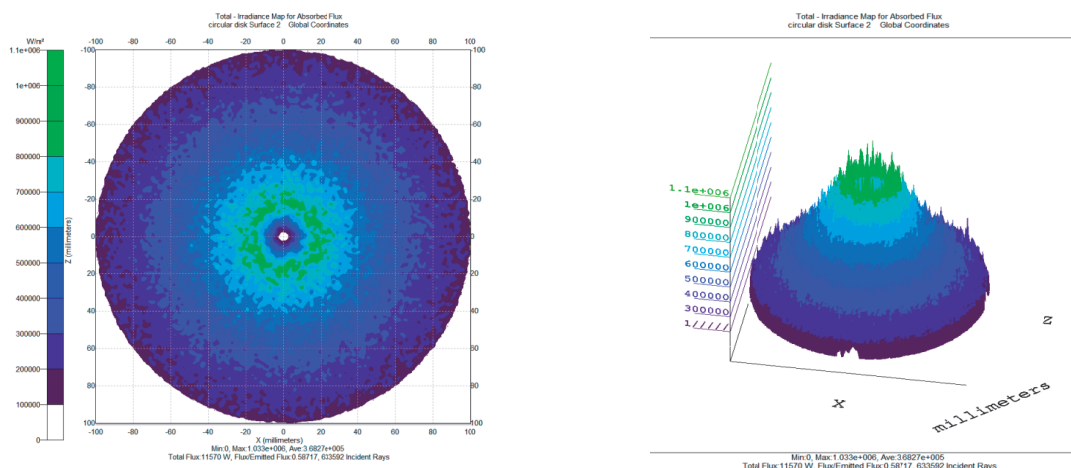


Пречник параболичног концентратора је 5m, жижна даљина је 1.84m. Остале димензије топлотног апсорбера са конусним кавитетом дате су на слици испод.

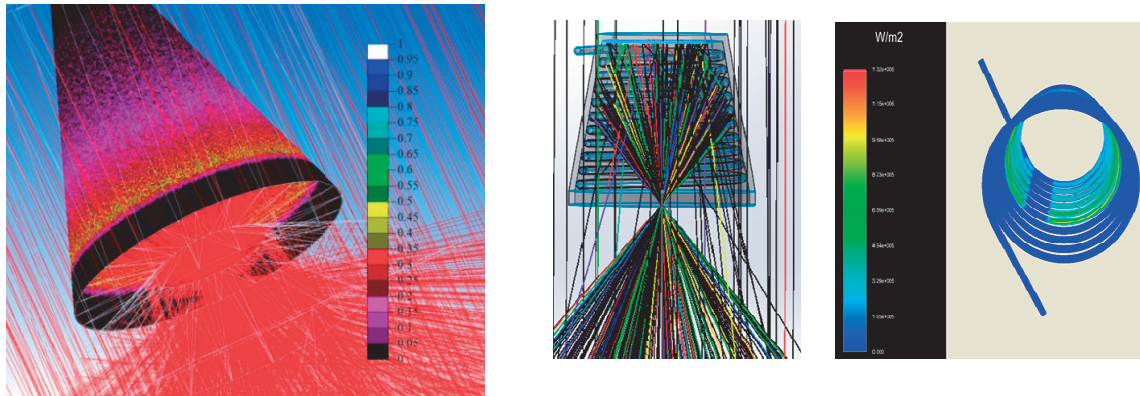


**Слика 4.17.** Конструкција апсорбера у кавитету (лево); основне димензије апсорбера са конусним кавитетом и секундарним концентратором (десно)

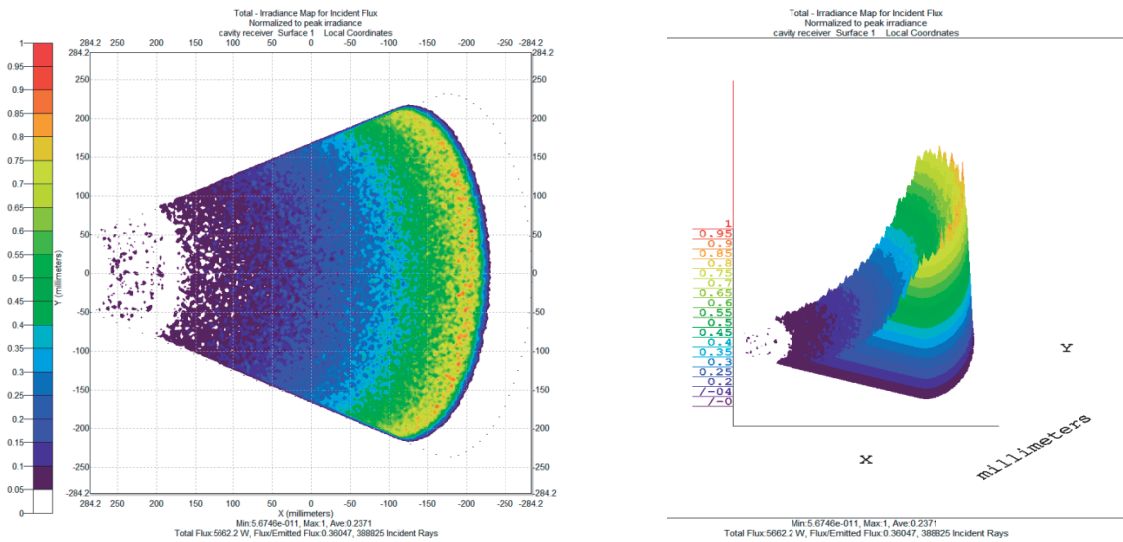
На наредним сликама приказана је дистрибуција апсорбованог флуksа сунчевог зрачења на површини кавитета, као и дистрибуција флуksа зрачења на унутрашњим површинама зидова конусног апсорбера. Унутрашња површина конусног апсорбера је моделирана као склоп две површине да би могли једноставније да сагледамо како унутрашња вишеструка рефлексија од зидова утиче на укупну апсорпцију рефлектованог флуksа сунчевог зрачења.



**Слика 4.18.** Дистрибуција флуksа зрачења на површини апертуре рисивера (2D - лево); 3D профил (десно)

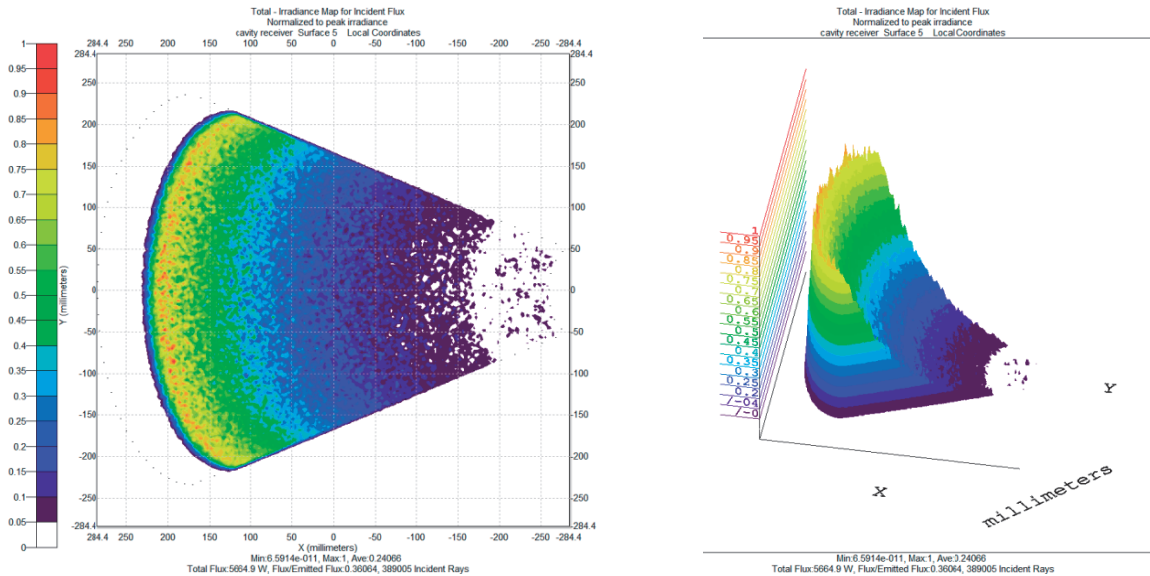


Слика 4.19. 3D Профил флуksа абсорбованог сунчевог зрачења на површини зида и хеликоидног цевног апсорбера



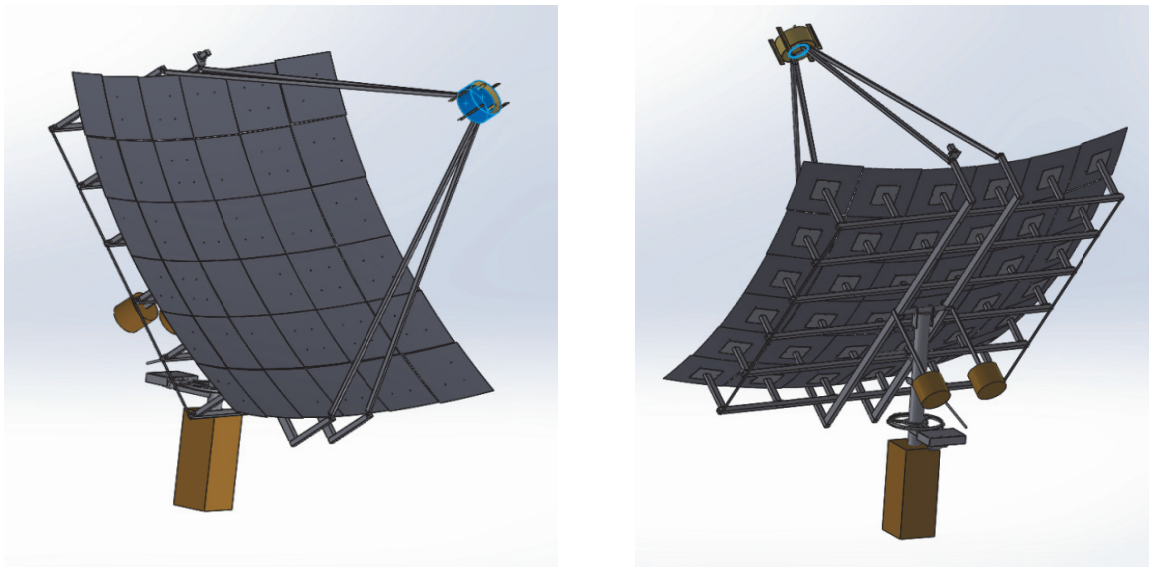
Слика 4.20. 2D Профил абсорбованог сунчевог зрачења на једној половини унутрашње стране кавитета (лево); 3D профил флуksа абсорбованог зрачења

Нумеричка симулација је веома комплексна и захтева јако добре рачунарске ресурсе. Број генерисаних зрака са виртуелног извора зрачења је 3 милиона, што се сматра довољним за конвергенцију решења у оквиру нумеричке симулације као и тачност резултата расподеле апсорбованог флуksа концентрисаног зрачења по површини топлотног апсорбера.



Слика 4.21. 2D Профил апсорбованог сунчевог зрачења на другој половини унутрашње стране кавитета (лево); 3D профил флукса апсорбованог зрачења

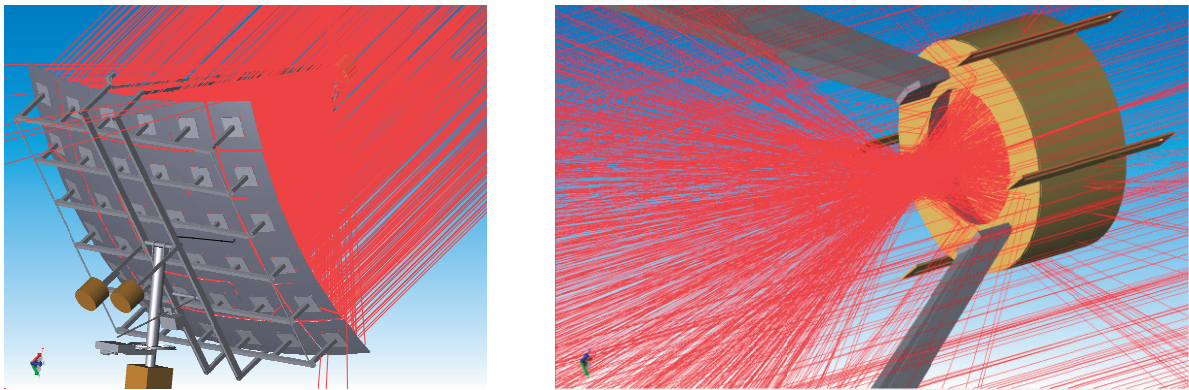
Седмо конструктивно решење (squared parabolic dish shape) се састоји од вишесегментног параболичног концентратора чија је површина апертуре квадратног облика димензија  $2952 \times 2952 \text{ mm}$  и жишне даљине  $2476 \text{ mm}$ .



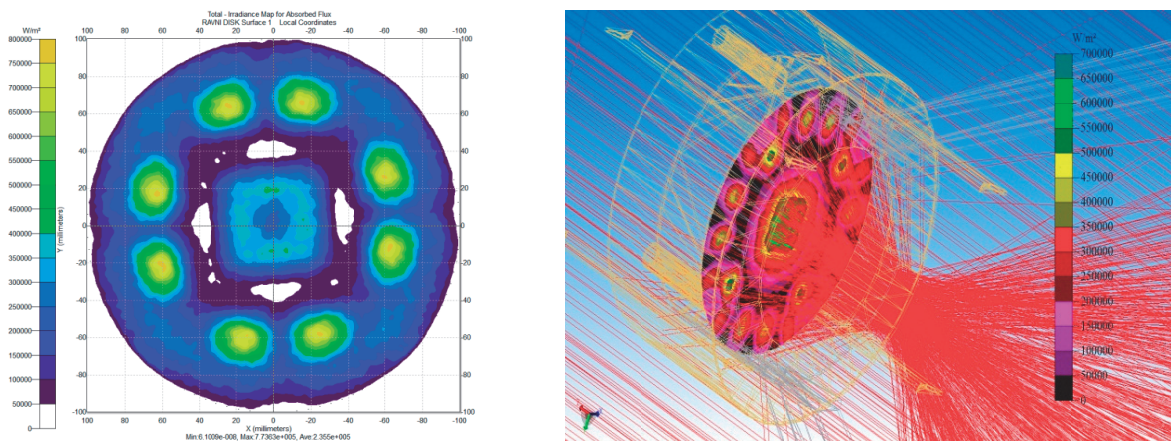
Слика 4.22. Предња и задња страна квадратно - параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења

Идеја је да се направи концентратор квадратног облика састављен од квадратних сегмената истог облика и димензија. Димензије сваког сегмента су  $485 \times 485 \text{ mm}$ .

Соларни апсорбер је цилиндричног облика унутар кога се налази радни флуид директно изложен концентрисаном зрачењу преко челичног диска. Пречник кавитета апсорбера је 200mm. Са задње стране концентришућег пријемника сунчевог зрачења су постављени против тегови како би обезбедила стабилност система приликом утицаја оптерећења од ветра. На тај начин равнотежа система је обезбеђена без бојазни да ће доћи до превртања система при тешким ветровитим временским условима. Оптичка анализа је спроведена применом Monte Carlo методе прорачуна хода зрака, где је применом случајног генератора емитовано 3 милиона зрака на површину апертуре концентришућег вишесегментног пријемника. На основу великог броја спроведених нумеричких симулација, пронађен теоријски фокус (раван максималне концентрације) на растојању од 2380mm. Топлотна снага у положају теоријског фокуса износи 8430W, док је густина флукса зрачења (ирадијанца)  $2.68 \times 10^5 \text{Wm}^{-2}$  (слика 4.24). У том случају фактор хватања је јако висок и износи 0.82.

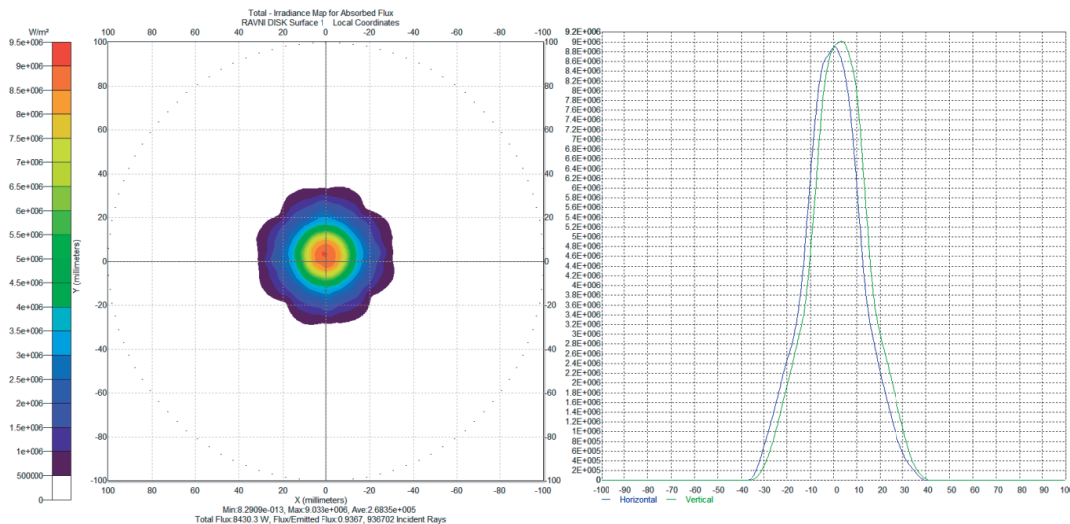


Слика 4.23. Приказ хода зрака (лево); Концентрација упадног сунчевог зрачења на апсорберу



Слика 4.24. 2D (лево) и 3D (десно) профил абсорбованог сунчевог зрачења на површини апсорбера

Укупни топлотни флуks (снага) на површини апсорбера при директном сунчевом зрачењу од  $800 \text{ Wm}^{-2}$  износи  $7398 \text{ W}$ , dok је специфични флуks зрачења на површини апсорбера  $2.355 \times 10^5 \text{ Wm}^{-2}$ . Процент апсорбованих зрака на површини апсорбера је 82%. Коefицијент рефлективности квадратних сегмената је 93%. Квадратни сегменти су направљени од полираног алоксисаног алуминијума.

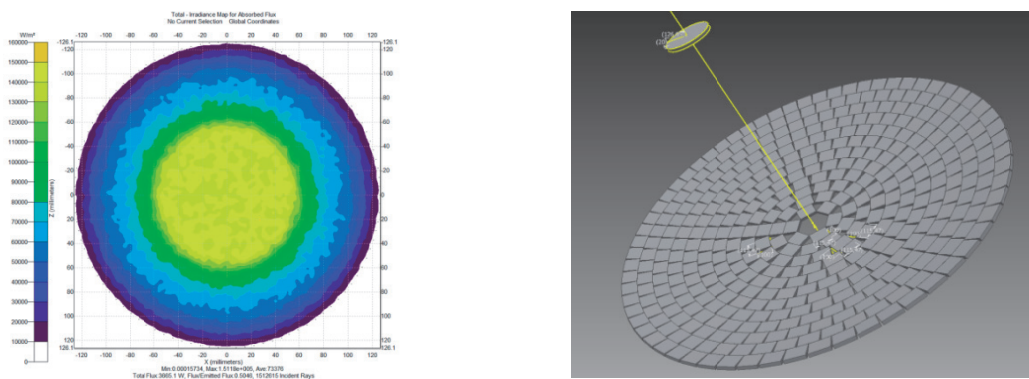


**Слика 4.25.** Распoдела флуksа зрачења у теоријском фокусу цилиндричног апсорбера (десно); Распoдела флуksа сунчевог зрачења у хоризонталној и вертикалној равни површине апсорбера (десно)

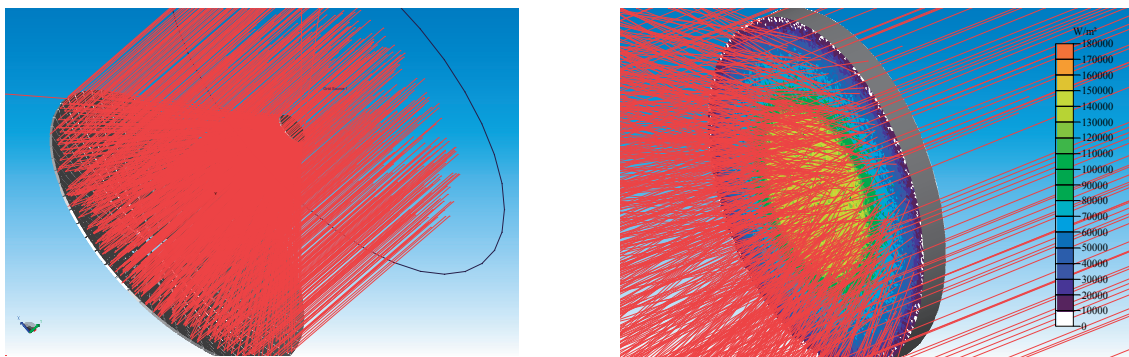
Пречник теоријског фокуса (зона озрачености) на површини цилиндричног апсорбера је 60mm. (Focal hot spot). Максимална густина флуksа зрачења која се генерише на површини теоријског фокуса (2476mm) износи  $9.033 \times 10^6 \text{ Wm}^{-2}$ . Приказани модел соларног квадратно - параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења обезбеђује висок степен концентрације (оптички концентрациони однос) 400 suns ( $\text{kWm}^{-2}$ ).

У овом поглављу је извршена оптичка анализа само неких од геометријских конфигурација соларних параболичних концентратора и рисивера концентришућих оптичких система. Постоји још на десетине разматраних конструкционих решења параболичних концентришућих пријемника сунчевог зрачења који су истраживани и за које постоје урађени нумерички модели као и резултати Monte Carlo симулација хода зрака. На основу претходно приказаних геометријских модела, резултата оптичких анализа великог броја других модела који су истраживани, а нису приказани у овој дисертацији биће усвојено једно од решења које ће бити детаљно приказано у наредном поглављу.

Осмо конструктивно решење чија је анализа и симулација приказана састоји се од вишесегментног концентратора чија је површина апертуре параболичног облика пречника 2500 mm и жижне даљине 1500mm. Детаљно истраживање и моделирање оптичких и геометријских параметара овог типа соларног параболичног концентришућег пријемника приказано је у [72]. Геометријски модел се састоји од 12 идентичних рефлектујућих сегмената (3 mm) - Полиметилметакрилат са слојем сребра. У оквиру моделирања оптичких параметара коришћен је комерцијални софтверски пакет TracePro. Применом нумеричке симулације несеквенцијалном методом хода зрака предвиђена је расподела флукса апсорбованог зрачења на периферију кружног апсорбера и центру апсорбера. Приказани оптички модел параболичног концентратора сунчевог зрачења је добра основа за каснију оптимизацију геометријских и оптичких параметара соларног концентришућег система.



Слика 4.26. 2D расподела апсорбованог флукса сунчевог зрачења конфигурација са  $N_{\text{total}}=415$  сегмената постављених у  $M=12$  редова;



Слика 4.27. Симулација хода зрака (лево); тродимензонални распоред апсорбованог флукса зрачења

## Глава 5

### **5. ПОСТАВЉАЊЕ ФИЗИЧКОГ, МАТЕМАТИЧКОГ И НУМЕРИЧКОГ МОДЕЛА ПАРАБОЛИЧНОГ КОНЦЕНТРИШУЋЕГ ПРИЈЕМНИКА СУНЧЕВОГ ЗРАЧЕЊА**

---

#### **5.1. Математичко моделирање**

##### **5.1.1. Развој параметарског геометријског модела параболичног вишесегментног концентратора сунчевог зрачења**

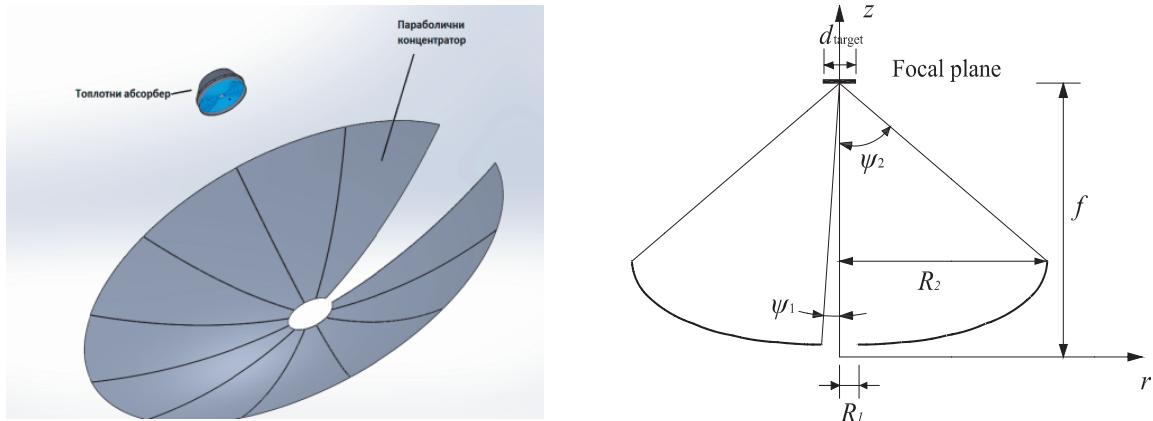
Концентратори сунчевог зрачења са високим степеном концентрације могу осим директног сунчевог зрачења да прихватају и дифузно зрачење. Параболични концентришући пријемник сунчевог зрачења састоји се од вишесегментног параболичног рефлектора и спирално набораног топлотног апсорбера. Концентратор је параболичног облика с тим да се рефлектор састоји од једанаест високо рефлексивних површина (латица) које могу да буду параболичне или сферне. Искоришћење сунчеве енергије је основно оружје за суочавање са енергетским проблемима, дајући већу ефикасност, чисту енергију као и финансисјки одржива решења. [73]. Abid и сарадници

[74] упоређивали су соларни параболично тањирасти концентратор са параболично коритастим. Они су доказали кроз низ тестова да су параболично тањирасти системи доста бољи и ефикаснији по топлотним перформансама.

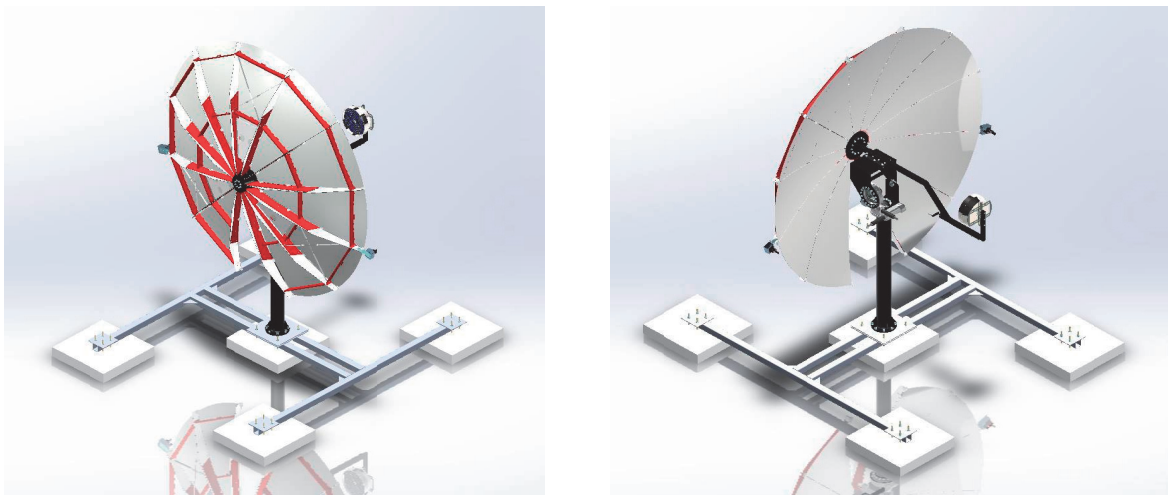
Развој соларног модула са параболичним концентратором је урађен на бази дугогодишњег прегледа литературе као и анализирања великог броја различитих решења. Циљ развоја оваквог типа параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења је повећање фактора концентрације (концентрационог односа), повећање ефикасности искоришћења соларне енергије и смањење цене добијене топлотне, расхладне или електричне енергије.

Рефлектујућа површина концентратора је направљена у облику вишесегментног параболоида (приказаном на слици 5.1). Сунчево зрачење које је паралелно оптичкој оси параболичног концентратора одбија се од површине вишесегментног параболичног концентратора/рефлектора и фокусира у уски регион која се назива фокус (живна област). Облик рефлектора је потпуно параболичан. Параболична површина соларног концентратора је добивена на бази једначине параболе и моделирања параметара у CAD пакету "CATIA V5 R20". Геометријски модел сегмената (латица) параболичног концентратора могуће конвертовати у делове квадратне Безиерове криве. На слици 5.2-лево приказан је 3D модел пројектованог система. На основу мастер калуца формиран је модел великог сегмента. Постављени захтеви у пројектовању соларног концентратора одређују границе прихватног угла и концентрационог односа, а самим тим и геометрију параболичне рефлектујуће површине, избор склопа апсорбера, избор материјала апсорбера итд. Приказани модел је сачињен од 11 идентичних трапезоидних сегмената (латица). На месту 12 сегмента постављен је носећи стуб који је тако позициониран да врши уравнотежење система приликом јаких оптерећења од ветра или саме тежине концентришућег система сунчевог зрачења (cantilever system).





Слика 5.1. Геометријски модел параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења



Слика 5.2. 3D виртуелни модел соларног параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења; (лево) - поглед са задње стране; (десно)- поглед с преда

Општа математичка једначина параболе дата је изразом испод:

$$x^2 + y^2 = 4 \cdot f \cdot z \quad (5.1)$$

Моhаmmadi и Mehrpooya [75] су истраживали спој микро гасне турбине са соларним параболичним концентратором. Према коначним резултатима, добивене су високе ексергетске перформансе, због тога што је употреба соларних концентратора довела до смањења потрошње горива за сагоревање. Lonі и сарадници [76] су тестирали употребу соларног параболичног концентратора са кавитетним пријемником

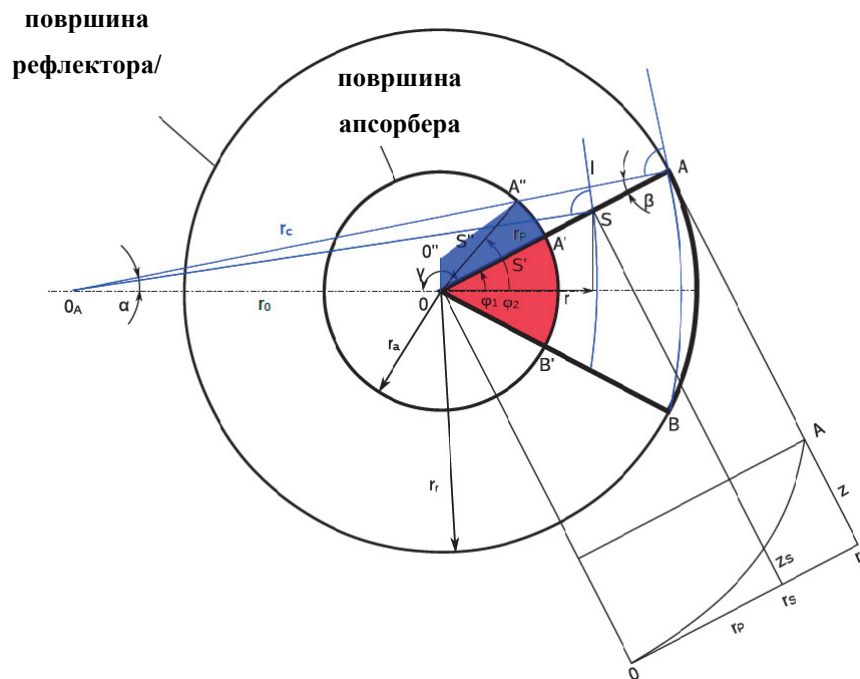
у Ранкиновом циклусу. Осим тога, употреба соларних параболичних концентратора у десалинизационим системима такође се може наћи у литератури. Овим се потврђује колико је широк дијапазон примене параболичних концентратора сунчевог зрачења. [77-78]. Урађен је велики број параметарских геометријских модела параболичних рефлектора на основу којих је касије употребом методе Monte Carlo за прорачун хода зрака закључено који облик (однос жижна даљина/пречник концентратора) параболичног концентратора даје најбоље резултате расподеле флукса упадног топлотног зрачења на површини апсорбера концентратора. Циљ параметризације јесте добијање параметарске формуле једног сегмента концентратора и површине апсорбера. На тај начин добијамо проширење области (поља) зрачења на површину апсорбера. Знајући да се апсорбер налази између концентратора и теоријског фокуса (теоријска жижна раван параболе), тежимо да пронађемо једначину закривљења параболичног сегмента тако да проширимо флукс упадног сунчевог зрачења у области топлотног апсорбера. Слика 5.3 показује ову идеју.

Дате су следеће променљиве:

- $r_r$     полупречник концентратора,
- $r_a$     полупречник површине апсорбера,
- $\varphi_1$     полу-угао сегмента концентратора,
- $\varphi_2$     полу-угао сегмента озраченог апсорбера,
- $f$     жижна даљина концентратора

Слика испод показује нормалан поглед на параболични концентратор и површину апсорбера изнад њега. Сунчево зрачење долази паралелно оптичкој оси концентратора. Област означена подебљаном линијом представља сегмент концентратор који осветљава (зрачи) на област апсорбера означену црвеним пољем. Свака тачка на сегменту рефлектује сунчев зрак на радијалној путањи до апсорбера, нпр. А је рефлектовано на А'. Уколико озрачени сегмент на површини апсорбера треба да има шири угао  $\varphi_2$  као што је приказано плавом зоном црвеног сегмента, А мора бити рефлектовано у А". То значи да закривљеност у тачки А мора бити прилагођено. Линија  $\overline{AA''}$  даје нову рефлексиону путању зрака. Њена путања у тачки А је нова тангента кривине сегмента концентратора у А. Њено проширење до линије симетрије сегмента до  $O_A$  даје полупречник нове кривине (плава линија). Закривљеност за било

коју другу тачку  $S$  на радијалном правцу  $OA$  дата је полупречником сегмента  $\overline{SO_A} = r_s$ .



**Слика 5.3.** Цртеж развоја формуле за закривљење сегмента кружног параболичног концентратора сунчевог зрачења

Да би се добио полупречник кривине  $r_c$  за дато  $r$  потребна је дужина једне стране  $00_s$  троугла  $0S0_s$ .

Из косинусне теореме, угао  $\beta$  може се одредити из троугла  $0A''A$ . Са  $\beta$  и  $\gamma$   $\alpha$  је одређен.

Из синусне теореме  $r_0$  и  $r_c(r)$  могу бити одређени:

#### ✚ Углови троугла за нову кривину (закривљење)

За израчунавање новог закривљења (радијуса кривине), углови троугла  $0A0_A$  су одређени.

$$\gamma = \pi - \varphi_1 \quad (5.2)$$

$$\beta = \arccos \left( \frac{r_r - r_a \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}{\sqrt{r_a^2 + r_r^2 - 2r_r r_a \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}} \right) \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned}\alpha &= \varphi_1 - \beta \\ \alpha &= \varphi_1 - \beta \\ \alpha &= \varphi_1 - \beta \\ \alpha &= \varphi_1 - \beta\end{aligned}\quad (5.4)$$

Li и његови сарадници [79] применили су добро познату нумеричку методу Monte-Carlo ray tracing за предвиђање/предикцију и одређивање расподеле флукса абсорбованог сунчевог зрачења на површину апсорбера концентришућег пријемника сунчевог зрачења. Резултати су показали да је најбоље решење (најуниформнији топлотни флукс) постиже са плитким полу елипсоидним обликом апсорбера са кавитетом истог облика као и апсорбер.

#### Полупречник нове кривине параболичног концентратора сунчевог зрачења

Радијус (полупречник) кривине параболичног концентратора може бити срачунат применом синусне теореме:

$$r_0 = r_r \frac{\sin \beta}{\sin \alpha \cos \varphi_1} \quad (5.5)$$

$$r_c(r) = r \frac{\sin \gamma}{\sin \alpha \cos \varphi_1} \quad (5.6)$$

#### Параметраске формуле за површину сегмента параболичног концентратора сунчевог зрачења

Параметри су:

$u$  је параметар за  $r$

$v$  је параметар за угао  $\alpha$

Функције за сегмент су:

$$f_x(u, v) = -r_0 + r_c(u) \cos v \quad (5.7)$$

$$f_y(u, v) = r_c(u) \sin v \quad (5.8)$$

$$f_z(u, v) = \frac{u^2}{4f \cos^2 \varphi_1} \quad (5.9)$$

Резултат ове параметарске површине више није кружно симетричан, то је тзв. “*free form concentrator*”.- Концентратор са геометријом слободне форме. Направљен је тасго фајл за нову геометријску форму сегмента концентратора у Прилогу 3 (make-quasiparabolic-segment-01.scm.).

**Табела 5.1.** Главни геометријски и оптички параметри параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења

Параметри	Вредност	Јединица
Пречник апертуре концентратора	3.8	[m]
Нето површина апертуре концентратора	10.28	[m <sup>2</sup> ]
Бруто површина апертуре концентратора	11.5	[m <sup>2</sup> ]
Укупна површина у развијеном облику	21.39	[m <sup>2</sup> ]
Коефицијент облика концентратора	f/D = 0.59	[-]
Интензитет директне компоненте сунчевог зрачења	DNI = G <sub>0</sub> = 800	[Wm <sup>-2</sup> ]
Коефицијент рефлективности концентратора	0.6-0.7	[-]
Теоријска жижна даљина	f <sub>теоријско</sub> = 2.26	[m]
Полупречник отвора у средишту R <sub>1</sub>	0.2	[m]
Полупречник концентратора R <sub>2</sub>	1.9	[m]
$\theta_{sun}$	$4.65 \times 10^{-3}$ или $0.27^0$	[rad]
Угао између оптичке осе и средишњег отвора $\psi_1$	5.06	[ <sup>0</sup> ]
Фактор облика f/D	0.59	
Ивични угао $\psi_2$	45.6	[ <sup>0</sup> ]
Дубина параболичног концентратора	0.399	[m]
Геометријски концентрациони однос CR <sub>g</sub>	1300	[-]
Оптички концентрациони однос CR <sub>opt</sub>	115	[-]
Материјал рефлектора	Мултиаминарна сегментна огледала - ПММА ХТ	[-]
Оптимално растојање апсорбера	2.075 - 2.10	[m]
Површина једног параболичног сегмента- латице	1,003	[m <sup>2</sup> ]
Тежина параболичног концентратора	270	kg

Параметри	Вредност	Јединица
Висина у сигурносном положају	3.2	[m]
Максимална брзина ветра при радним условима	90	km/h
Систем за позиционирање (Tracking system)	Двоосно праћење са фото отпорницима	[-]
Носећа конструкција	Композит- Алубонд	[-]

Једначина параболе се може представити и у цилиндричном координатном систему:

$$z = r^2/4f \quad (5.10)$$

Параболоид који настаје ротацијом ове параболе око у-осе има једначину у тродимензионалном простору:

$$y = \frac{x_1^2 + x_2^2}{4p} \quad (5.11)$$

Запремина тела које настаје ротацијом криве  $y = f(x)$  на интервалу  $[a,b]$  око  $x$ -осе.

$$V = \pi \int_a^b f^2(x) dx \quad (5.12)$$

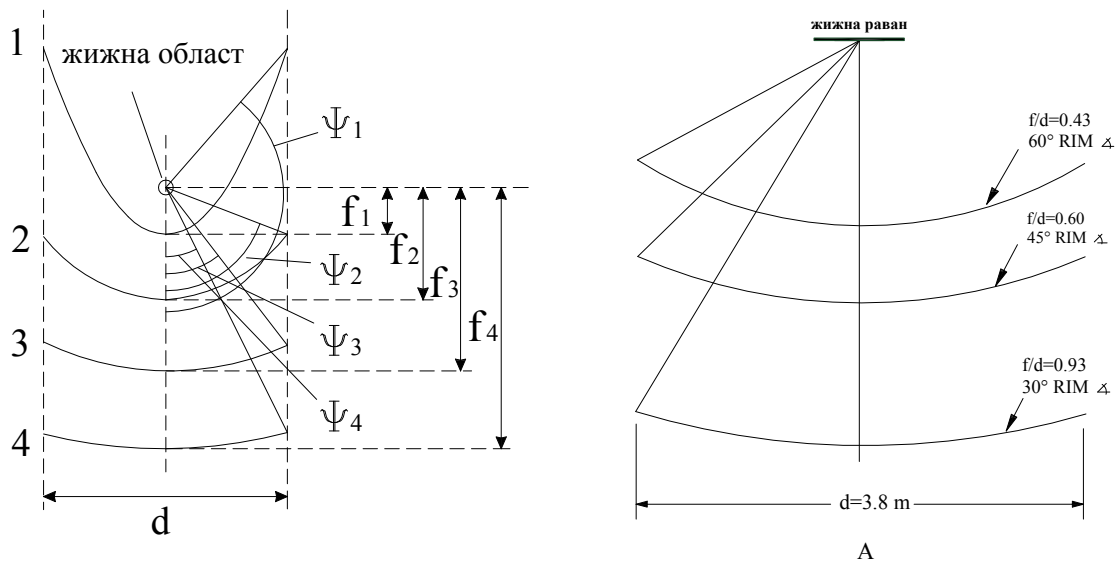
Укупна површина параболоида у развијеном облику се може написати као:

$$A_s = \int_0^{d/2} dA_s = \frac{8\pi f}{3} \left\{ \left[ \left( \frac{D}{4f} \right)^2 + 1 \right]^{3/2} - 1 \right\} \quad (5.13)$$

Можемо дефинисати следећи геометријски параметар који је јако важан приликом моделирања параболичних концентратора - фактор облика:

$$f/d = 4 \tan(\psi_{rim}^2)^{-1} \quad (5.14)$$

На наредним сликама се јасно види како се мења ивични угао  $\psi$  као и облик параболичне криве за константни пречник апертуре параболичног концентратора.



Слика 5.4. Промена ивичног угла у функцији жижне даљине

Поред тога висина (дубина) параболичног концентратора се такође може срачунати применом следећих израза:

$$H = \frac{R^2}{4F} = \frac{F}{16f^2}; F - H = \left( \frac{16f^2 - 1}{16f^2} \right) F \quad (5.15)$$

Ивични угао соларног параболичног концентратора је срачунат на основу израза (5.14) и износи  $45.6^\circ$ .

$$A_s = 4\pi f^2 \frac{\sin^2 \psi_{rim}}{(1 + \cos \psi_{rim})^2} \quad (5.16)$$

$\eta_0$  представља оптичку ефикасности настаје као производ  $\rho$ ,  $\alpha$  и  $\tau$ . Спектрална рефлектанса између 0.85 и 0.9 типична је за високо квалитетна огледала. Соларна апсорптанса  $\alpha$  селективне површине лежи у границама између 0.85 и 0.95. Наредна једначина може бити коришћена за апроксимативно одређивање оптичке ефикасности концентратора

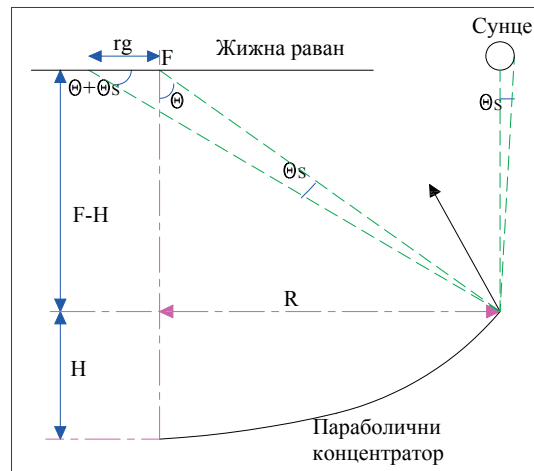
$$\eta_0 = \Gamma \alpha \tau \cos(\theta) = \frac{Q_a}{Q_s} \quad (5.17)$$

Упадни угао сунчевих зрака код параболичних концентратора је једнак нули,  $\cos(\theta) = 1$ .  $\Gamma$  је фактор хватања упадног сунчевог зрачења.

Генерално, угао  $\theta_s$  узима у разматрање природу сунчевог диска ( $4.7 \text{ mrad}$ ,  $0.27^\circ$ )

узима у обзир повећање грешке облика рефлектора, несавршеност спекуларне рефлексије огледала (латица), дифракцију светлости, грешке фокусирања у жижној равни, и њихово усклађивање, позиционирање између рефлектора (латица) и апсорбера. Овакве грешке се приказују као статистичке. Вредност  $\theta_s$  се процењује у опсегу између 7-10 mrad (0.4°-0.57°) узимајући у обзир нетачност и несавршеност површине рефлектора (огледала).

Слика 5.5. Шема рефлектовања сунчевог зрачења параболног концентратора



$$\tan(\theta + \theta_s) = \frac{r + R_g}{F - H} = \tan(\theta) \left( 1 + 2 \frac{r_g}{D} \right) \quad (5.18)$$

### 5.1.2 Развој параметарског геометријског модела соларног спирално попречно набраног топлотног апсорбера

Параметарски облик спирале у Декартовом координатном систему са полупречником спирале за параметар  $\varphi = 1$ :

$$f : \varphi \mapsto (r \cos \varphi, r \sin \varphi) = \begin{pmatrix} a \varphi \cos \varphi \\ a \varphi \sin \varphi \end{pmatrix} = a \begin{pmatrix} \varphi \cos \varphi \\ \varphi \sin \varphi \end{pmatrix} \quad (5.19)$$

Дужина спирале је од  $\varphi_0 = 0$  до  $\varphi$

$$L_{sp}(\varphi) = \frac{a}{2} \left[ \varphi \sqrt{1 + \varphi^2} + \ln \left( \varphi + \sqrt{1 + \varphi^2} \right) \right] \quad (5.20)$$

Профил набора спиралног апсорбера поред кружног облика може бити и синусна функција која је приказана у једначини:



$$\vec{n}_{sp}(v) = \begin{pmatrix} r_{sp}(v) * \sin(v) + v * r_{sp}(v) * \cos(v) \\ v * r_{sp}(v) * \sin(v) - r_{sp}(v) * \cos(v) \end{pmatrix} \quad (5.21)$$

представља нормални вектор површине спирале  $\vec{n}_{sp}$ , као и њена дужина  $|\vec{n}_{sp}|$ ,

$$|\vec{n}_{sp}(v)| = \sqrt{n_{sp_x}(v)^2 + n_{sp_y}(v)^2} \quad (5.22)$$

Дужина је коришћена да нормализује нормални вектор до 1, тако да је стандардна синусна функција приказана у овом решењу. Када се узме у обзир ротација спирале  $v_{ротација}$  онда се додаје следећа релација:

$$\vec{n}_{sp}(v) = \begin{pmatrix} r_{sp}(v) * \sin(v + v_{ротација}) + v * r_{sp}(v) * \cos(v + v_{ротација}) \\ v * r_{sp}(v) * \sin(v + v_{ротација}) - r_{sp}(v) * \cos(v + v_{ротација}) \end{pmatrix} \quad (5.23)$$

За наборане профиле изнад спиралне цеви апсорбера додају се профили синусних функција. Таласна функција има коначан облик:

$$\sin wave_{const.}(v) = r_{mean} + \alpha \sin\left(\frac{2\pi}{wavelength}(L_{sp}(v) - L_{sp}(start))\right) \quad (5.24)$$

Спирална геометрија израђена од цеви са попречним кружим наборима константног корака представља иновативно пројектно решење топлотног апсорбера са применом код параболичног вишесегментног соларног концентратора. Геометријски параметри анализирани Архимедове спирале су приказани у табели 5.2.

У свим нумеричким симулацијама, вредност апсорптивности горње површине нумеричког домена и површина цевних закривљених сегмената спиралног апсорбера је 0.9, што се може постићи у реалним условима коришћењем комерцијално доступних апсорптивних боја (Rugomark 2500, [157]). Вредност емисивности доње површине је 1.

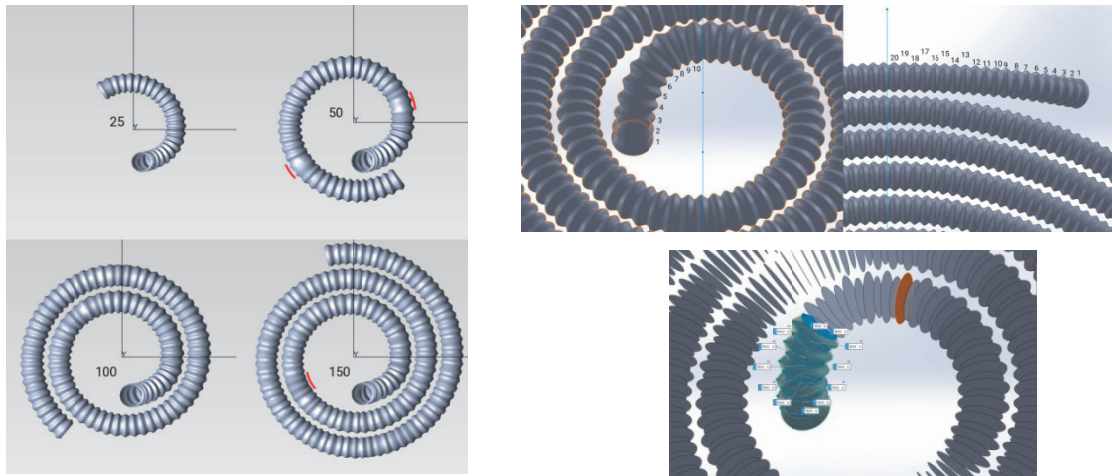
**Табела 5.2.** Геометријски параметри спиралног набораног топлотног апсорбера

$d_i$	9.3	[mm]	минимални унутрашњи пречник цеви
$d_o$	11.7	[mm]	максимални унутрашњи пречник цеви
$d_e$	12.2	[mm]	максимални спољашњи пречник цеви

$\delta$	0.25	[mm]	дебљина зида цеви
$R_{\min}$	25	[mm]	минимални полупречник спирале
$R_{\max}$	202	[mm]	максимални полупречник спирале
$p_0$	13.6	[mm]	корак спирале
$n$	13	[-]	број навојака спирале
$e$	1.2	[mm]	висина набора
$e/d$	0.129	[-]	релативна храпавост
$t$	10	[-]	број секција у једном навојку
$p_c$	4.2	[mm]	корак набора

На основу геометријских параметара приказаних у табели 5.2., креиран је 3D модел спиралног топлотног апсорбера. Први покушај био је да се направи 3D геометријски параметарски модел који ће касније бити по подвргнут оптичкој анализи. Урађен је велики број геометријских и оптичких модела али због сложености геометрије оптичка анализа није спроведена на најбољи могући начин. Због великог дискретизационог домена у оквиру оптичког модела у коме се налази параболични концентратор великих димензија и спирални наборани топлотни апсорбер са малим димензијама набора и површина између набора било је неопходно извршити прецизну нумеричку симулацију апсорпционих карактеристика набораних закривљених цеви апсорбера. Неопходно је мапирати флуks апсорбованог зрачења на тако малом домену спиралног набораног апсорбера у односу на рефлексиону површину концентратора сунчевог зрачења.

Процена утицаја геометрије наборане спирале на њене апсорпционе карактеристике је неопходна не само због срачунавања ефикасности топлотног апсорбера, већ је у разматраном случају неопходна како би се могла извршити прецизна калибрација нумеричког модела. Cohen и Grossman [80] проучавали су велики стационарни рефлектор направљен са малим трошковима израде. Овај рефлектор је сличан сферној чинији, док је апсорбер направљен од цилиндричног калема/соленоида офарбаног у црној боји како би апсорбовао што више рефлектованог сунчевог зрачења. Топлотни апсорбер поседује стаклени покривач унутар кога се налази вакуум како би се минимизирали топлотни губици.



**Слика 5.6.** Креирање сложене геометрије попречно набораног спиралног апсорбера параболичног концентратора сунчевог зрачења

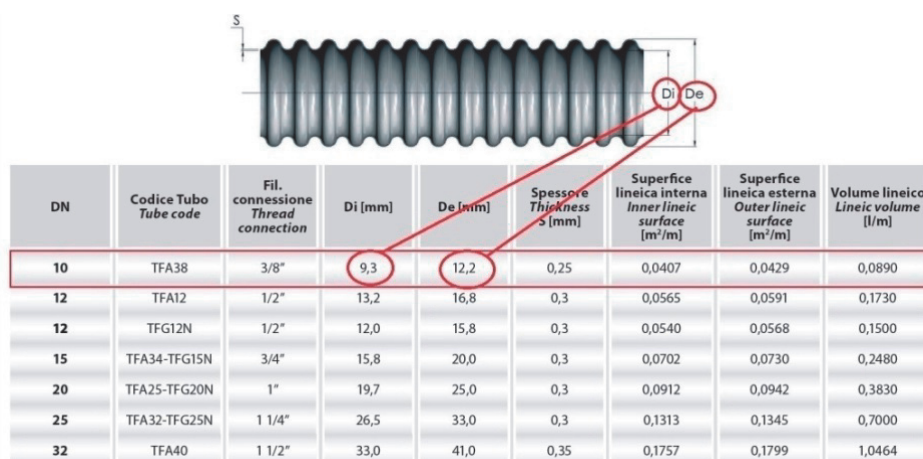
На наредној слици приказан је начин креирања 3D геометријског модела на бази генерисања великог броја набора (25-150) на спиралном апсорберу, али приликом увоза датотеке у симулационом програму долази до смањења резолуције набора, што се да видети са слике 5.6. (лево-црвена лучна линија).

Тестирани нумерички оптички модели нису дали добре резултате, јер већ након 150-ог набора, геометријски 3D модели праве глатке површине и деградирају реалну геометрију набораног апсорбера, што не даје реалну слику сложености апсорбујуће кружних набора површине топлотног апсорбера.

У овом поглављу је приказано нумеричко истраживање оптичких карактеристика параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења. Да би се направио добар нумерички оптички модел склопа концентратор - апсорбер, неопходно је креирати тачне и квалитетне геометријске моделе са тачним димензијама и обликом који пресликавају реалне објекте. Анализа и процена апсорпционих карактеристика набораних закривљених цеви изложених концентрисаном сунчевом зрачењу је сложена због конфигурације саме геометрије.

Поред геометријског 3D модела соларног параболичног концентратора потребно је креирати добар физички и геометријски модел топлотног апсорбера за опсег средњетемпературне конверзије сунчевог зрачења у топлоту. Главни циљеви који се постављају приликом пројектовања топлотног апсорбера дати су испод:

- да апсорбује што је више могуће сунчевог зрачења које рефлектује концентратор сунчевог зрачења;
- да максимизира ефикасност коефицијента прелаза топлоте ;
- креирати дизајн апсорбера који ће бити у стању да обавља функцију у широком опсегу температура;
- компактан дизајн што обезбеђује минимално оптерећење на конструкцију концентратора;
- осмислити и креирати једноставно конструктивно решење које ће обезбедити јефтину израду и одржавање.



Слика 5.7. Профил попречно наборане цеви праве деонице [81]

Приликом избора техничког решења топлотног апсорбера, спроведен је велики број анализа различитих решења са оптичке тачке гледишта. Пројектовано је и анализирано неколико геометријских облика кавитета са различитим облицима апсорбера, различитих димензија апсорбера као и материјала апсорбера. Иако савршена рефлексија параболоида рефлектује паралелне зраке у једној тачки, сунчеви зраци нису потпуно паралелни (јер сунце није тачкасти извор), такође сви реални концентратори нису идеално обликовани. Због тога је концентрисано зрачење у тачки расподељено на малу област са највећим специфичним флуksom топлотног зрачења у центру, опадајући експоненцијално ка ивици. Апертура топлотног апсорбера је оптимизирана да буде довољно велика како би примила највише концентрисаног сунчевог зрачења, али довољно мала да ограничи зрачење и губитке конвекцијом и ре емисијом. На основу резултата нумеричког истраживања изабрано је три модела

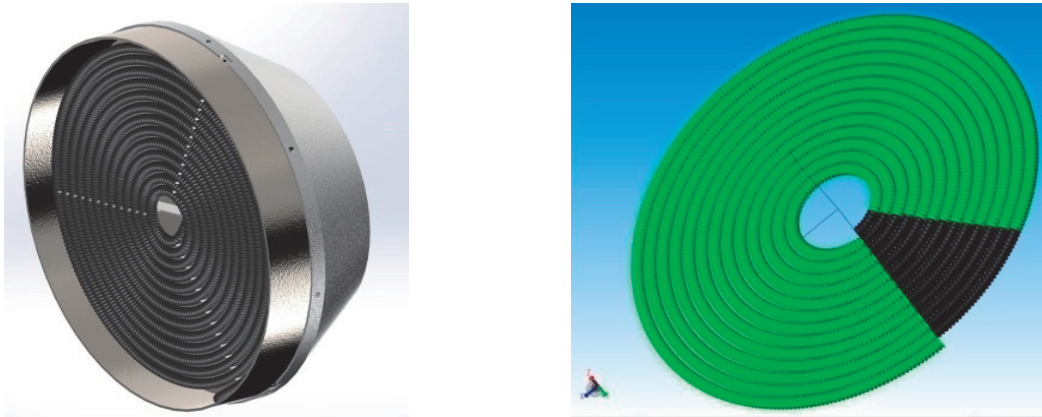
топлотних апсорбера који ће бити анализирани, док је један од њих и физички направљен и потврђен експерименталном испитивању у реалним условима. У овом истраживању биће приказана, пројектована и анализирана три модела топлотних апсорбера: са цилиндрично-конусним кавитетом и глатком спиралном цеви апсорбера, са спиралним топлотним апсорбером са попречно набораним цевима, и апсорбера са кружним диском. Кружни равни апсорбер дебљине 5mm је постављен испред кавитета и направљен од нерђајућег челика AISI 304. Диск је офарбан црном бојом високе апсорптивности. Утицај набора на апсорпциона својства могу се проценити само са глатком цеви, због чега су апсорпционе карактеристике глатке цеви такође приказане у овом истраживању. Глатка цев са којом се врши поређење је изабрана да њен спољашњи пречник буде једнак максималном спољашњем пречнику наборане цеви како би се теоријски могла изградити глатка Архимедова спирала идентичних геометријских параметара. Један од основних геометријских параметара које треба узети у обзир приликом оптичког моделирања јесте пречник апертуре соларног апсорбера концентратора сунчевог зрачења. Пречник концентратора је изабран на бази примене Monte Carlo методе прорачуна хода зрака, где је показано који геометријски и оптички параметри задовољавају функцију циља оптимизације параболичног система (униформан флуks зрачења на површини апсорбера, висок коефицијент оптичке ефикасности, висока вредност фактора прихватања концентрисаног зрачења, снага зрачења, специфични флуks апсорбованог зрачења (ирадијанса)).

Креирање геометријског тродимензионалног модела соларног апсорбера са попречно набораном цеви је јако сложен процес. Иако је могуће на неки начин креирање 3д модела, озбиљан проблем настаје када треба направити оптички модел и извршити предпроцесирање нумеричког модела. Сложеност геометријског модела спирално набораног топлотног апсорбера се огледа у сложености геометријског облика и површина које је веома тешко дефинисати у простору. Архимедова спирала са кораком приближно једнаким спољашњем пречнику наборане цеви је одабрана између различитих типова спирала како би се постигао најповољнији однос између активне размењивачке површине и укупне запремине топлотног апсорбера, чија је геометрија описана једначинама (5.25) и (5.26)

$$x(t) = \left( 0.4 - 0.35 \cdot \frac{t}{26 \cdot \pi} \right) \cdot \cos(t) \quad (5.25)$$

$$y(t) = \left( 0.4 - 0.35 \cdot \frac{t}{26 \cdot \pi} \right) \cdot \sin(t) \quad (5.26)$$

Дизајнирање 3D спирално набораног апсорбера са попречним наборима у САД софтверима је веома захтеван задатак, зато се приступило развоју математичког параметарског геометријског модела Архимедове спирале и имплементација модела у Scheme макро језик. Параметарски математички модел је писан у SageMath програмском пакету. Касније је изворни код импортован у Scheme Macro Editoru. Scheme макро језик је LISP ([Locator/Identifier Separation Protocol](#)) тип програмског језика коришћен у оптичком софтверу TracePro за проширење стандардних могућности (за напредније кориснике) и решавање високо специфичних/специјализованих нумеричких проблема. Scheme макро језик се користи код развоја система вештачке интелигенције. Развијени програм применом Scheme макро језика даје могућности аутоматског дизајнирања различитих геометријских облика и димензија спиралних набораних апсорбера концентрисаног зрачења. Програмски језик у сваком тренутку може изгенерисати нови геометријски модел и укључити у симулационом моду софтвера. Направљен је значајан допринос у делу пројектовања сложених конфигурација и аутоматизованог процесирања комплексних закривљених површина. TracePro оптички софтвер може у сваком тренутку да генерише геометрију са екстензијом "scm" и аутоматски повеже са неким од текстуалних едитора (NotePad ++). У циљу добијања боље апсорпције сунчевог зрачења могуће је израдити различите облике наборане спиралне цеви: параболични облик, конусни облик, цик-цак облик, трапезни облик, итд. што ће касније у делу оптимизације бити јако корисно.



**Слика 5.8.** Геометријски модел топлотног апсорбера (лево); увећани приказ цевних исечака спиралног попречно набораног апсорбера (десно)

Пољу специфичног флуksа концентрисаног сунчевог зрачења је изложена само половина укупне површине цеви разматраног апсорбера. Решавање нумеричког оптичког модела за целу површину спиралног апсорбера је немогуће не само због огромних компјутерских ресурса, већ и због непрецизности и немогућности решавања једначина рефлексије, апсорпције, расејања, дифракције, рефракције у тако сложеном дискретизационом домену. У циљу постизања високе прецизности, геометријски модел је направљен тако да је површина спиралног набораног апсорбера концентратора сунчевог зрачења подељена на 130 секција (закривљених деоница- слика 5.8 десно)-исечака спиралног апсорбера, где је сваки навојак подељен на једнак број секција. Број секција на сваком навојку је 10, што се такође може променити у оквиру параметарског геометријског модела (The Scheme macro language model). Ови одсечци се карактеришу различитим вредностима закривљења  $\delta$  и представљају параметре различитих навојака спиралне цеви апсорбера. У оквиру Макро параметарског модела соларног спиралног апсорбера са попречним наборима могуће је мењати све геометријске параметре.

Да би се испитао утицај геометријских карактеристика на расподелу специфичног флуksа апсорбованих зрачења у спиралном набораном апсорберу концентрисаног зрачења вршена је нумеричка параметарска анализа. Разматрано је више десетина различитих модела. Разматрани су модели где се сваки од 13 навојака дели на 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12 исечака по навојку. Затим је направљен макро модел где је вариран корак спирале, висина набора, минимални полупречник, максимални полупречник спирале, број исечака у једном навојку, итд. Параметарски модел је направљен применом SageMath софтверског пакета (направљена скрипта) где је

извршење скрипте урађено у Scheme маско језику. Комплетан развој параметарског геометријског модела биће дат у прилогу дисертације.

### 5.1.3. Оптички модел соларног концентришућег система и нумеричко решавање

Познавање расподеле специфичног флукса апсорбованог зрачења на површини апсорбера, оптичке ефикасности соларног концентришућег система, фактора прихватања рефлектованог зрачења, снаге зрачења могуће је срачунати у оквиру оптичког модела. Познавање расподеле флукса апсорбованог зрачења на површини апсорбера неопходно је због одређивања вредности коефицијента прелаза топлоте унутар самог апсорбера (гранични услов топлотне анализе). Наравно постоји велики број метода за предикцију сунчевог топлотног зрачења (њено рефлектовање, емитовање, апсорбовање, трансмисију, расејање) као и израчунавање вредности интензитета размењене количине топлотног зрачења. Стандардни поступак експерименталног одређивања расподеле специфичног флукса зрачења у (фокусној) жижиној равни параболичног концентратора састоји се од поступка тзв. мапирања коришћењем Gordon-овог флуксметра или применом одређених powermeter-a (Ophir Ltd), који омогућују мерење снаге зрачења на површини апсорбера. Такође је могуће расподелу флукса концентрисаног зрачења измерити применом (CCD) камере и Ламбертовог диска (апсорбер), где се могу срачунати вредности густине флукса зрачења појединих тачака (thermal imagers) [82].

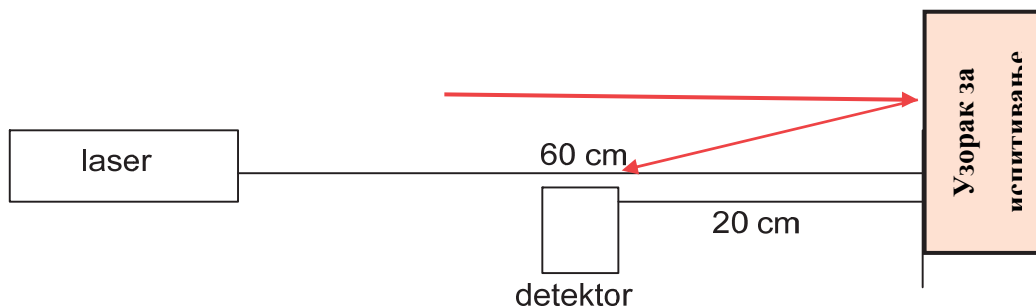
Због тога је расподела специфичног флукса (ирадијанса) апсорбованог и упадног зрачења на сложеној површини као што је површина набораног спиралног топлотног апсорбера одређена нумеричком интеграцијом. Одабир нумеричких метода је извршен на основу најбољих примера у литератури као и тестирањем различитих методологија и алгоритама који су показали најбоље резултате у области моделирања, симулације и оптимизације соларних концентришућих система.

У оквиру овог истраживања направљен је оптички математички модел. Оптички модел је постављен на основу физичког модела.

Оптичка анализа параболичног прототипа концентришућег пријемника сунчевог зрачења је спроведена применом Monte Carlo методе прорачуна хода зрака у оквиру комерцијалног софтверског пакета *TracePro 7.4.2, Lambda Research Corporation, САД*. На основу 3-4 узорка чија су мерења коефицијента рефлективности спроведена изабран



је материјал фирме Turplex SRB D.O.O. Наравно, да би смо користили још квалитетнију рефлексиону површине концентратора потребно је купити специјализовани материјал високе рефлективности (0.92-0.95), чија је цена јако висока за наше услове (120-160€/m<sup>2</sup>). Коефицијент рефлективности огледаласте површине вишесегментног рефлектора је приказан у наредној табели. Материјал рефлектора је PMMA XT Altuglas (полиметилметакрилат) са превлаком огледала дебљине 3mm - 35€/m<sup>2</sup> (оксиди сребра). Мерење коефицијента рефлективности је извршено у Лабораторији Института за Физику. Мерење не извршено применом ласерског поинтера фирме *Ophir Optronics solutions Ltd* Мерни инструмент је *NOVA handheld laser power meter & energy meter*. Глава за мерење је *Standard Photodiode sensor PD300*. За нас би било најинтересантније да коефицијент рефлективности расте како расте таласна дужина и да буде највећи у ИС делу спектра.



Слика 5.9. Шема мерења коефицијента рефлексије равног огледаластог узорка

Табела 5.3. Мерење коефицијента рефлексије огледала параболичног концентратора

	Таласна дужина [nm]		
	405	530	630
Упадно зрачење [mW]	6.1	31.2	0.60
Рефлектовано зрачење [mW]	5.3	24.7	0.47
Коефицијент рефлексије [%]	86.9	79.2	78.3

Узорак није за соларну технику већ за расвету јер има највећу рефлексију на почетку видљивог спектра на најмању рефлексију на крају видљивог спектра. Та рефлексија у ИС области ће бити још мања. У оквиру овог поглавља приказана су три различита оптичка модела и резултати спроведених нумеричких симулација. Нажалост нисмо имали ласерски поинтер који зрачи у ИС (инфрацрвеној области) и то не можемо

да потврдимо мерењима али на основу ових мерења то очекујемо. Између великог броја анализираних решења изабрали смо три модела:

- Соларни апсорбер са кружним диском у апертури,
- Соларни апсорбер са глатком спиралном апсорберском цеви у цилиндрично конусном кавитету са секундарним рефлексивним површинама,
- Соларни апсорбер са спиралном попречно - набораном апсорберском цеви у цилиндрично конусном кавитету са секундарним рефлексивним површинама.

На основу извршених нумеричких симулација изабрано решење је подвргнуто детаљној анализи применом Monte Carlo стохастичке методе хода зрака као и оптимизацији геометријских и оптичких параметара у циљу добијања униформне расподеле флуksа апсорбованог зрачења (фактора униформности), максималне оптичке ефикасности, фактора хватања.

Јединични вектор рефлектованог зрака/зрачења је:

$$\vec{r}_{refl} = \vec{r}_{inc} - 2(n \cdot \vec{r}_{inc})n \quad (5.27)$$

Ray Tracing методологија копира реалну интеракцију фотона снопа сунчевих зрака са пријемном површином рефлектора и ресивера.

Упадно сунчево зрачење на апертури параболичног концентратора може достићи (досегнути) апсорбер/ресивер директно или једноструком или вишеструком рефлексивном у току самог процеса рефлексивне на унутрашњим површинама цилиндрично-конусног кавитета. Наравно део зрака се губи са површине концентратора, на тај начин укупно рефлектовано зрачење не пада на површину жишне равни већ дифундује у атмосферу што јесте недостатак не спекуларне површине концентратора. Таква појава се назива расејање/расипање или "*scattering*". На тај начин долази до расипања сунчевог зрачења са површине концентратора у свим правцима.

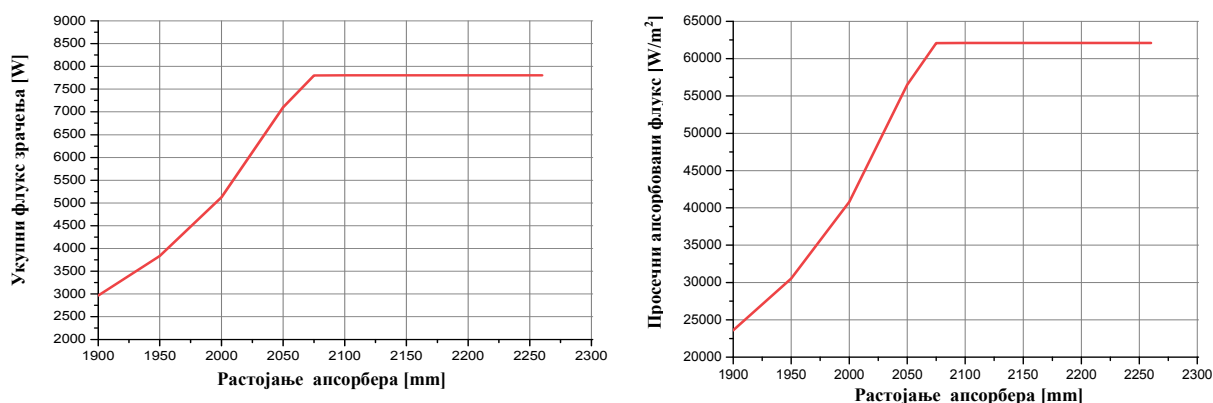
#### **Расподела специфичног флуksа апсорбованог сунчевог зрачења у жишној равни кружног топлотног апсорбера**

Први оптички модел је спроведен у циљу апсорбовања максималне количине рефлектованог зрачења - употребом кружног диска пречника 400 mm и дебљине 5mm. Кружни диск је постављен у кавитету. У овом случају имамо минималне губитке рефлектованог и расејаног зрачења.

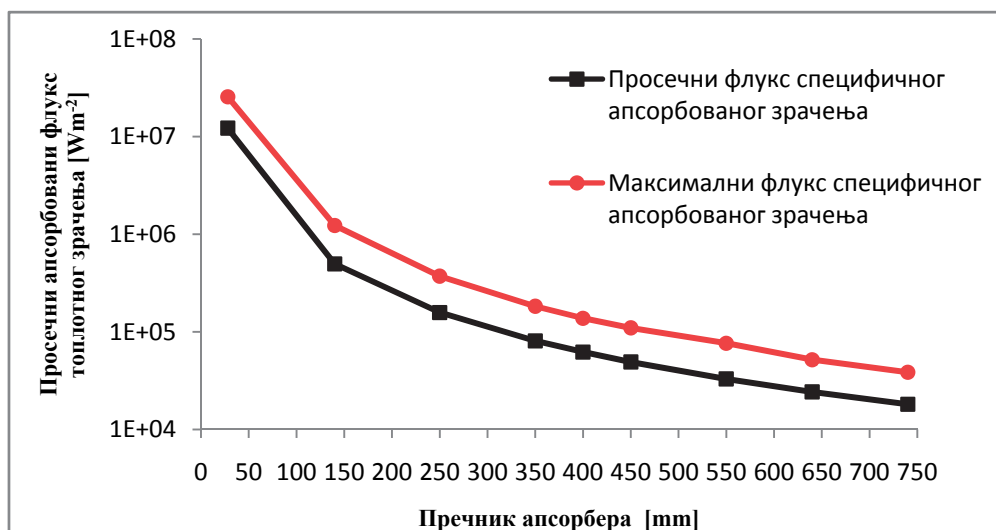
Први корак у нумеричкој анализи јесте одређивање теоријског фокуса- места где је највећи специфични флуks апсорбованог зрачења (ирадијанса) односно места максималне концентрације. Моделирани соларни параболични концентратор има теоријски фокус на растојању од 2260mm. Применом несеквенцијалне методе хода зрака пречник теоријског жаришног места (фокуса) је прорачунат на 28mm. Просечна вредност специфичног флуksа апсорбованог зрачења на тако малој области је јако висока и износи  $1.21 \times 10^7 \text{Wm}^{-2}$ . Укупни флуks (снага апсорбованог зрачења) на површини апсорбера 8220.8W. Максимална вредност густине флуksа зрачења на површини теоријског фокуса је јако висока и износи  $2.56 \times 10^7 \text{Wm}^{-2}$ .

Постављање реалног топлотног апсорбера на месту теоријског фокуса нема смисла јер је јако мала површина апсорпције и немогуће је у инжењерској пракси направити тако мали апсорбер. Зато је потребно оптимизовати положај апсорбера као и пречник апсорбера који ће задовољити услове истраживања у реалном инжењерском окружењу. За тако мале пречнике апсорбера генерисаће се јако високе температуре које је јако тешко апсорбовати било којим радим медијумом. Из тог разлога спроведено је неколико нумеричких симулација у циљу одређивања оптималне позиције топлотног апсорбера као и његове величине. У оквиру нумеричких симулација, изабран је равни кружни апсорбер због краћег и једноставнијег нумеричког модела као и краћег времена процесирања. Изабран је пречник кружног апсорбера од 400mm. Резултати нумеричких симулација приказаних на следећим дијаграмима показују да је растојање апсорбера променљива, док је геометрија соларног концентратора константна. Варирањем растојања између од 1900m до 2300mm са кораком од 50mm добијени су следећи резултати. На слици 5.10. приказана је зависност укупног флуksа (снаге зрачења) и специфичног флуksа апсорбованог зрачења (ирадијанса) од растојања апсорбера. Са дијаграма се може видети да укупни флуks зрачења расте до неких 2075mm, а да се затим асимптотски приближава некој константној вредности око 8000W. Исти је случај и са средњом вредношћу специфичног флуksа апсорбованог зрачења на површини апсорбера. На основу спроведених многобројних Monte Carlo Ray - tracing симулација и обрадом резултата симулације дошли смо до следећих графичких зависности између геометријских и оптичких карактеристика параболичног концентратора и топлотног апсорбера кружног

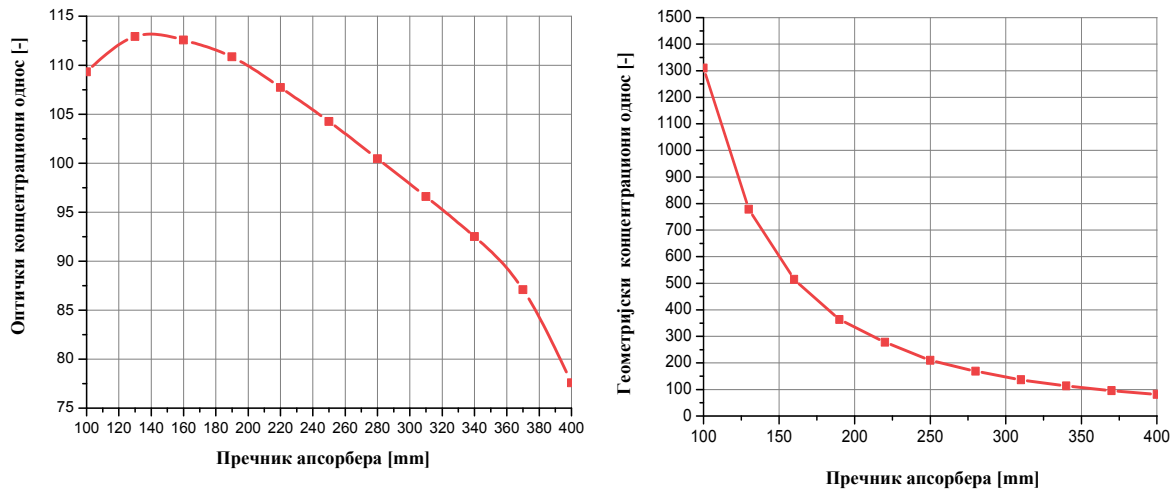
облика. Овај нулти случај је послужио за одређивање меродавног оптималног растојања соларног рисивера (2075-2100mm) као и пречника апертуре рисивера/пријемника при којима добијамо високу вредност фактора прихватања концентрисаног зрачења као и укупну површину озрачености тоplotног апсорбера/пријемника. Величина апсорбера је дефинисана на бази захтеваног оптичког концентрационог односа као и захтеване снаге зрачења коју смо желели да постигнемо (3-10kW), а да притом имамо минималне оптичке и термичке губитке.



Слика 5.10. Укупни и специфични флуks апсорбованог зрачења (ирадијанса) у ф-ји положаја кружног тоplotног апсорбера



Слика 5.11. Максимална и просечна вредност специфичног флуks апсорбованог зрачења у ф-ји пречника кружног тоplotног апсорбера

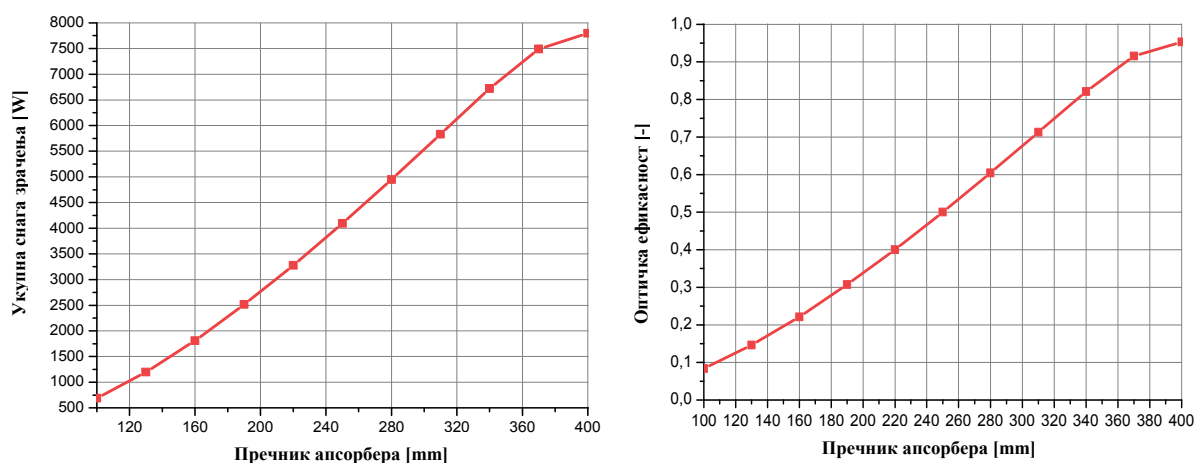


**Слика 5.12.** Оптички и геометријски концентрациони однос у  $\phi$ -ји пречника кружног топлотног апсорбера

Након успешног одређивања оптималне позиције апсорбера сунчевог зрачења, следећи корак је одредити оптимални пречник кружног апсорбера. Спроведен је велики број нумеричких симулација са променљивим вредностима пречника апсорбера (од 100-400mm), као и кораком од 20 mm. Излаз из сваке нумеричке симулације јесте укупни флуks зрачења као и просечни специфични флуks апсорбованог зрачења. На слици 5.14 (лево) приказани су односи оптичких и геометријских концентрационих односа у функцији пречника апсорбера. Оптички концентрациони однос соларних параболичних концентратора представља компромис између њихових оптичких и термичких перформанси. Оптимални оптички концентрациони однос параболичног концентратора за пречник апсорбера од 400 mm је 77.86. Слика 5.14 (десно) приказује геометријски концентрациони однос. Оптимална вредност геометријског концентрационог односа је 81.84 за пречник кружног апсорбера од 400mm.

Приликом моделирања упадног флуksа сунчевог зрачења на површину апертуре рисивера односно површину топлотног апсорбера, расподела флуksа у жижној равни није униформна због многих неидеалности који настају услед стохастичких - случајних и не-случајних грешака у оквиру оптичких модела. Угао под којим падају зраци са сунчевог диска  $\theta_s$  износи 4.65mrad. То је нормална расподела интензитета сунчевог зрачења са стандардном девијацијом  $\mu$ . Са слике 5.10 се јасно види да је оптимално растојање од темена параболичног концентратора до кружног апсорбера 2075mm. На том растојању укупни флуks зрачења је прорачунат на 7859.7W, док је просечни

специфични флуks апсорбованог зрачења  $62545\text{Wm}^{-2}$ . Са дијаграма 5.10 се јасно види да долази до значајног пораста (1900mm до 2075mm) како укупног флуksа тако и просечног специфичног апсорбованог флуksа. Оптимални пречник апсорбера на растојању од 1900 mm је 740 mm. На оптималном растојању од 2075 mm оптимум пречника апсорбера је 400 mm, тако да на тој позицији укупни флуks и специфични просечни флуks апсорбованог зрачења имају оптималне вредности. На слици 5.11 приказане су зависности максималног специфичног флуksа сунчевог зрачења као и просечног флуksа зрачења од пречника апсорбера. Треба имати у виду да је овде ординатна оса логаритамска ( $\log_{10}$ ) скала. Ово је неопходно применити са становишта великих разлика између вредности максималне и просечне ирадијансе. Дабо и сарадници [83,84] у две веома интересантне сличне студије [83-84] испитивали су три различите геометријске конфигурације; цилиндрични кавитет, конусни и сферни. У сваком од три случаја, хеликоидна цев је коришћена са унутрашње стране кућишта рисивера у циљу апсорбовања концентрисане сунчеве енергије на ефикасан начин.

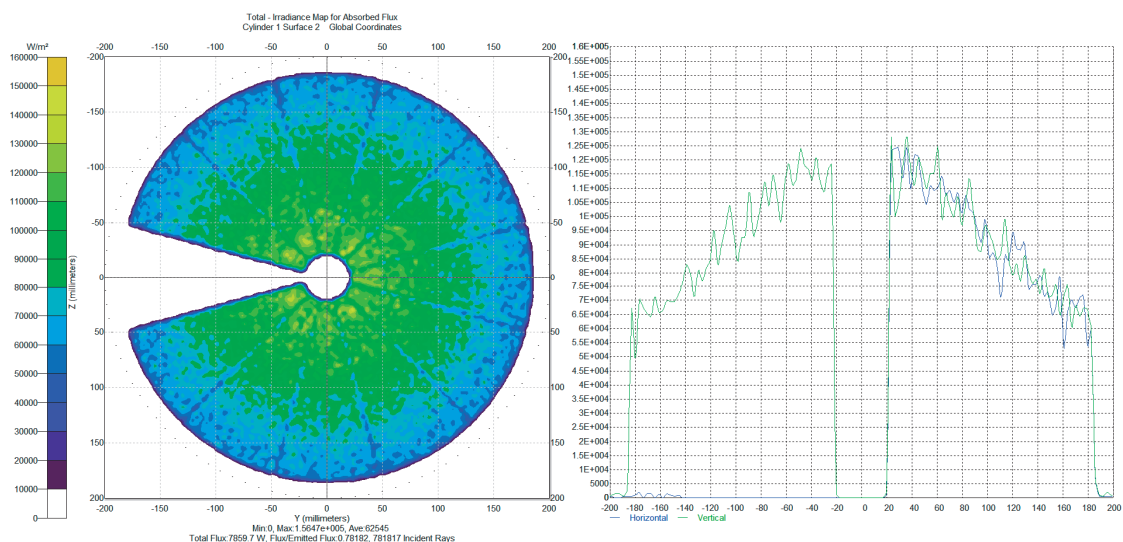


Слика 5.13. Укупни флуks зрачења и оптичка ефикасност у ф-ји пречника кружног апсорбера

Слика 5.13 (лево) приказује укупну снагу оптичког зрачења у функцији пречника апсорбера. Изабран је корак пречника 40mm. Само директно зрачење које доспе до равни апертуре концентратора бива концентрисано, док дифузно зрачење заврши у свим правцима као расејано зрачење. Слика 5.13 (десно) приказује зависност оптичке ефикасности од пречника топлотне апсорбера. Рисивер/апсорбер топлотног зрачења са већим пречником апертуре прикупља више упадног рефлектованог сунчевог зрачења, тако да укупни флуks апсорбованог сунчевог зрачења на површини

апсорбера и оптичка ефикасност параболичног концентришућег пријемника имају веће вредности. То је један од разлога зашто смо изабрали рисивер/апсорбер већег пречника. Максимална вредност оптичке ефикасности за параболични концентришући пријемник/апсорбер пречника 400 mm је око 0.90.

Усвојено је оптимално растојање кружног апсорбера од темена параболичног концентратора 2075 mm. На основу параметарске анализе применом Monte Carlo несеквенцијалне методе хода зрака дошли смо до закључка да је растојање 2075-2100 mm оптимално растојање. Све унапред спроведене нумеричке симулације различитих геометријских концепата соларних апсорбера ће бити са изабраним оптималним опсегом растојања.



**Слика 5.14.** Расподела флуksа апсорбованог зрачења на кружном апсорберу пречника 400 mm

На основу приказа модела, очигледно је да је већи флуks зрачења на апсорберу већег пречника (400mm) 7859W, просечни флуks - ирадијанса  $62545\text{Wm}^{-2}$ , фактор прихваћеног зрачења 0.78, док је оптичка ефикасност 0.94. Пошто је  $r_g$  полупречник апертуре рисивера/апсорбера неопходан да прикупи сво инцидентно (упадно) рефлектовано сунчево зрачење по Гаусовој расподели, полупречник апертуре је једнак трострукој стандардној девијацији која представља 99% прикупљене снаге концентрисаног сунчевог зрачења.

## ■ Расподела флуksа апсорбованог зрачења у спиралном глатком топлотном апсорберу

С обзиром да је само половина укупне површине спиралног апсорбера изложена концентрисаном зрачењу, очигледно је да се јавља изразито варирање специфичног флуksа упадног зрачења по обиму цевног апсорбера. Енергија апсорбована на површини је функција површине цеви пројектоване нормално на правац вектора концентрисаног зрачења. За разлику од класичног апсорбера, апсорбер концентрисаног зрачења може, уз помоћ рефлектора (секундарних површина), апсорбовати дозрачено зрачење и својом горњом и доњом површином. Укупно апсорбовано зрачење  $I_d$  ( $W/m^2$ ) од стране ДОП-а једнако је збиру апсорбованог зрачења од горње  $I_{dg}$  и доње површине  $I_{dd}$  његовог апсорбера . укупно апсорбовано зрачење на површину топлотног апсорбера једнако је збиру рефлектованог (директно + дифузно ) зрачења које се дозрачује на горњу површину услед секундарне рефлексије од зидова кавитета и оног које се директно рефлектује на доњу површину апсорбера од стране параболичног рефлектора:

$$I_d = I_{dg} + I_{dd} = I_{dgd\text{ir}} + I_{dgd\text{if}} + I_{dd\text{d}\text{ir}} + I_{dd\text{d}\text{if}} \quad (5.28)$$

$$I_{dgd\text{ir}} = I_{kgd\text{ir}} = (\tau\alpha)_{\text{dir}} \cdot H'_{\text{dir}} \cdot \frac{\cos(i)}{\sin(\beta)} \quad (5.29)$$

Директно зрачење дозрачено на доњу површину апсорбера  $H'_{dGdd\text{ir}}$  ( $Wm^{-2}$ ) зависи од карактеристике рефлектујуће површине као и положаја рефлектора у односу на пријемник. Другим речима, поменуто зрачење сразмерно је коефицијенту рефлексије рефлектора  $\rho(-)$ , упадном углу рефлектованог зрака  $i_r$  (rad) и величини површине озрачености ДДА  $A_{ozr}$  ( $m^2$ )

$$I_{dd\text{d}\text{ir}} = (\tau\alpha)_{\text{dir}} \cdot \rho \cdot H'_{\text{dir}} \frac{\cos(i_r)}{\sin(\beta)} \cdot \frac{A_{ozr}}{A_{dd}} = \eta_0 \cdot Q_s = A_{ap} \cdot DNI \cdot \lambda \rho \alpha \tau \gamma \cos(\theta) \quad (5.30a)$$

$$I_{dd\text{d}\text{if}} = (\tau\alpha)_{\text{dif}} \cdot \rho \cdot H'_{\text{dif}} \cdot \frac{A_r \cdot F_{rp}}{A_{dd}} \quad (5.30b)$$

$$\gamma = \int_{-\infty}^{\infty} d\theta F(\theta) \frac{1}{\sqrt{2\Pi\sigma_{tot}}} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma_{tot}^2}\right) \quad (5.30c)$$



Као и код директног зрачења, и дифузно зрачење пропорционално је коефицијенту  $\rho$ .

У горњој једначини  $A_{dd} = A_{dg} = A_d$  ( $m^2$ ) представља површину горњег (доњег) дела апсорбера. Дифузно зрачење дозрачено на доњу површину апсорбера дефинисано је под претпоставком да рефлектор изотропно рефлектује долазеће дифузно зрачење. Зато је неопходно одредити фактор облика - фактор прихватања  $F_{rp}$  (-), параметар који указује на то колики део зрачења, које бива рефлектовано са целе површине рефлектора  $A_r$  ( $m^2$ ), доспева на доњу површину апсорбера (кавитет).

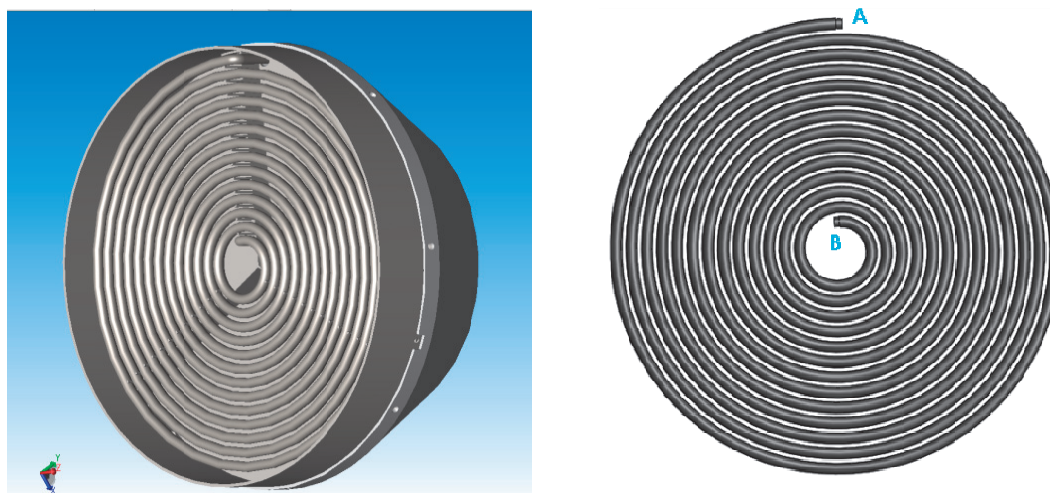
Глатка цев са којом се врши поређење је изабрана тако да њен спољашњи пречник буде једнак максималном спољашњем пречнику наборане цеви, како би се теоретски могла израдити глатка Архимедова спирала идентичних геометријских параметара.

**Табела 5.4.** Геометријски параметри глатке Архимедове спирале апсорбера

Архимедова глатка спирала топлотног апсорбера концентрисаног зрачења			
$d_i$	11.7	[mm]	Унутрашњи пречник цеви
$d_0$	12.2	[mm]	Спољашњи пречник цеви
$\delta$	0.25	[mm]	Дебљина зида цеви
$R_{min}$	25	[mm]	мин. полупречник спирале
$R_{max}$	202	[mm]	макс. полупречник спирале
$p_0$	13.6	[mm]	корак спирале
$n$	13	[-]	број навојака спирале
$x(t) = \left( 0.4 - 0.35 \cdot \frac{t}{26 \cdot \pi} \right) \cdot \cos(t)$			
$y(t) = \left( 0.4 - 0.35 \cdot \frac{t}{26 \cdot \pi} \right) \cdot \sin(t)$			

Изрази у табели представљају једначине спиралне геометрије у  $\phi$ -ји бездимензионог параметра  $t$  који се креће у границама од 0 до  $26\pi$  ( $2\pi \times 13$  навојака спирале). Vellos и сарадници [85] пројектовали су и истраживали иновативни соларни параболични концентратор са сферним апсорбером. У овом истраживању, апсорбер је шупља сфера у чијој унутрашњости се налази вода као радни флуид. Сферни апсорбер

је повезан са две цеви, које обезбеђују улаз и излаз флуида/воде. Слој изолације је постављен са свих страна осим са доње стране полусфере топлотног апсорбера. Ова конфигурација припада веома једноставним и јефтним концентришућим пријемницима сунчевог зрачења који задовољавају потребе генерисања средњих температура. Тао и његови сарадници [86] су истраживали карактеристике вертикално потављеног цилиндричног апсорбера са фазно променљивим материјалом. У недавној студији, Zhu и сарадници [87] испитивали су запремински пријемник/апсорбер са применом код параболоидних соларних концентришућих система. Przenzak и сарадници [88] истраживали су иновативни соларни параболоидни концентратор са два оптичка елемента и закривљеним топлотним апсорбером у циљу повећања количине апсорбоване концентрисане енергије зрачења. Соларни рефлектор се састоји од две параболне површине са две различите жижне даљине чиме се омогућава униформност флукса апсорбованог зрачења на благо закривљеној површини кавитета/апсорбера. Затим су истраживали униформност температурског поља на површини апсорбера на основу мапе флукса апсорбованог зрачења који је добијен применом статистичких метода. Затим су развили нумерички модел преноса топлоте конвекцијом, кондукцијом и зрачењем.

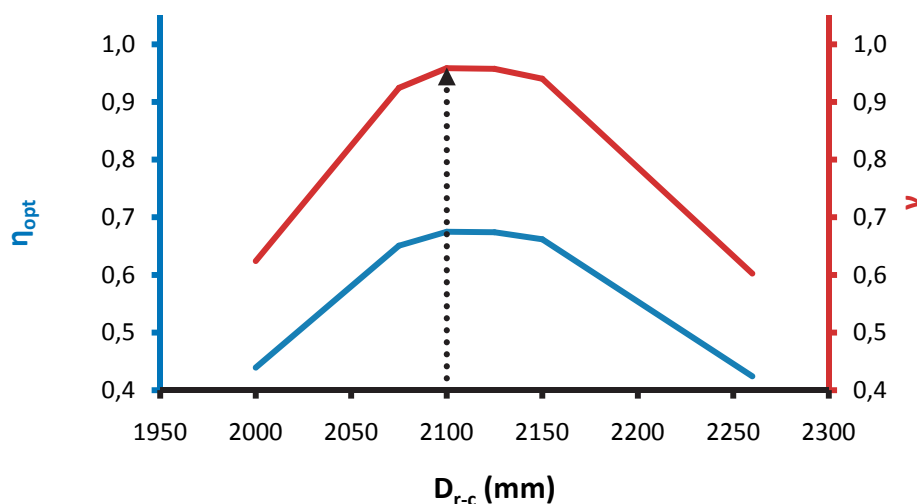


**Слика 5.15.** 3D модел спиралног глатког ТА (лево); А - улаз флуида;  
В - излаз флуида (десно)

Нумеричка метода којом је одређена расподела специфичног флукса абсорбованог зрачења је идентична као и у случају равног кружног апсорбера. Monte Carlo метода прорачуна хода зрака је примењена и на овом геометријског моделу, као и у свим нумеричким моделима овог истраживања. Методологија хода зрака је

најпознатија оптичка несеквенцијална метода у моделирању, симулацији и оптимизацији оптичких и геометријских параметара соларних концентришућих система као и системима светлосних рефлектора. Материјал глатке спирале је такође нерђајући челик AISI 304, док је кућиште направљено од прохромског лима дебљине 0.6 mm.

Енергија апсорбована на површини је функција површине цеви пројектоване нормално на правац вектора соларног зрака (зрачења). С обзиром да дозрачено зрачење које долази са површине вишесегментног параболичног концентратора није униформно у равни топлотног апсорбера, специфични флуks апсорбованог сунчевог зрачења (ирадијанца) неће варирати само по обиму спиралне цеви, већ и у аксијалном правцу. Са теоријског становишта, обимна расподела специфичног флуksа (максимум, минимум, осредњен) апсорбованог зрачења на спољашњем зиду глатке цеви треба да буде представљена косинусном функцијом што није увек случај у моделирању концентришућих пријемника сунчевог зрачења. На наредној слици је приказана расподела фактора прихватања сунчевог зрачења као и оптичке ефикасности у функцији положаја спиралног топлотног апсорбера за случај када је коефицијент рефлексије приближно 0,95 (теоријски модел).

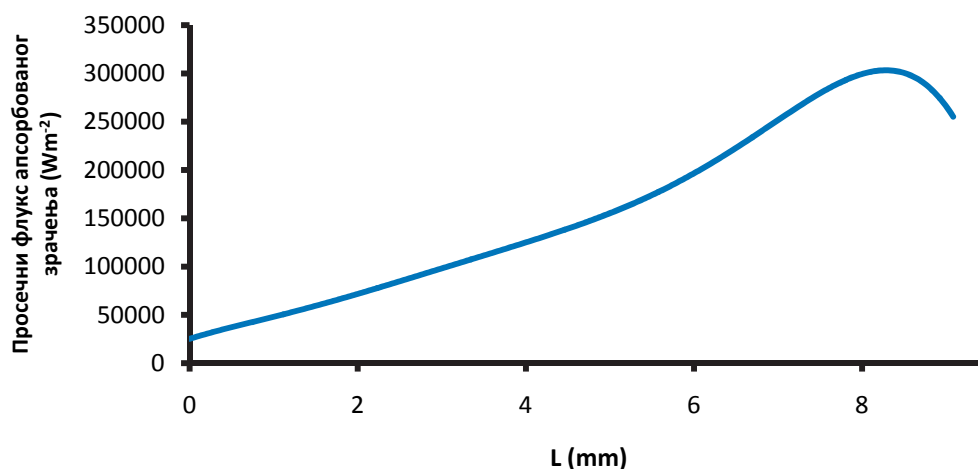


Слика 5.16. Оптимизација положаја спиралног топлотног апсорбера

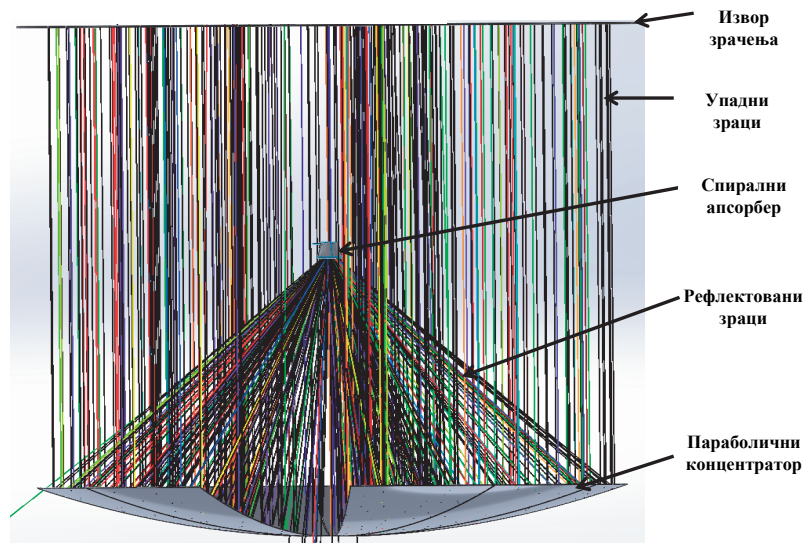
Након пројектовања почетног модела, спроведена је оптимизација положаја спиралног топлотног апсорбера. Жељена дистрибуција топлотног флуksа која се очекује на површини апсорбера јесте униформна, али је то јако тешко постићи у

реалним условима. Униформна расподела флукса сунчевог зрачења на површини апсорбера је пожељна у циљу смањења топлотних губитака као и генерисања равномерне расподеле температурског поља на апсорберу. Спирални топлотни апсорбер је постављен испред теоријског фокуса што додатно повећава фактор прихватања концентрисаног зрачења. Слика 5.16 приказује проналажење оптималног растојања између параболичног рефлектора и апсорбера у циљу максимизирања вредности упадног зрачења на апсорберску површину. На оптимално изабраном растојању фактор прихватања је 0.96, док је оптичка ефикасност 0.676.

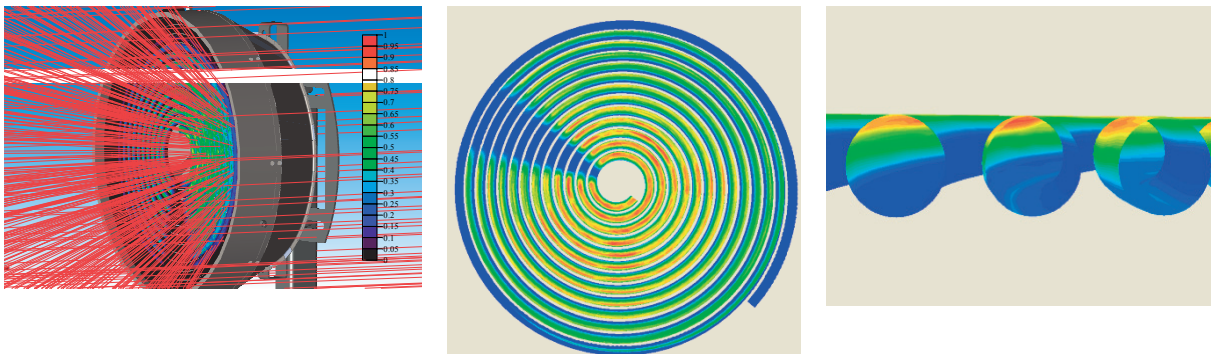
Слика 5.17 показује расподелу флукса апсорбованог сунчевог зрачења дуж спиралног глатког апсорбера. У области од 0–5m, интензитет топлотног флукса скоро константно расте док је у области између 5–8m пораст интензитета значајно расте. Након постизања максималне вредности, флукс полако почиње да опада. Максимална вредност флукса апсорбованог сунчевог зрачења налази се на дужини у 8.32m спирале у правој деоници (у центру спиралног апсорбера). Дужина спирале у развијеном облику мерена је од места улаза до места излаза флуида на најмањем пречнику. Познато је да апсорбер соларног концентратора не апсорбује у потпуности долазно (индидентно) упадно сунчево зрачење. Нумеричке симулације су показале да део рефлектованог и расејаног зрачења са суседних навојака спирале бива такође апсорбован, због чега је расподела специфичног флукса зрачења по полуобиму цеви униформнија у поређењу са косинусном расподелом.



Слика 5.17. Расподела флукса апсорбованог сунчевог зрачења дуж осе спиралног топлотног апсорбера



Слика 5.18. Нумеричка симулација примене методе прорачуна хода зрака



Слика 5.19. Расподела флукса апсорбованог сунчевог зрачења спиралног глатког топлотног апсорбера

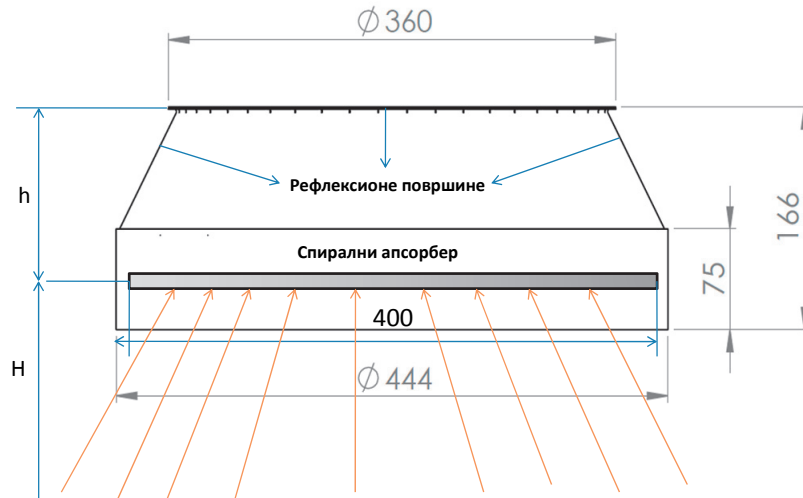
Укупна оптичка снага зрачења које се апсорбује на спиралном глатком апсорберу износи 6922.2W. Максимална вредност специфичног флукса апсорбованог зрачења износи  $89116 \text{ Wm}^{-2}$ . Просечни флукс апсорбованог сунчевог зрачења на спиралној глаткој спирали износи  $4.7247 \times 10^4 \text{ Wm}^{-2}$ . Урађен је велики број нумеричких симулација и оптимизација у циљу добијања максималног флукса апсорбованог сунчевог зрачења на спољашњој површини спиралне цеви. Спроведена је параметарска оптичка анализа различитих димензија спољашњег пречника спиралне глатке цеви, корака спирале, минимални пречник спирале, максимални пречник спирале, број навојака. Направљен је математички модел где је анализиран сваки навојак спиралног глатког апсорбера. У наредној табели приказане су вредности снаге апсорбованог

сунчевог зрачења за сваки навојак као и специфични флуks апсорбованог сунчевог зрачења ( $1 \div 13$ ) навојака.

Расподела специфичног флуksа упадног зрачења на сваком навојку биће приказана у прилогу **П1.1**. Да би се одредио утицај геометријских карактеристика на специфични флуks апсорбованог зрачења извршена је нумеричка параметарска оптичка анализа. На овај начин моделирана је глатка спирална цев већег пречника, чиме је шупљина између навојака сведена на минимум (корак спирале). Резултат ове нумеричке параметарске анализе приказан је у прилогу **П1.2**.

#### Утицај оптичких површинских и грешака спекуларне рефлексије параболичног рефлектора на апсорбовани флуks зрачења спиралног топлотног апсорбера

Утицај оптичких грешака има највећу улогу у процесу концентрисања сунчевог зрачења. Профил расподеле флуksа апсорбованог зрачења директно утиче од ових грешака, чија анализа је приказана у овом делу. Променљиве у оквиру оптичке параметарске нумеричке анализе приказане су у табели **П1.3** у прилогу **1**. Детаљни резултати нумеричких симулација су приказани у прилогу **П1**. Поред параметарске анализе утицаја оптичких грешака параболичног рефлектора узети су у обзир и геометријски параметри попут растојања спиралног апсорбера од темена параболичног рефлектора ( $H$ ), као и растојање од апсорбера до врха кућишта ( $h$ ). Ова параметарска анализа може укључити како глатку тако и спирално наборану спиралу, као и било коју другу геометрију топлотног апсорбера, итд. Важно је напоменути да су оба апсорбера смештена у конусно цилиндричном кавитету чије су унутрашње површине рефлексионе са коефицијентом рефлективности  $0.7$ . Спирални апсорбер са пречником од  $12.2 \text{ mm}$  моделиран је (апроксимиран) са три равна слоја-прстена, сваки са размаком  $2.5 \text{ mm}$  између њих. Пошто је укупна површина спиралног апсорбера  $\pi * D * L$ , укупна површина може бити моделирана са три равна прстена. Површина једног слоја (layer) је  $D * L$ . Према томе  $3 (\pi)$  прстенаста слоја потребно је да симулирају округлу цев. Просечни топлотни флуks сва три слоја- прстена треба сумирати и добити укупни просечни топлотни флуks по навојку спиралног апсорбера. (прилог **П1**).



Слика 5.20. Пресек кућишта спиралног топлотног апсорбера са димензијама

Укупна оптичка грешка соларног параболичног концентришућег система одређује се по следећем изразу :

$$\omega_{optical} = (4\omega_{slope}^2 + \omega_{specularity}^2)^{1/2} \quad (5.31)$$

Табела 5.5. Укупна апсорбована снага на површини спиралног апсорбера у ф-ји оптичких грешака

Жижна даљина $f$ (m)	Оптичке грешке $\omega_{optical}$			
	5 mrad	20 mrad	35 mrad	50 mrad
2.26 m	8413 W	8390 W	7525W	5711 W
2.28 m	8414 W	8405 W	7568 W	5738 W
2.3 m	8412 W	8403 W	7568 W	5735 W

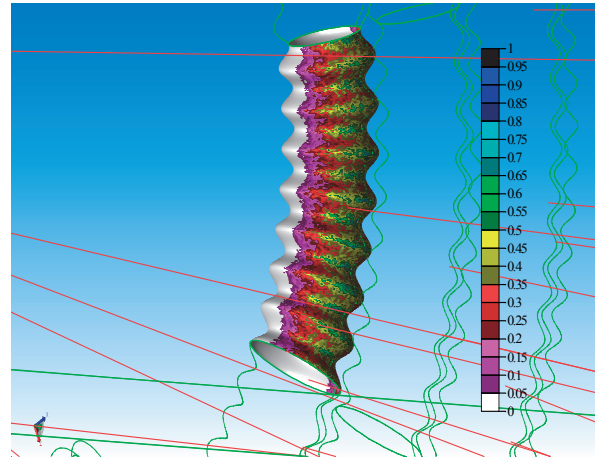
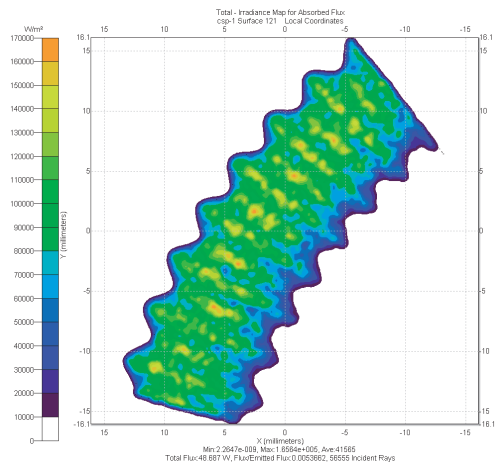
Тачне податке који се тичу оптичких грешака могуће је добити само експерименталним мерењима применом неких од метода (фотограмetriја, дефлекрометријске методе, ласерске методе итд.). Пошто је таква врста апаратуре јако скупа за наше услове, вредности грешака нагиба површине рефлектора и осталих грешака су узети из литературе. Наравно овде треба рачунати са одређеном грешком, јер површина рефлектујућих сегмената приказаног параболичног рефлектора генерише нешто веће вредности оптичких грешака од симулираних пошто је технологија израде као и систем још увек прототипски. Наравно, треба водити рачуна да вредности површинских грешака као и грешака спекуларне рефлексије треба да буду што мање. Пошто је параболични облик добивен истовременим поступком термичке обраде (загревањем) и вакуумским поступком, очигледно је да површине имају доста микро

неравнина као и да рефлектујући сегменти генеришу велике вредности дифузионе и запреминске рефлексије.

#### **Расподела специфичног флукса апсорбованог зрачења у спиралном попречно набораном топлотном апсорберу**

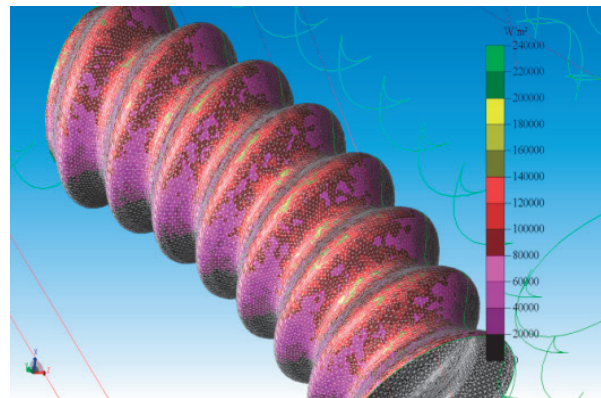
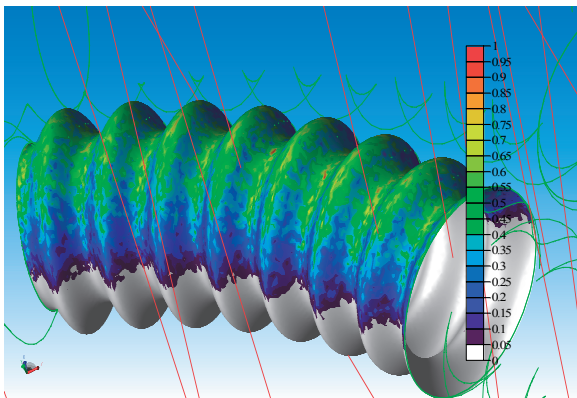
Због ограничења рачунарских ресурса и специфичности реалног геометријског модела, 3D нумерички модел садржи целу спиралу (13 навојака) али постпроцесирање се извршава за сваку деоницу (од 1 до 130). У наредном подпоглављу биће приказан нумерички оптички модел као и резултати оптичке симулације овако сложене геометрије. Велики допринос је начињен креирањем 3D геометријског модела применом Scheme макро језика, јер тиме је направљен добар фундамент за касније симулирање апсорпционих карактеристика површине спиралног апсорбера. Овим поступком су добијена поља специфичног флукса апсорбованог зрачења на изложеним површинама закривљених исечака (секција) свих 13 навојака. За свих 130 исечака спиралног набораног апсорбера је генерисано поље специфичног флукса зрачења - ирадијанса, минимална, максимална и просечна вредност, укупна снага на датој површини (**Прилог П2**). Специфични флукс апсорбованог зрачења је симулиран за фину мрежу са димензијама ћелија  $0.24601 \times 0.24601 \text{ mm}$ . Илустрације ради, на наредним сликама биће приказан флукс апсорбованог зрачења једног од 130 исечака (121 исечак- први навојак), расподела специфичног флукса апсорбованог зрачења [ $\text{Wm}^{-2}$ ] и 3D приказ специфичног флукса на површини целе наборане спирале. Примена Ray tracing симулације овако сложене геометрије спиралног набораног апсорбера са генерисањем 30 милиона зрака захтева огромне компјутерске ресурсе као и време рачунања од 2-3 дана за сваки модел - симулацију (исечак) понаособ.



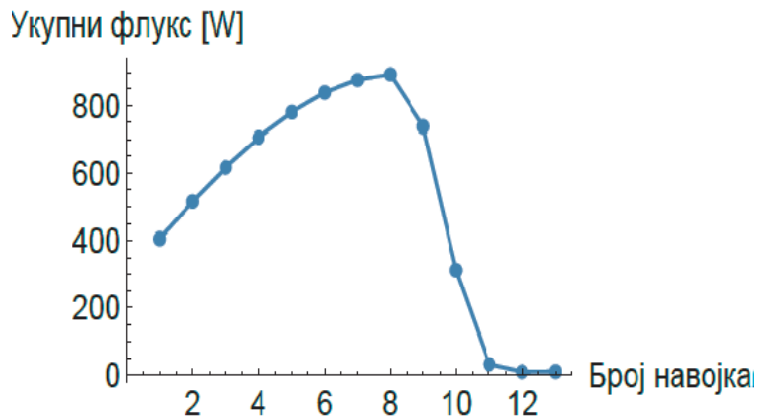


**Слика 5.21.** Распореда специфичног флуksа апсорбованог сунчевог зрачења [ $\text{Wm}^{-2}$ ] на 121-ом исечку - први навојак спиралног набораног апсорбера

Познавање распореде специфичног флуksа упадног зрачења на површини спиралне наборане цеви са попречним наборима је неопходно за одређивање вредности коефицијента прелаза топлоте унутар апсорбера. Очигледно да вредност флуksа упадног сунчевог зрачења која досеже до површине цеви није униформна, а максимумима вредности на позицијама које су нормалне на правац вектора соларног зрака, и релативно ниским на тангенцијалним позицијама. Униформност флуksа апсорбованог зрачења се може постићи дизајнирањем спирале параболичног облика, што је приказано у поглављу оптимизације.



**Слика 5.22.** Нормализација специфичног флуksа апсорбованог зрачења према максималној вредности (Peak irradiance- (лево); Вокселизација домена једног исечка спиралног набораног апсорбера (десно)

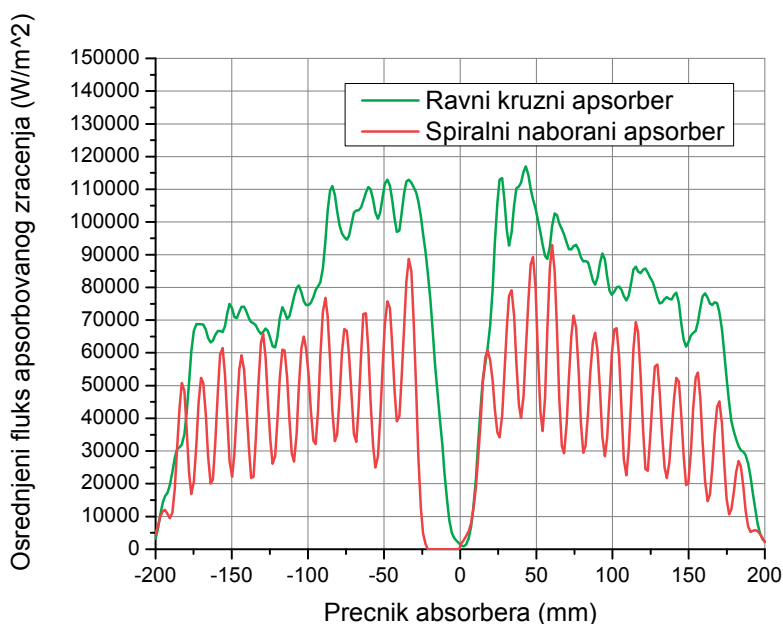


Број навојака	Апсорбована снага [W]
1	405.218
2	515.641
3	616.95
4	705.963
5	780.117
6	839.113
7	877.105
8	893.689
9	737.946
10	312.077
11	33.2068
12	10.5058
13	11.2822
Укупно	$\sum$ 6738.81

Слика 5.23. Расподела снаге апсорбованог зрачења на површини спиралног набораног топлотног апсорбера

#### Поређење оптичких перформанси равног кружног апсорбера и набораног спиралног топлотног апсорбера

За поређење оптичких перформанси равног кружног апсорбера и спиралног набораног апсорбера коришћен је као и за све остале оптичке симулације TracePro софтвер (Lambda Research Corporation USA). Слика 5.24 приказује расподелу просечног флуksа апсорбованог зрачења дуж пречника апсорбера. Апсорбовано сунчево зрачење на површини равног апсорбера приказано је зеленом бојом, док је за наборану спиралну цев приказан црвеном линијом. Очигледно је да је црвена линија таласаста (тестераста) због геометрије набораног апсорбера који се састоји од 13 навојака. Количина апсорбованог флуksа код спиралног набораног апсорбера је мања од равног кружног због сложене геометрије набораног (оребреног) спиралног апсорбера. Огромна количина рефлектованог зрачења се додатно рефлектује од појединих набора спиралног апсорбера и одлази из кавитета. Део концентрисаног зрачења пролази кроз шупљине између навојака спиралног апсорбера и на тај начин смањује фактор прихватања/пресретања концентришућег система. Да би се повећао фактор прихватања, шупљине између навојака треба редуковати мањим кораком спирале односно повећати спољашњи пречник апсорберске цеви тако да се генерише мањи удео транспоновоаног зрачења кроз шупљине.



**Слика 5.24.** Просечни флуks апсорбованог сунчевог зрачења за равни кружни и спирални наборани топлотни апсорбер

У табели 5.6 приказани су резултати нумеричке симулације за модел набораног спиралног топлотног и кружног апсорбера. Укупни флуks (оптичка снага), минимални, максимални и просечни флуks апсорбованог зрачења за равни и спирални наборани топлотни апсорбер приказани су у табели.

**Табела 5.6.** Резултати нумеричке симулације за равни кружни и спирални наборани топлотни апсорбер

		Равни кружни апсорбер	Спирални наборани апсорбер
Укупни оптички апсорбовани флуks	[W]	7859.7	6738.81
Минимални флуks апсорб. зрачења	[Wm <sup>-2</sup> ]	$1.8681 \cdot 10^{-9}$	$4.5188 \cdot 10^{-9}$
Максимални флуks апсорб. зрачења	[Wm <sup>-2</sup> ]	1563470	98584
Средња вредност флуksа апсор. зрач.	[Wm <sup>-2</sup> ]	62545	41565

#### 5.1.4. Термички математички модел соларног параболичног концентришућег система и нумеричко решавање

##### Математичко моделирање

У овом одељку представљене су једначине које описују развој математичког модела топлотног понашања концентришућег пријемника сунчевог зрачења. Од суштинског значаја је навести да је ово поједностављени модел који претпоставља униформну расподелу флуksа топлотног зрачења на површину апсорбера.

Термичко понашање соларног концентришућег пријемника описује се једначином енергетског биланса добијеном применом закона о одржању енергије. Претпостављајући да је пријемник црна кутија и да је пренос топлоте у оквиру њега стационаран може се написати једначина (5.32). Укупно апсорбована снага једнака је збиру корисне топлотне снаге (абсорбована од стране флуида) ( $Q_u$ ) и топлотних губитака у околину ( $Q_{loss}$ ), приказано у једначини 5.32а:

$$Q_{abs} = Q_u + Q_{loss} = \eta_{opt} \cdot Q_s \quad (5.32a)$$

$$Q_s = A_u \cdot G_b \quad (5.32b)$$

Соларна топлотна снага на површину апертуре концентратора једнака је производу директног сунчевог зрачења и ефективне површине апертуре концентратора. За случај стационарног преноса топлоте може се енергетским билансирањем успоставити веза између топлотног флукса на спољашњој површини цеви и топлотне снаге апсорбера изражене преко параметара транспортног флуида (једн. 5.32):

$$Q_u = m \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (5.33)$$

Топлотне губитке можемо поделити на губитке зрачењем (радијациони губици) ( $Q_{rad}$ ) и конвективне губитке ( $Q_{conv}$ ). Кондуктивне губитке можемо занемарити јер је дебљина цеви апсорбера јако мала. Ове губитке можемо разматрати у случају када постоји температурска разлика између спољне и унутрашње стране површине набора спиралног апсорбера. Температурска разлика је око  $0.2 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Једначине 5.34 и 5.35 дају изразе за прорачунавање тих количина:

$$Q_{rad} = A_{ro} \cdot \varepsilon_r \cdot \sigma \cdot (T_r^4 - T_{am}^4) \quad (5.34)$$

$$Q_{conv} = A_{ro} \cdot h_{air} \cdot (T_r - T_{am}) \quad (5.35)$$

Коефицијент конвективног прелаза топлоте између апсорбера и околине/амбијента може се написати следећом релацијом [89]:

$$h_{air} = 2.8 + 3 \cdot V_{air} \quad (5.36)$$

Код соларних пријемника корисна енергија представља енергију предату радном флуиду ( $Q_u$ ) док уложена енергија представља укупно дозрачену енергију на површину

пријемника/рисивера (апсорбера)  $H_{dG} \cdot A_d$ . Термичка ефикасност (степен ефикасности) соларног концентришућег пријемника ( $\eta_{th}$ ) дефинише се као однос добијене (корисне) количне топлотне енергије и уложене (доступне) сунчеве енергије на површини апертуре параболичног концентратора:

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{Q_s} \quad (5.37)$$

### Пренос топлоте у струји флуида

У овом одељку приказане су једначине везане за пренос топлоте од стране апсорбера ка флуиду. Корисна количина топлоте која се добија од стране флуида се може срачунати као:

$$Q_u = h \cdot A_{ri} \cdot (T_r - T_{fm}) \quad (5.38)$$

Средња темепратура флуида може бити апроксимирана према једначини (5.39):

$$T_{fm} = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (5.39)$$

Коефицијент прелаза топлоте за испитивани случај се рачуна према једначини 5.40 [90]:

$$Nu = \frac{\left(\frac{f_r}{8}\right) \cdot Re \cdot Pr}{1 + 12.8 \cdot \sqrt{\frac{f_r}{8}} \cdot (Pr^{0.68} - 1)} \quad (5.40)$$

Ова формула је коришћена за турбулентно струјање са Рејнолдсовим бројем изнад 2300, што је случај у овом истраживању. Коефицијент трења ( $f_r$ ) може бити одређен сложеном једначином због тога што је цев топлотног апсорбера наборана. Следећа једначина је погодна за наш испитивани случај [91]:

$$f_r = 0.316 \cdot Re^{-0.25} + 0.41 \cdot \left(\frac{D_{ri, \min}}{D_{ri}}\right)^{0.9} \quad (5.41)$$

Важно је навести да је средњи унутрашњи пречник ( $D_{ri}$ ) пречник који је коришћен при дефинисању  $Re$  броја. Једначине 5.42-5.44 представљају карактеристичне Рејнолдсове, Прантлове и Нуселтове бројеве, односно:

$$\text{Re} = \frac{4 \cdot m}{\pi \cdot D_{ri} \cdot \mu} \quad (5.42)$$

$$\text{Pr} = \frac{\mu \cdot c_p}{k} \quad (5.43)$$

$$\text{Nu} = \frac{h \cdot D_{ri}}{k} \quad (5.44)$$

Последњи веома важан параметар ове студије (истраживања) јесте пад притиска дуж цеви, параметар који се срачунава на основу коефицијента трења:

$$\Delta P = f_r \cdot \frac{L}{D_{ri}} \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2 \right) \quad (5.45)$$

Брзина струјања ( $u$ ) се срачунава на основу масеног протока флуида, према ј-ни 5.46:

$$u = \frac{m}{\left( \frac{\pi}{4} \cdot D_{ri}^2 \right) \cdot \rho} \quad (5.46)$$

Утицај интензитета специфичног флукса топлотног зрачења на пренос топлоте, односно вредност Nu броја, је врло тешко проценити за дате реалне експерименталне услове.

#### Ексергетске карактеристике параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења

Ексергетска евалуација/оцена (други закон термодинамике) соларног концентришућег пријемника сунчевог зрачења је корисна анализа соларних система која приказује квалитет процеса. Приликом примене ексергетске анализе, термичке перформансе и радне температуре су узете у обзир, као и пад притиска у цеви. Корисна излазна ексергија ( $E_u$ ) једнака је разлици корисне количине топлоте и коефицијента неповратности процеса загревања. Једначина 5.47 показује да се коефицијент неповратности процеса може приказати преко повећања специфичне ентропије:

$$E_u = Q_u - m \cdot T_{am} \cdot \Delta s \quad (5.47)$$

Ова једначина може се трансформисати у следећем изразу [5.48]:

$$E_u = Q_u - m \cdot c_p \cdot T_{am} \cdot \ln \left[ \frac{T_{out}}{T_{in}} \right] - m \cdot T_{am} \frac{\Delta P}{\rho \cdot T_{fm}} \quad (5.48)$$

Ексергија сунчевог зрачења се прорачунава по познатом моделу Petela, који је највише прихваћен у свету у овој области. Сунце није топлотни резервоар већ резервоар зрачења, тако да из тог разлога постоји додатни члан у једначини 5.49 [93].

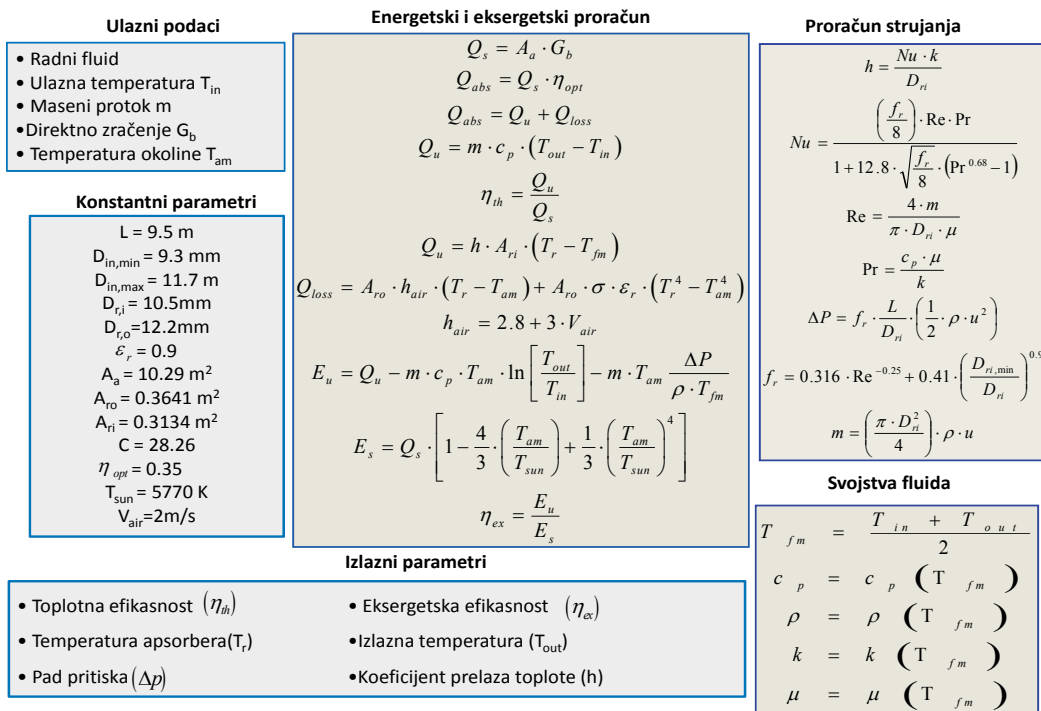
$$E_s = Q_s \cdot \left[ 1 - \frac{4}{3} \cdot \left( \frac{T_{am}}{T_{sun}} \right) + \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{T_{am}}{T_{sun}} \right)^4 \right] \quad (5.49)$$

Температура на површини сунца ( $T_{sun}$ ) се може проценити на 5770К, то је средња вредност спољашње површине сунца. Важно је напоменути да температуре у једначинама 5.48 и 5.49 морају бити у степенима Келвинима. Ексергетска ефикасност соларног концентришућег система, као у једначини 5.50. Она се дефинише као однос излазне корисне ексергије и улазне ексергије сунчевог зрачења:

$$\eta_{ex} = \frac{E_u}{E_s} \quad (5.50)$$

## 5.2. Нумерички термички модел

Развијени нумерички модел је 1D термички модел који се заснива на енергетском билансу у топлотном апсорберу. Просечна (средња) температура апсорбера је кључни непознат фактор који треба прорачунати у сваком случају. Ова стратегија је приказана у референци [92] и представља валидирани (проверен) модел за параболичне концентришуће пријемнике сунчевог зрачења. Решавање нумеричког модела је спроведено уз помоћ софтвера EES (Engineering Equation Solver) [94] који је јако моћан и погодан алат за ове проблеме. Особине (својства) воде, термичког уља Therminol VP-1 и ваздуха су дати у оквиру директоријума библиотеке EES [95-97]. Слика 5.25 приказује групу једначина пратеће методологије развоја нумеричког термичког модела.



Слика 5.25. Развој нумеричког термичког модела [35](EES code П4)

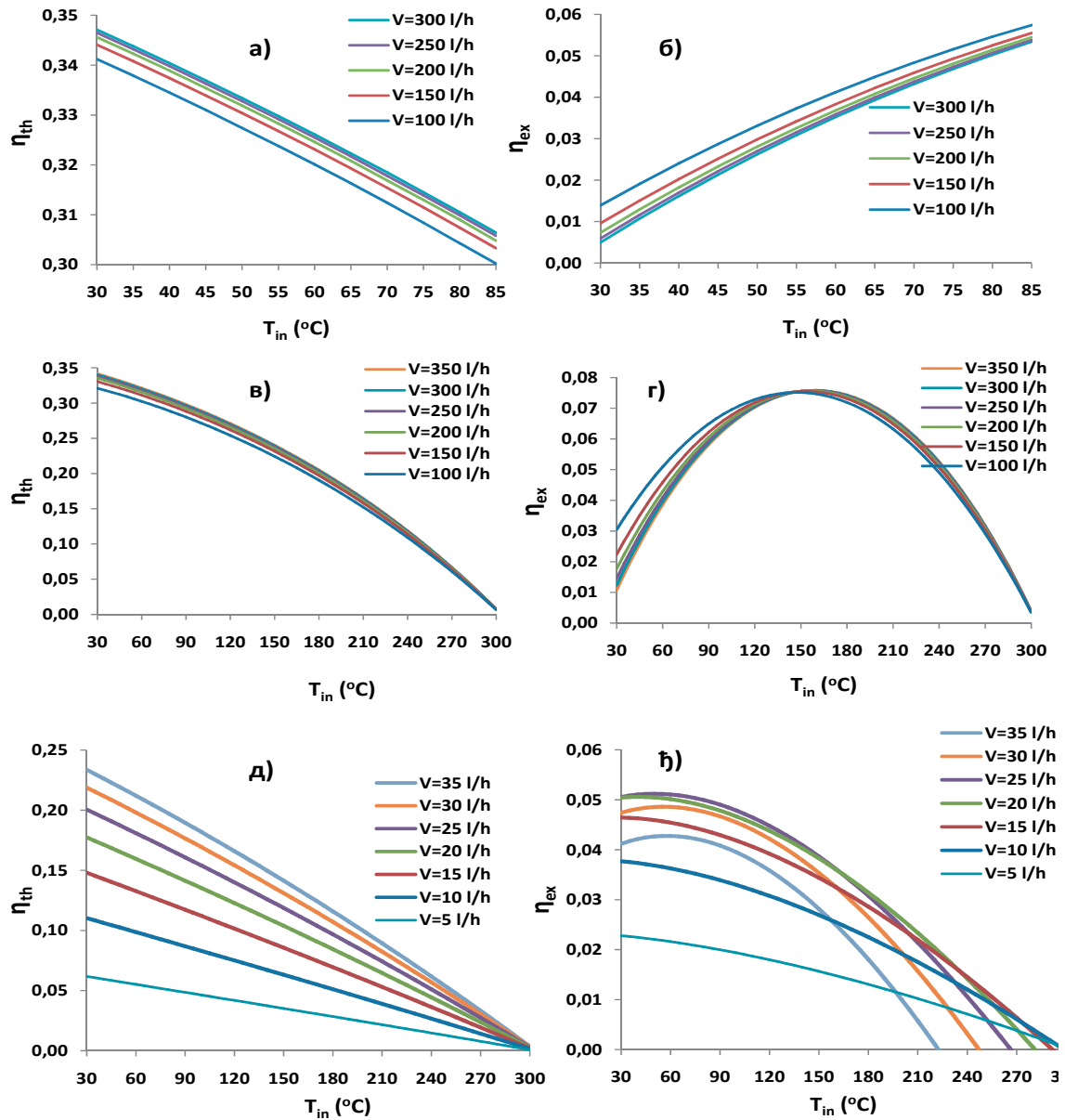
Важно је напоменути да су вредности улазне температуре воде као радног флуида до  $85^\circ\text{C}$ , а да за остале разматране транспортне флуиде (термичко уље Therminol VP-1 и ваздух) достижу вредности и до  $300^\circ\text{C}$ . Урађено је више параметарских анализа са различитим вредностима улазних температура. Тестиране су различите вредности улазне температуре у циљу добијања података за криву ефикасности. За валидацију нумеричког модела са експерименталним моделом, приказана је једноставна процедура. Тачније, многи радни параметри су изабрани, између осталог упоређивана је излазна температура воде и термичка ефикасност. За сваки испитивани случај, улазна температура воде, директна компонента сунчевог зрачења, запремински проток флуида, температура околине као и брзина ветра су укључене у нумерички модел у циљу симуирања одговарајућих реалних услова у оквиру експеримента. Излазна температура флуида је најважнији параметар, јер је она у потпуности повезана за корисном количином топлоте која се генерише као и термичком ефикасношћу параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења.



### **Истраживање утицаја транспортних флуида на карактеристике параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења**

Валидирани нумерички термички модел је коришћен за наредна (даља) истраживања овог типа соларног концентришућег пријемника. Модел је јако погодан за примену параметарске анализе, јер је у стању да пружи тачне резултате са ниским рачунарским трошковима. Три врсте радних флуида је истраживано при различитим запреминским протоцима у циљу процењивања њихових карактеристика. У овом одељку, одређен је оптимални проток за сваки радни флуид разматрајући термичку и ексергетску ефикасност концентришућег пријемника у функцији радне температуре.

Слике 5.26а и 5.26б приказују термичку и ексергетску ефикасност параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења са водом као радним флуидом. У циљу одржавања воде у њеном течном стању, максимална истраживана вредност улазне температуре је изабрана да буде 85°C. Приликом разматрања ове две анализе оптимални проток који је пронађен за оба случаја даје задовољавајуће вредности енергетске и ексергетске ефикасности. Слика 5.26а показује да већи запремински проток доводи до веће термичке ефикасности система. Вредности протока изнад 150l/h су енергетски прихватљиви, док случај са 100l/h није задовољавајући у енергетском смислу. Слика 5.26б даје одговарајуће ексергетске резултате, где ниже вредности запреминског протока дају нешто више вредности ексергетске ефикасности. На тај начин за случај воде као радног медијума изабран је оптимални проток од 200l/h. Занимљиво је напоменути да је експериментална вредност протока изабрана близу ове вредности, који показује да је експериментално истраживање концентришућег система извршено са приближно оптималном вредношћу запреминског протока. Слике 5.26в и 5.26г представљају термичку и ексергетску ефикасност за систем са термичким уљем Therminol VP-1 као радним медијумом. Слика 5.26в показује да се термичка ефикасност повећава са већим вредностима протока. Слика 5.26г показује ексергетску ефикасност концентришућег пријемника сунчевог зрачења што показује да постоји оптимална температура за сваку вредност протока. Максимална ексергетска ефикасност се добија када је улазна температура уља близу 150°C. Оптимална вредност протока расте (се повећава) на вишим температурама. Запремински проток од 200 l/h доводи до оптималних ексергетских перформанси и стога је изабрана најпогоднија вредност протока.



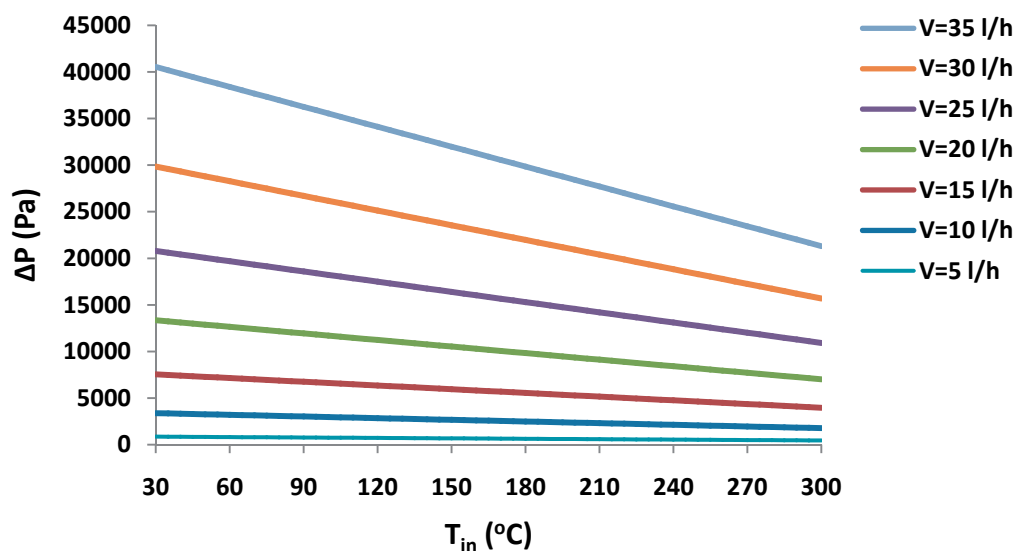
**Слика 5.26.** а, б) Топлотна и ексергетска ефикасност са водом као медијумом при различитим запреминским протоцима; в,г ) за термичко уље Therminol VP-1; д, е) за ваздух као радни медијум

Слике 5.26д, 5.26е приказују нумеричке резултате са ваздухом као радним флуидом. Слика 5.26а доказује да је термичка ефикасност концентришућег пријемника потпуно зависна од протока флуида, тако да вредности протока ниже од 20l/h су неприхватљиве за ову врсту испитивања. Ексергетска ефикасност, која је приказана на слици 5.26е, приказује да је оптимална вредност протока 25l/h; вредност која такође доводи до задовољавајуће термичке ефикасности тако да је изабрана као најпогоднија

вредност. Важно је напоменути да су испитивани много нижи протоци са ваздухом као радним медијумом него у односу на случај са водом и термичким уљем као радним флуидом. Веће вредности масених протока могу довести до нижих вредности топлотне ефикасности у пријемнику, тако да ексергетска ефикасност може бити веома ниска или чак негативна.

Штавише, битно је напоменути да ексергетска ефикасност са ваздухом као радним флуидом веома осетљива на масени проток услед пада притиска који се узима у разматрање.

Пад притиска је дат на слици 5.27 за разматране протоке. На основу резултата нумеричког модела максималне вредности ексергетске ефикасности се постижу за све вредности протока, где је улазна температура уља близу  $150^{\circ}\text{C}$ . За ниске температурске нивое, најнижа вредност протока је оптимум, док за више температурске нивое, оптималан избор протока је  $200\text{l/h}$ . Наравно за веће вредности протока потребно је монтирати другачију инсталацију са већим пречницима цеви као и већом циркулационом пумпом.



Слика 5.27. Пад притиска за рад система са ваздухом као медијумом при различитим запреминским протоцима

Пад притиска опада са повећањем улазне температуре ваздуха. Према слици 5.27, виша температура ваздуха доводи до смањења пада притиска услед смањења (опадања) густине ваздуха као медијума. Пренос топлоте утиче на пораст вредности пада притиска у разматраној геометрији топлотног апсорбера. Са порастом вредности

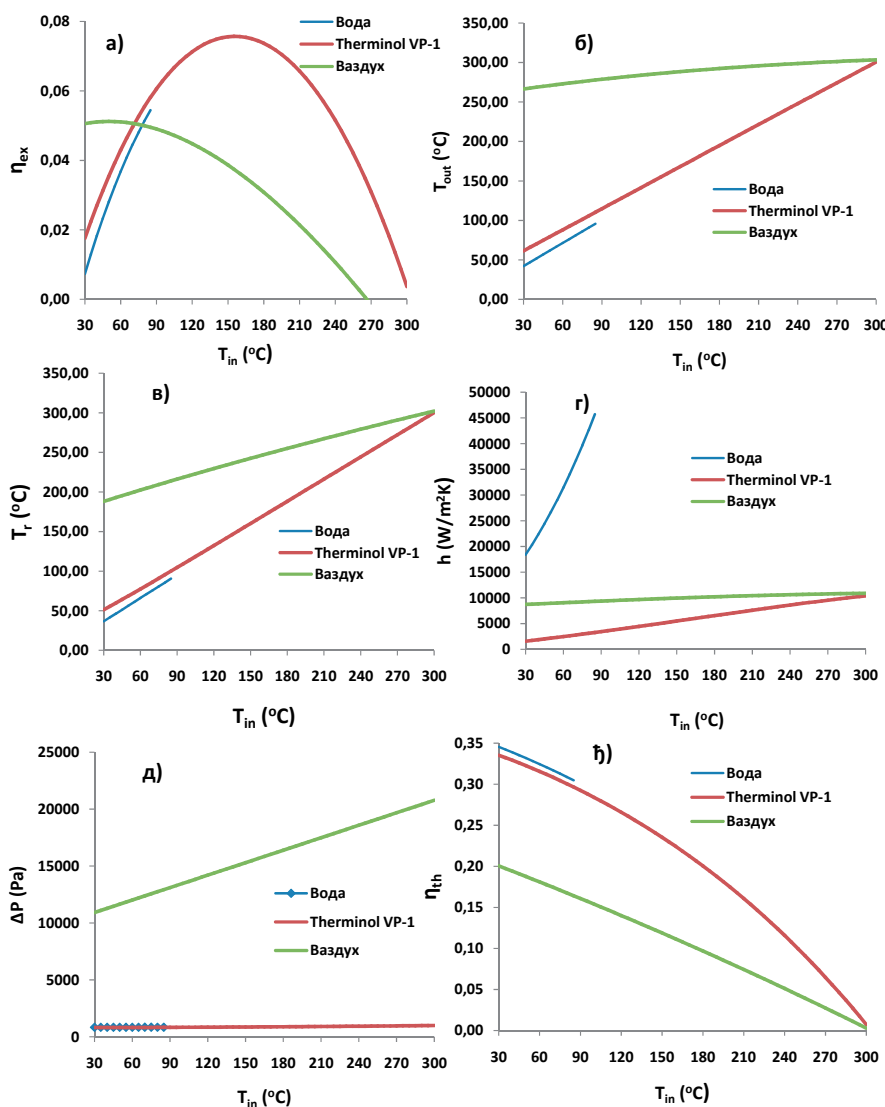
специфичног топлотног флукса на зиду, расту и вредности пада притиска.

#### Упоредна анализа примене различитих транспортних флуида

У овом одељку приказано је нумеричко истраживање различитих транспортних флуида који се користе код пријемника са концентрисањем сунчевог зрачења (средње и високотемпературним). За сваки радни флуид, изабран је њихов оптимални запремински проток у циљу спровођења одговарајућих поређења. Слика 5.28ђ приказује поређење термичке ефикасности за различите радне флуиде. Вода као радни флуид је најбољи избор за ниско температурне системе, док термичко уље Therminol VP-1 је бољи за више температурске нивое што захтева измену постојеће термотехничке инсталације, са тим знатно поскупљује реализацију експеримента. Ваздух није најбољи избор радног флуида за коришћење на било ком температурском нивоу. Слика 5.28а приказује ексергетску ефикасност за сва три симулирана радна флуида. За нискотемпературне системе, ваздух се показао ексергетски бољим флуидом од осталих, док за високотемпературске системе Therminol VP-1 даје боље перформансе. Максимална ексергетска ефикасност која се постиже за уље Therminol VP-1 на температури 155°C и износи 7,57%.

Разлог тако високе ексергетске ефикасности ваздуха као транспортног флуида при ниским температурама је низак проток који је повезан са високом излазном температуром. Овај резултат помаже да систем има високу ексергетску ефикасност. На вишим температурама, ниска термичка ефикасност ваздуха узрокује значајно смањење ексергетске ефикасности, чинећи термичко уље бољим радним флуидом.

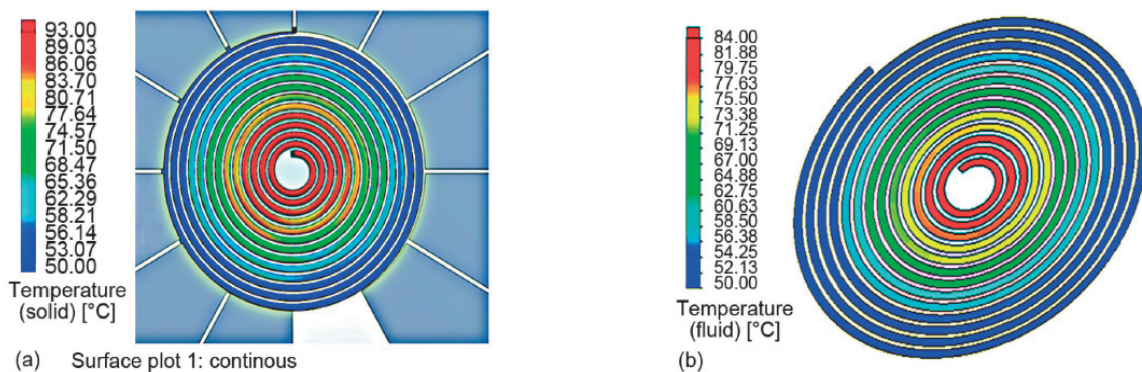
На слици 5.28б приказан је дијаграм зависности излазне температуре за све разматране радне флуиде. Занимљиво је да за случај ваздуха као радног флуида, температурна крива има мањи нагиб, у поређењу са осталим кривама на графику. Перформансе рисивера/апсорбера (температура апсорбера) које су приказане на слици 5.28в сличне су са перформансама на слици 5.28б. Слика 5.28в показује карактеристике рисивера/апсорбера, тј. температуру апсорбера у функцији улазне температуре флуида. Више вредности температуре рисивера/апсорбера доводе до већих топлотних губитака (конвективни + радијациони) као и смањену термичку ефикасности параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења. Ово се може видети са слике 5.28ђ.



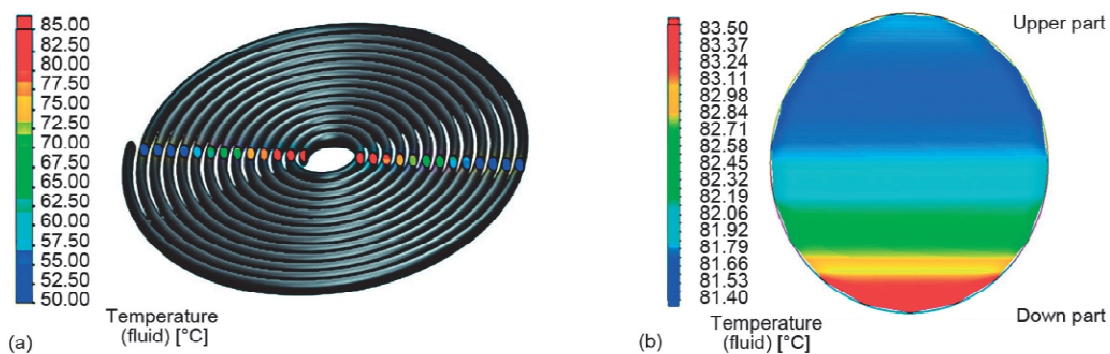
**Слика 5.28.** а,ђ) Упоређење топлотне и ексергетске ефикасности три радна флуида; б) Зависност излазне температуре од врсте радног флуида; в) Зависност температуре пријемника од врсте радног флуида; г) коефицијент прелаза топлоте за три симулирана радна флуида; д) пад притиска за три симулирана радна флуида

Осим тога, анализирајући слике 5.28ђ и 5.28в заједно температура стагнантне зоне (стагнације) концентришућег колекторског система може бити процењена на  $300^{\circ}\text{C}$ , јер на овој температури пријемника/апсорбера, термичка ефикасност је практично једнака нули ( $q_u = 0$ , што значи да је  $h \cdot A \cdot (T_r - T_{fm}) = 0$ ). Температура пријемника/апсорбера једнака је средњој температури флуида  $T_r = T_{fm}$ . Такође  $Q_u = m \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in}) = 0$ , следи да је  $T_{out} = T_{in}$ .  $T_{fm} = (T_{out} + T_{in}) / 2 = 0$ , следи да је  $T_{fm} = T_{in}$ . Конвективни коефицијент прелаза топлоте у функцији улазне температуре за различите радне флуиде је приказан на слици 5.28г. За случај воде коефицијент

конвективног прелаза топлоте је много већи, што објашњава вишу термичку ефикасност параболичног концентришућег пријемника са водом, на основу слике 5.28ђ. Последњи параметар у анализи (истраживању) радних флуида је пад притиска. На слици 5.28д приказан је пад притиска за различите радне флуиде. Пад притиска је екстремно висок за ваздух. Термичко уље и вода имају сличне губитке притиска, јер оба флуида су течности. Резултати на овој слици показују да су губици притиска веома значајан фактор за оцену концентришућег пријемника сунчевог зрачења посебно у случају гасних радних флуида. Ексергетска анализа узима у обзир губитке притиска (пад притиска), то је наједакватнији индекс за оцењивање карактеристика рада параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења. На наредним сликама биће приказани резултати расподеле температуре на површини глатког апсорбера као и температура флуида. Изабран је модел са глатком спиралном цеви због немогућности симулирања целе површине спиралног топлотног апсорбера са попречним наборима услед сложености геометрије и неопходности огромних рачунарских ресурса.



**Слика 5.29.** Распoдела температуре: а) на доњем делу површине апсорбера; б) у флуиду у хоризонталном средњем пресеку спиралне цеви



**Слика 5.30.** Распoдела температуре воде; а) вертикални пресек спиралног апсорбера; б) распoдела температуре флуида на излазу у попречном пресеку- 1- навојак

Слика 5.30а приказује температуру флуида у вертикалном попречном пресеку. Очигледно је да је све топлија како се приближавамо центру спиралног апсорбера, јер је флуks концентрисаног зрачења највећи у том делу спирале. Слика 5.30б. даје тачну расподелу температуре флуида на излазу из спиралне цеви апсорбера. Вода је топлија у доњем делу спиралне цеви апсорбера услед директног излагања концентрисаном сунчевом зрачењу.

## Глава 6

### 6. КОМПЈУТЕРСКЕ СИМУЛАЦИЈЕ И ОПТИМИЗАЦИЈА ПАРАБОЛИЧНОГ КОНЦЕНТРИШУЋЕГ ПРИЈЕМНИКА СУНЧЕВОГ ЗРАЧЕЊА

---

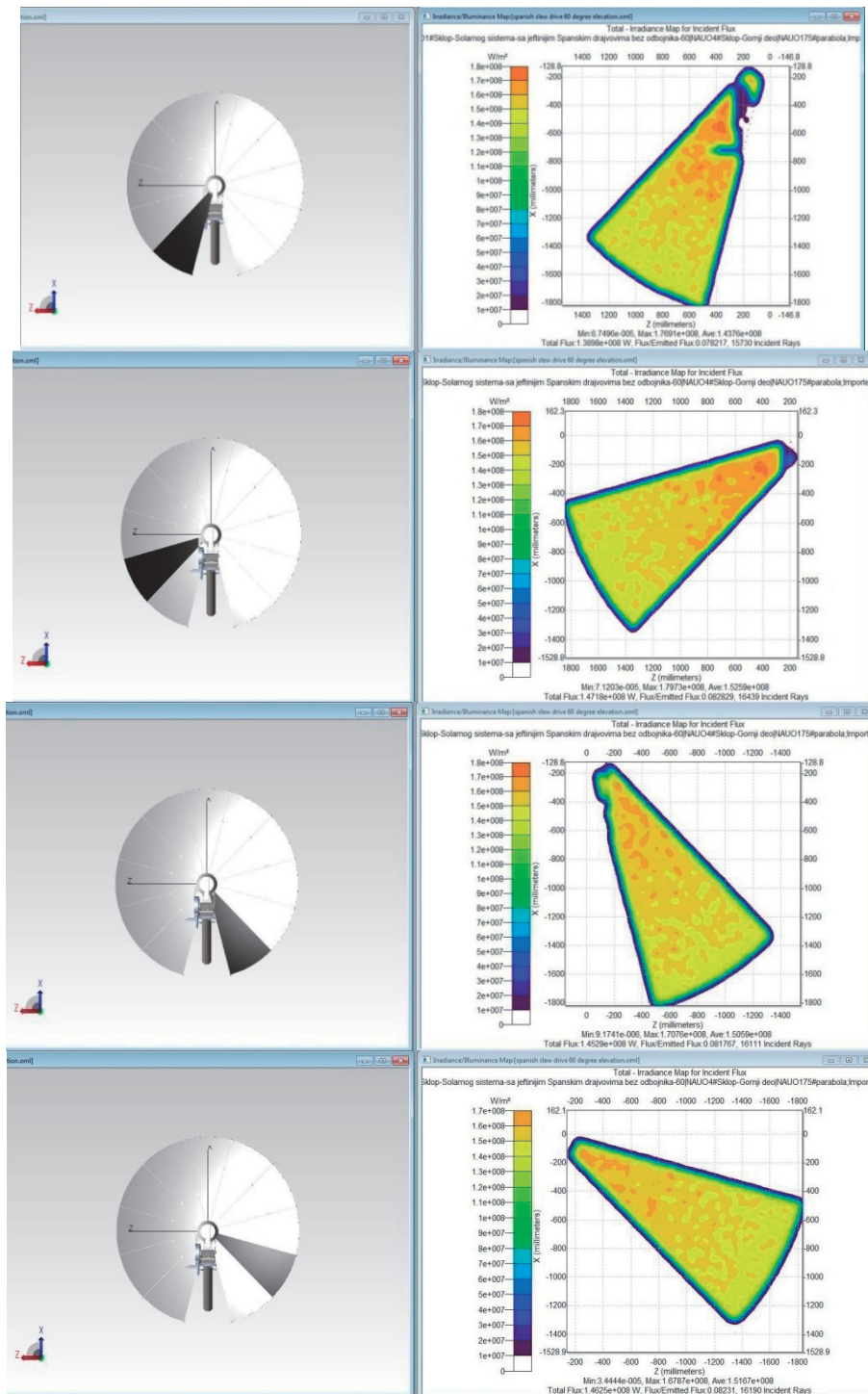
#### 6.1. Нумеричко моделирање осенчења на површину параболичног концентратора сунчевог зрачења

##### 6.1.1. Одређивање губитака упадног флукса зрачења на површину концентратора

Сваки соларни топлотни концентришући систем поред топлотних губитака у оквиру топлотног апсорбера, поседује и оптичке губитке самог концентришућег елемента рефлектора - концентратора. Оптичка и термичка ефикасност соларног концентришућег пријемника сунчевог зрачења у великој мери зависе како од апсорбујуће површине топлотног апсорбера тако и од квалитета пријемне рефлектујуће површине апертуре концентратора. Оптички губици су они губици који се јављају на путу упадног сунчевог зрачења пре његовог апсорбовања на површину пријемног елемента (спиралног апсорбера). На наредним сликама биће приказани резултати моделирања засенчења на најкритичнијим сегментима рефлектора. То су рефлектујући сегменти са леве и десне стране најближи механичким компонентама система за позиционирање. Постоје четири типа оптичких губитака који се могу јавити у процесу концентрације сунчевог зрачења: *блокадни губици* (сунчево зрачење погађа спољну површину кућишта топлотног апсорбера) и *расипа се у атмосферу*, *паразитски губици апсорпције* (део рефлектованог зрачења се апсорбује на површини рефлектора), *губици*

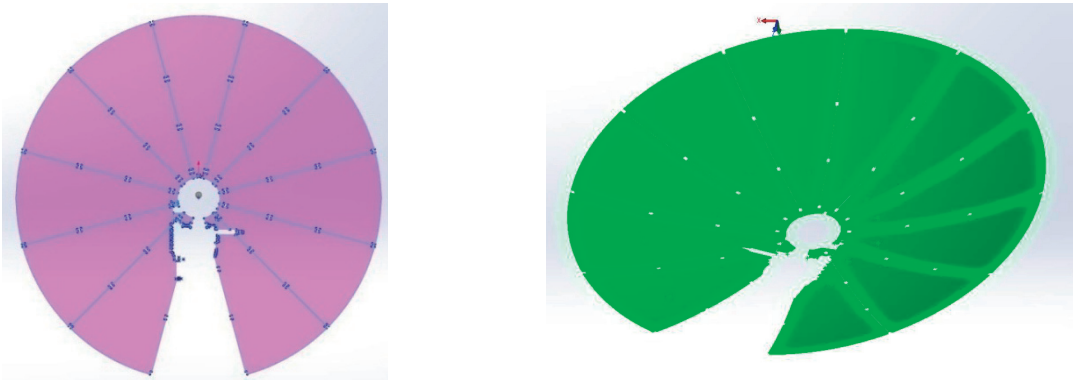


расејања (део рефлектованог зрачења који не улази у апертуру рисивера - већ рефлектује на спољну површину кућишта), губици рефлексије (део упадног рефлектованог зрачења (се додатно рефлектује са унутрашње површине кавитета рисивера/пријемника и излази у атмосферу)).



Слика 6.1а. Моделирање осенчења на критичним деловима параболичног концентратора (нумерички модел)

Један јако значајан параметар у оквиру нумеричког моделирања и оптимизације соларних концентришућих система јесте и одређивање површине осенчења на површини апертуре параболичног вишесегментног рефлектора/концентратора. Засенчења се обично јављају услед постављања кућишта топлотног апсорбера у фокусу дуж оптичке осе, тако да након позиционирања соларног концентратора у радни положај, део површине кућишта може правити сенку на површину рефлектора што умањује површину рефлексије упадног сунчевог зрачења. Поред сенке која се јавља од кућишта апсорбера, засенчења се могу јавити од механичких компонената система. Конкретно на развијеном прототипу соларног параболичног концентратора највећи удео засенчења јавља се од механичких конструктивних елемената - пужних редуктора за систем праћења сунца (Slew Drive system). Укупан губитак флукса упадног зрачења је занемарљив и износи око 1,5%. Наравно, треба тежити мањим габаритима механичких склопова како би се смањили губици од засенчења на површину параболичног вишесегментног рефлектора.



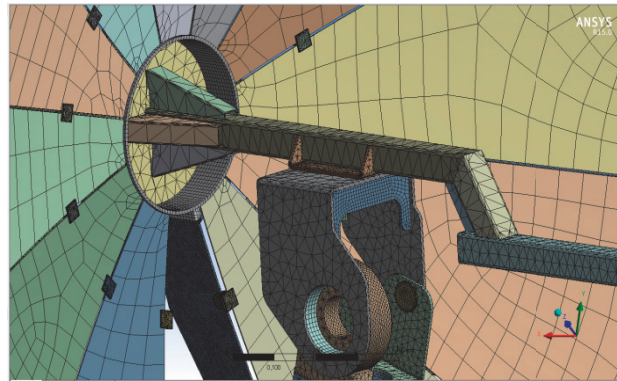
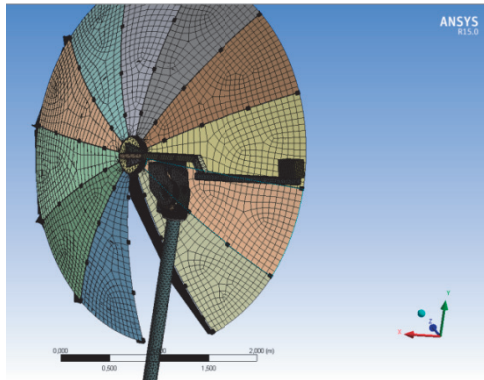
**Слика 6.16.** Моделирање осенчења на реалном експерименталном моделу од механичких компоненти

### 6.1.2. Примена метода коначних елемената (FEA анализа)

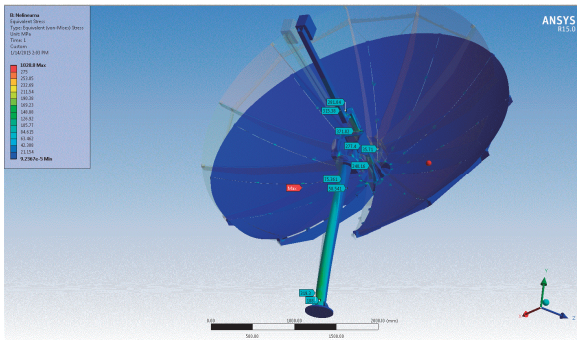
У оквиру овог истраживања након дефинисања и развоја геометријског, оптичког модела соларног концентришућег система спроведен је и развој модела који ће да предвиди утицај оптерећења од ветра и сопствене тежине. FEM модел је јако детаљно спроведен и на основу њега је димензионисан систем за двоосно позиционирање и праћење трајекторије сунца у току дана.

На основу нумеричких симулација и спроведених анализа параболичног

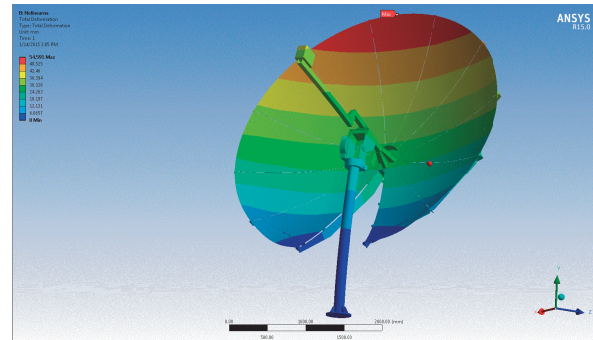
концентришућег пријемника сунчевог зрачења у оквиру софтверског алата *ANSYS Workbench R15.0*. (Static Structural) урађена је симулација оптерећења како од саме механичке структуре ношења система концентришућег пријемника тако и од утицаја ветра (динамичко променљиво оптерећење- динамички притисак од силе ветра). Прорачун система методом коначних елемената на утицај оптерећења ветра је урађен према најновијој Eurocode норми. Оптимизација топологијом је показала форму пројектовања појединих компонената система с аспекта дозвољених напонских и деформационих стања као и степена сигурности појединих подсклопова и целог склопа. Сprovedено је на десетине нумеричких симулација док тачност резултата није задовољена. На бази постојећих решења за позиционирање соларних концентратора која се тренутно користе (систем за управљање и мониторинг), анализа могућих кинематских структура механичког система за позиционирање изабрано је најповољније техничко решење. Посредством интернета и других расположивих извора дошли смо до одговарајуће стручне литературе и проспектног материјала фирми које израђују позиционере (sun trackers). На наредним сликама биће приказане нелинеарне анализе првобитног решења, а касније и усвојеног финалног. За креирање неуниформне хибридне мреже коришћен је ANSYS ICEM CFD Mesher, који омогућава прецизну контролу величине и броја коначних елемената и нумеричких чворова унутар нумеричког домена. Генерисање мреже је спроведено применом вишезонским (MultiZone) структурирањем мреже. На компонентама које су јако осетљиве дискретизација је извршена са врлом фином мрежом састављеном од хексаедара. Остатак нумеричког домена је структуриран неструктурираном мрежом изграђеном од тетраедара. Најкритичнији део целокупног нумеричког поступка са становишта компјутерских ресурса представља управо поступак генерисања мреже унутар нумеричког домена. Сprovedено је постпроцесирање и анализа резултата за све појединачне компоненте параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења. Ови резултати представљају критична места напонских и деформационих стања појединих компонената структуре параболичног концентратора. На основу резултата критичне тоталне деформације параболичног рефлектора спроведена је оптичка анализа срачунавања оптичких површинских грешака чиме су јасно прорачунате вредности деформација на површинама свих 11 рефлекссионих сегмената.



Слика 6.2. Пример примењене нумеричке мреже (1742416 елемената, 3227389 чворова (лево), Увећани приказ нумеричке мреже (десно)



Слика 6.3. Еквивалентни Von- Mises-ови напони



Слика 6.4. Укупна деформација структуре концентратора - предња страна

Табела 6.1. Анализа сила и момената на систему за позиционирање (Solartechno - Италија)

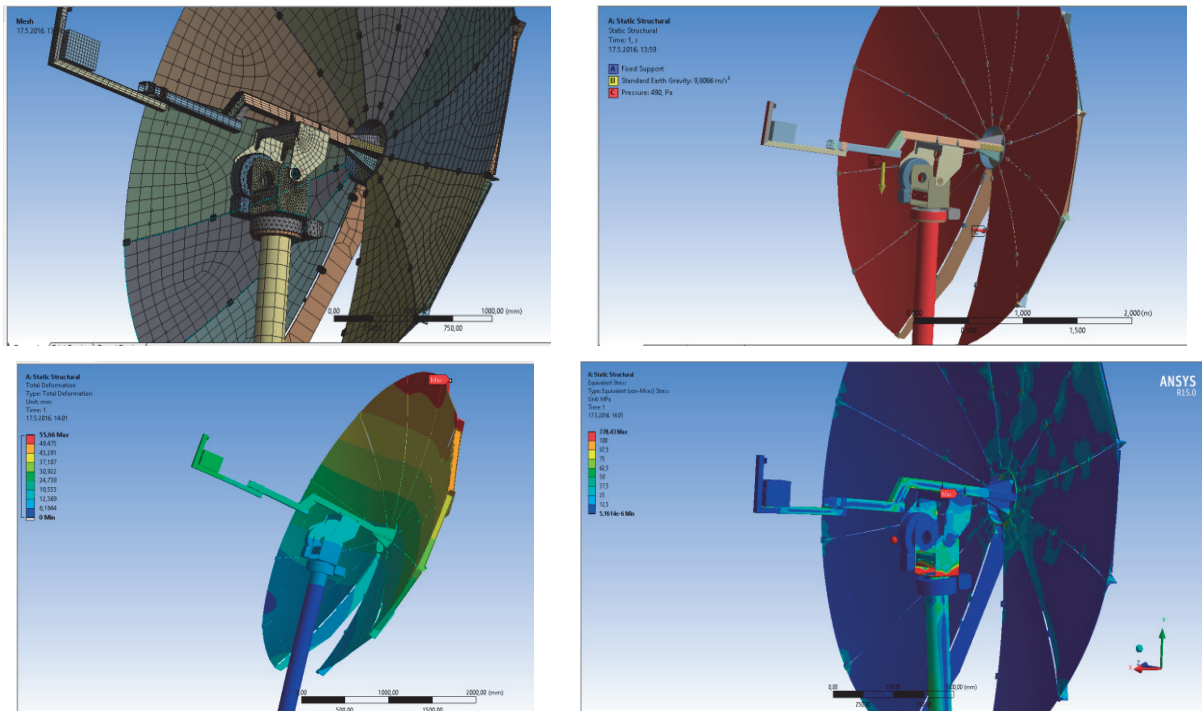
Место	Радијална сила [N]	Аксијална сила [N]	Момент превртања [Nm]
Slew drive позиционирање азимута	4760	7060	5073.5
Slew drive позиционирање елевације	8032.9	-1	4537.9

Након примене FEA анализе, резултати нумеричке симулације (деформације на површини концентратора) су интегрисани у оптичкој анализи како би се предвидела расподела флукса апсорбованог сунчевог зрачења на апсорберу под утицајем динамичког притиска ветра на површини концентратора при критичним брзинама струјања ветра (15-35 m/s).

У оквиру система за позиционирање разматрана су два механичка система (Two axis slew drives):

1. *TGB Group* из Шпаније
2. *Solartecno ST7* из Италије

Све нумеричке симулације су спроведене за веома критичне услове рада система. Анализиран је систем при динамичком притиску који генерише брзина ветра од 25m/s при радним условима и 35m/s при позиционирању система у сигурносни положај. Извршено је на десетине нумеричких симулација (динамички притисци од 380, 480, 800, 1100 Pa по сегменту од 1m<sup>2</sup>) при различитим правцима струјања ветра. Развијени прототип соларног параболичног система је задовољио очекиване резултате. Напонска и деформациона стања, као и анализа осетљивости су урађене за сваку компоненту система, али неће бити приказана у овој дисертацији због ограничености простора.



Слика 6.5. FEA модел параболичног концентришућег система за двоосно позиционирање

**Табела 6.2.** Анализа сила и момената на систему за позиционирање (TGB Group - Шпанија)

Место	Радијална сила [N]	Аксијална [N]	Момент превртања [Nm]
Slew drive - позиционирање азимута	3964,	7481,1 N	4337,8 Nm
Slew drive - позиционирање елевације	6883,1	-1	3927,7

Мале деформације на површини параболичног рефлектора значајно повећава површинске грешке као и грешке спекуларне рефлексије, грешке облика рефлектора, итд.

На бази великог броја нумеричких симулација извршено је димензионисање система за праћење путање сунца са минималним грешкама праћења трајекторије сунца у току рада (tracking errors).

На бази великог броја анализа усвојен је електромеханички склоп редуктора са укрштеним улежиштењем система за позиционирање соларног концентратора фирме “TGB Group” из Шпаније.

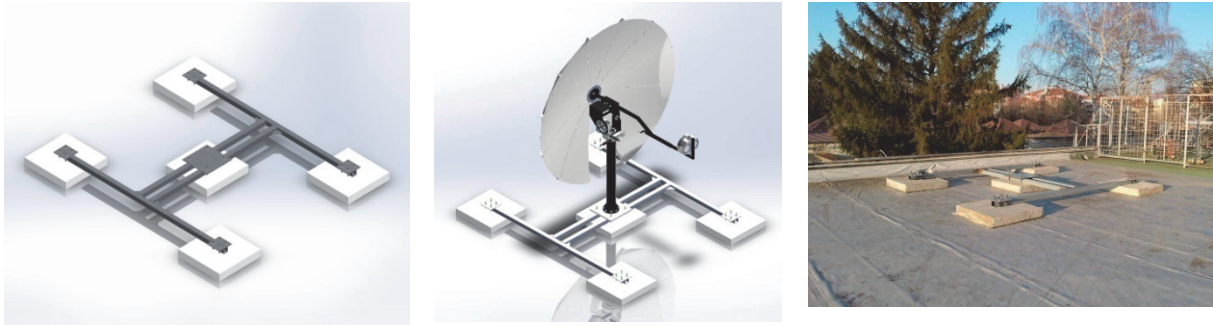
Компоненте система „TGB Group”, Шпанија:

- Погонски агрегат- DC мотор - BDC-24-236E-0C
- “Slewing drive solar tracking систем” TE314-Z0-RM

Више детаља о систему за позиционирање биће у осмом поглављу у делу експерименталног соларног концентришућег система, поставци експеримента и резултатима мерења.

Прототип соларног параболичног система је потребно обезбедити и добрим конструктивним решењем постоља које ће прихватити велике силе у аксијалном, радијалном правцу као и моменте увијања, моменте превртања. Соларни концентришући систем је изложен јаким ударима ветрова, што значи да систем треба да буде динамички стабилан и да одговори притиску ветра у домену дозвољених напона и деформација. Постоље је направљено од армирано бетонско - челичне конструкције. Постоље је пројектовано са аспекта минималног утрошка средстава уз висок степен сигурности као и поузданост у свим временским условима. На наредној слици је приказан 3D модел фундамента који је физички постављен на крову

Лабораторије за термотехнику Машинског факултета у Нишу. Постоље се састоји од 5 армирано бетонских елемената димензија 1 m x 1 m x 0,2 m. Тежина једног бетонског елемента је око 350 kg.



Слика 6.6. Постоље параболног концентришућег пријемника сунчевог зрачења

## 6.2. Савремене методе оптимизације параболних концентришућих пријемника сунчевог зрачења

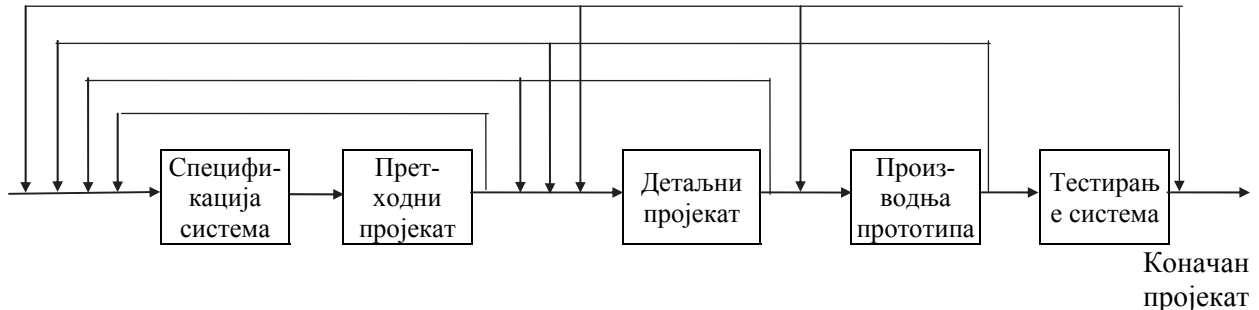
### 6.2.1. Оптимизација пројектовања оптичких система

#### ✚ Појам пројектовања соларног концентришућег оптичког система

Пројектовање било којег техничког система па и оптичких система је итеративан процес, што подразумева анализу неколико пробних система заредом, пре него што се добије прихватљив систем. У процесу пројектовања неопходно је коришћење пројектантовог искуства и интуиције да би се пројектовао најбољи систем. За различите системе придев најбољи има различито значење. У општем случају то подразумева економичан, ефикасан, поуздан и трајан систем.

Процес пројектовања почиње са идентификацијом потреба које могу да сагледају стручњаци различитих профила (инжењери или неинжењери).

Први корак у процесу пројектовања је прецизна дефиниција жељених особина система (спецификација система). Следећи важан корак у процесу пројектовања је претходни пројекат. Ту се разматрају различити концепти система који су представљени као веома идеализовани модели. У овој фази се врши одређивање подсистема. Одлуке које се у овој фази доносе углавном имају утицај на коначни изглед и перформансе система. На крају фазе претходног пројекта одређено је неколико обећавајућих концепција које треба детаљно проучити.



Слика 6.7. Модел развоја соларног оптичког концентришућег система

Трећи корак у пројектовању је детаљан пројекат свих подсистема за све концепције система изабране у претходном кораку. Овде се врши детаљна анализа и поређење свих подсистема. Резултат ове фазе пројектовања је тачан опис система који се у следеће две фазе производи и тестира.

У садашње време, уз брзи развој рачунара, може се неке учинити да се процес пројектовања може потпуно аутоматизовати, и да се пројектант може потпуно избацити. При томе би се користиле модерне методе оптимизације и одговарајући програми као црне кутије. То је можда тачно у неким случајевима, али пројектовање система је креативан посао који може бити веома комплексан. Такође је могуће да је оригинална поставка проблема лоша и да решење тако дефинисаног проблема не постоји. Зато, у највећем броју практичних проблема, пројектанти играју кључну улогу у вођењу процеса пројектовања. Они морају бити интегрални део процеса пројектовања и користити своју интуицију и одлучивати у проналажењу коначног пројекта система.

Сам процес пројектовања, у ужем смислу речи, било да се ради о класичном или модерном, који користи методе оптимизације и рачунаре, састоји се из неколико корака који су приказани на слици 6.7. Као што се са слике може видети оба процеса пројектовања су доста слична стим да процес пројектовања уз помоћ метода оптимизације захтева од пројектанта да експлицитно одреди скуп системских променљивих, функцију за оцену (ф-ја циља) која ће се у процесу оптимизације минимизирати и граничне услове које систем треба да задовољи. Оваква ригорозна математичка формулација проблема омогућује његово боље сагледавање и кључна је за



добра решења. Кључна разлика између два процеса пројектовања је у томе да у класичном процесу пројектовања не постоји функција за оцену и да се највећи део одлука доноси на основу пројектантовог искуства и интуиције.



Слика 6.8. Процес пројектовања соларног оптичког система

### Појам оптимизације система

Људска жеља за перфекцијом проналази израз у теорији оптимизације. Она проучава како да се опише и достигне оптимум, када је познато како да се одреди и измери оно што је добро или лоше. Оптимизација покушава да поправи перформансе система у смеру оптималне тачке или тачака.

У зависности да ли се ставља нагласак на теоријском аспекту (постојање услова за оптимално решење) или практичном (процедуре за постизање оптимума) оптимизација се може дефинисати као грана примењене или нумеричке математике, односно, као метода за пројектовање система помоћу рачунара. Многе оптимизационе

методе су засноване на принципима који су развијени у линеарној и нелинеарној алгебри.

Општа математичка формулација проблема оптимизације би била:

$$\begin{aligned} \text{Минимизирај} & \quad f(x) \\ \text{и задовољи граничне услове} & \quad g_i(x) = b_i; \quad i = 1(1)m \\ & \quad h_j(x) \leq c_j; \quad j = 1(1)n \end{aligned} \quad (6.1)$$

где је:

$x$  вектор системских (конструктивних) променљивих,

$f(x)$  функција за оцену,

$g_i(x)$  и  $h_j(x)$  опште функције које дефинишу граничне услове,

$m$  укупан број граничних услова једнакости,

$n$  укупан број граничних услова не једнакости.

Правилно разумевање улоге функције за оцену (ф-је циља) у процесу оптимизације је од кључног значаја па ће зато бити детаљно објашњено.

Идеја о функцији за оцену се налази у основи сваког пројектовања. Нека су задате две конструкције  $A$  и  $B$  за одређену примену. Пројектант треба да се одлучи за једну од њих која ће се производити. Он може да напише:

конструкција  $A$  је боља од конструкције  $B$  ( $A \supset B$ ),

конструкције  $A$  и  $B$  су једнаке ( $A = B$ ),

конструкција  $A$  је гора од конструкције  $B$  ( $B \subset A$ ).

Ови изрази дефинишу операције приоритета. Треба нагласити да важе следећи закони:

- рефлексивности

$$A \subset B \Rightarrow B \supset A \quad , \quad A = B \Rightarrow B = A \quad (6.2)$$

- транзитивности

$$\begin{array}{l} A \subset B \quad \text{i} \quad B \subset C \Rightarrow A \subset C \\ A = B \quad \text{i} \quad B = C \Rightarrow A = C \end{array} \quad (6.3)$$

Произвољан број конструкција може се поређати по приоритету  $A_1 \subset A_2 \subset A_3 \subset \dots \subset A_n$ . На овај начин свака конструкција у скупу је повезана са индексом позитивним целим бројем. Ова релација може се сматрати функцијом за оцену. Значи, функција за оцену је било која функција која пресликава скуп конструкција у позитивне целе бројеве према правилу приоритета. Горња дефиниција може се уопштити и за бесконачно велики скуп. Скуп постаје бесконачан када се један или више параметара континуално мењају у оквиру одређеног интервала. Логично је тада да се цели бројеви замене реалним бројевима. Дефиниција функције за оцену може да гласи:

Функција за оцену је било која функција која пресликава простор конструкција у скуп позитивних реалних бројева на начин доследан правилу приоритета.

Формирање функције за оцену је само погодан начин да се изразе приоритети које је задао пројектант.

Напред је на уопштени начин дефинисана функција за оцену, а за примену сада треба изабрати њен погодан облик. Са математичке тачке гледишта пожељно је да та функција буде:

- континуална,
- диференцијабилна по свим конструктивним параметрима и лака за прорачун.

Најчешћи избор за функцију за оцену је функција коју је употребио Легендре у класичној методи најмањих квадрата. Ако са  $(f_1, f_2, \dots, f_m)$  означимо аберације, а са  $(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)$  скуп тежинских фактора, тада се дефинише функција за оцену као:

$$\psi = (\omega_1 \cdot f_1)^2 + (\omega_2 \cdot f_2)^2 + \dots + (\omega_m \cdot f_m)^2 \quad (6.4)$$

Овај тип функције за оцену има многе предности, величина  $\psi$  је позитиван број који може бити нула само ако су све аберације нула (савршен оптички систем),

одговарајућим избором аберација ( $f_j$ ) и придружених тежинских фактора функције  $\psi$  може да задовољи основну дефиницију функције за оцену. То значи да у свакој итерацији постоје две конструкције од којих се једна одбацује, а друга усваја да буде полазна конструкција за следећу итерацију. У нормалном току оптимизације ове одлуке се морају донети много пута.

Коришћење функције за оцену даје програму правило за доношење одлука које су у складу са претходно израженим жељама пројектанта соларног оптичког система.

### 6.2.2. Класичне методе локалне оптимизације

Са појавом првих рачунара веома брзо се кренуло са развојем оптимизационих метода за пројектовање оптичких система. Показало се да функција за оцену може веома добро да се представи као збир квадрата аберационих функција то су од самог почетка истраживања о оптимизационим методама била усмерена у правцу класичних математичких метода оптимизације. Већина тих математичких метода заснива се на смањењу функције за оцену, а да су при том испуњени сви гранични услови који ограничавају вредности променљивих конструктивних параметара. Зато се класичне математичке методе оптимизације често називају методе локалне оптимизације јер оне могу да гарантују само проналажење локалног минимума, а од искуства, интелигенције и интуиције пројектанта зависи да ли ће тај пронађени локални минимум бити и глобални минимум. Највећи број истраживача у области оптимизације оптичких система користио је методу најмањих квадрата, односно неку од њених модификација

#### Метода најмањих квадрата

Многи научници 20-ог века су предложили да се у оптимизацији пројектовања оптичких система може применити класична метода најмањих квадрата. Од тада већина истраживача је као оптимизациону методу користила методу најмањих квадрата или неку од њених подваријанти.

Нека је број аберација  $M$  и број конструктивних параметара  $N$  и нека је  $\mathbf{X}$  вектор у вишедимензионалном простору координата  $x_j$ . Аберициона функција  $f_i$  нека је дефинисана као функција од променљивих конструктивних параметара:  $f_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$

Развијајући функцију  $f_i$  у Тајлог-ов ред у околини тачке  $(x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n})$  добија се:

$$f_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = f_{0i}(x_1, x_2, \dots, x_n) + \sum_{j=1}^N \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \cdot (x_j - x_{0j}) + \dots \quad (6.5)$$

Ако се занемаре изводи вишег нивоа (реда) добија се:

$$f_i = f_{0i} + \sum_{j=1}^N \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \cdot (x_j - x_{0j}) \quad (6.6)$$

где је:  $f_{0i}$  - вредност функције  $f_i$  за  $(x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n})$ .

Ако је:

$$\frac{\partial f_i}{\partial x_j} = a_{ij} \quad (6.7)$$

тада је:

$$f_i = f_{0i} + \sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot (x_j - x_{0j}) \quad (6.8)$$

или у матричном облику:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_0 + \mathbf{A} \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0) \quad (6.9)$$

где су:

$$\mathbf{F} = [f_1, f_2, \dots, f_m]$$

вектор аберационих функција,

$$\mathbf{F}_0 = [f_{01}, f_{02}, \dots, f_{0m}]$$

вектор аберационих функција у околини тачке  $\mathbf{X}_0$  у којој је вршен развој у Тејлог-ов ред,

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_m]$$

вектор конструкционих параметара,

$$\mathbf{X}_0 = [x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0m}]$$

тачка у вишедимензионалном векторском простору у којем вршимо развој у Тајлог-ов ред,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

матрица парцијалних извода и-те абериционе функције по j-том конструкционом параметру.

### 🔧 Метода пригушених најмањих квадрата

Да се превазиђу побројане тешкоће потребна је метода која ће ограничити промене конструктивних параметара тако да остаје разумни однос између предвиђеног побољшања и стварног побољшања оптичког система. Kidger у [20] дефинише величину са којом се врши контрола и ограничавање промене конструктивних параметара као:

$$\Phi = \sqrt{\sum_{j=1}^N x_j^2} \quad (6.10)$$

Kidger ову величину назива “дужина корака итерације” (*step length*) и из једначине (7.10) се види да представља збир квадрата променљивих конструктивних параметара  $x_j$ . Ограничење дужине корака итерације може се постићи пригушењем промене конструктивних параметара. Wynn и Wormell у [27] предлажу да се проблем реши модификовањем функције за оцену на следећи начин:

$$\Psi = \sum_{i=1}^M f_i^2 + p^2 \cdot \sum_{j=1}^N x_j^2 \quad (6.11)$$

где је  $p$  - фактор пригушења.

Овако дефинисана функција за оцену представља компромис између решења које се добија методом најмањих квадрата и решења које осигурава да дужина корака итерације буде мала.

Дужина корака итерације контролисана је са фактором пригушења  $p$  који је скалар.

Минимум функције за оцену је:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Psi}{\partial x_k} &= 0 \\ \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{F}_0 + \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{X} + p^2 \cdot \mathbf{X} &= 0 \\ \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{F}_0 + (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A} + p^2 \cdot \mathbf{I}) \cdot \mathbf{X} &= 0 \end{aligned} \quad (6.12)$$

$$\mathbf{X} = -(\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A} + p^2 \cdot \mathbf{I})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{F}_0 \quad (6.13)$$

где је  $\mathbf{I}$  јединична матрица  $N$ -тог реда.

Као што је раније изложено, скаларни фактор је уведен да се побољша конвергенција процеса. Из теорије линеарне алгебре познато је да је матрица  $\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A} + p^2 \cdot \mathbf{I}$  увек несингуларна за све реалне вредности фактора пригушења  $p$ . Ефекат ове модификације је спречавање програма да срачунава велике промене конструктивних параметара (велику дужину корака итерације) када је побољшање функције за оцену мало. Ако је фактор пригушења велики, тада ће бити срачунате мале промене у конструктивним параметрима, док ако је фактор пригушења мали, тада ће промене параметара бити велике, а ако је  $p$  превише мало промене параметара ће бити веће од опсега линеарности и метода ће дивергирати на исти начин као и метода најмањих квадрата.

У пракси постоје два начина да се одреди вредност фактора пригушења  $p$ . Први начин је одређивање његове вредности на основу нелинеарности система. Ако је неслагање између стварних вредности аберационих функција  $f_i$  и предвиђених вредности на основу линеарне апроксимације превише велико тада се фактор пригушења  $p$  повећава све док се не постигне унапред задати ниво подударности. Други начин одређивања фактора пригушења  $p$  састоји се у срачунавању функције за оцену  $\psi$  за одређени број вредности фактора пригушења. Тада се проналази крива која на најбољи начин описује добијене тачке. Проналажењем минимума криве добија се оптимална вредност фактора пригушења. Друга метода постиже нешто веће побољшање по итерацији, али зато свака итерација траје знатно дуже.

Горе описани начин пригушења у теорији је познат као пригушење сабирањем (*additive damping*). Главни недостатак ове методе је да она третира све променљиве на подједнакој основи. Уопштено гледајући нелинеарност или осетљивост решења на грешке у прорачуну парцијалних извода и грешке заокруживања, варираће од варијабле до варијабле. Користећи методу пригушења сабирањем величина фактора пригушења одредиће се помоћу најнепозданије променљиве.

На тај начин предложен је алтернативни метод избора фактора пригушења  $p$  које

је назвао пригушење множењем (*multiplicative damping*). Он предлаже да се минимизира следећа функција за оцену:

$$\Psi = \sum_{i=1}^M f_i^2 + p^2 \cdot \sum_{j=1}^N q_j^2 \cdot x_j^2 \quad (6.14)$$

где је  $p$  - позитивни фактор пригушења који изражава релативни значај аберационих разлика и инкремента конструктивних параметара док су  $q$ -ови тако дефинисани фактори пригушења који изражавају релативни значај променљивих конструктивних параметара.

Фактор пригушења  $q$  може се дефинисати као:

$$q_j = \sqrt{\sum_{i=1}^M a_{ij}^2} \quad (6.15)$$

Као што се види фактор пригушења у методи састоји се из два дела:

- првог скаларног који узима у обзир аберационе разлике и инкременте конструктивних параметара и потпуно одговара фактору пригушења  $p^2$  у методи пригушења сабирањем, другог матричног који је дефинисан дијагоналном матрицом  $Q$  чији су елементи

$$q_j^2 = \sum_{i=1}^M a_{ij}^2$$

који узима у обзир променљиве конструкционе параметре.

Минимум функције за оцену  $\frac{\partial \Psi}{\partial x_k} = 0$  даје:

$$\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{F}_0 + \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{X} + p^2 \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{X} = 0 \quad (6.16)$$

Пошто су ти елементи једнаки елементима на главној дијагонали матрице  $\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A}$ , то једначина 7.16 постаје:

$$\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{F}_0 + (1+p^2) \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{X} = 0 \quad (6.17)$$

Односно решење (вектор  $\mathbf{X}$ ) је дефинисано једначином:



$$\mathbf{X} = -\left[(1+p^2) \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A}\right]^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{F}_0 \quad (6.18)$$

Из тога се види да је једина разлика између те две методе у начину на који се бира фактор пригушења. У случају пригушења сабирањем бира се само први део фактора пригушења  $n$  који зависи од аберационих разлика и инкремената  $\Delta x_j$ . Веома је битно да се користи исти инкремент за све радијусе преломних површина, други инкремент за сва растојања, трећи инкремент за све индексе преламања, а четврти инкремент за све дисперзије. То значи да постоји једна вредност фактора пригушења  $n$  за све радијусе, друга вредност  $n$  за сва растојања, итд. Најважнија особина ове методе је да она неће дати задовољавајућа решења ако су вредности за инкременте радијуса, растојања, индексе преламања и дисперзије лоше одабрани.

Код методе пригушења множењем фактор пригушења се састоји из два дела од којих се други део рачуна по једначини (6.16) па је због тога фактор пригушења различит за сваки променљиви констукциони параметар.

### 6.2.3. Модерне метахеуристичке методе

Класичне методе оптимизације оптичких система, а нарочито нека од варијанти методе најмањих квадрата, гарантовале су проналазак само локалног минимума. Оне су много зависиле од избора почетне тачке оптимизације. Ако се она добро изабере, тј. ако се изабере одговарајући полазни оптички систем, тада се пронађени локални минимум обично поклапа са глобалним минимумом, док ако се она лоше изабере, тј. ако се изабере неодговарајући оптички систем, може се десити да се уопште не може пронаћи локални минимум који има бољу функцију за оцену од полазног оптичког система. Као што се види улога пројектанта оптичких система је била веома велика и избор полазног оптичког система је зависио од његовог искуства, интуиције и интелигенције. Зато се у последњих десетак година врше веома интензивна истраживања како да се реши горе описани проблем превелике зависности оптимизационог процеса од избора полазне тачке. Предложено је више начина, од којих сваки има своје мане и предности. Употреба мета-хеуристичких метода може бити оправдана из следећих разлога: (i) сложеност проблема који се решава спречава примену детерминистичких (егзактних) метода, и (ii) веома велики број могућих решења спречава примену алгоритама исцрпног претраживања.

Један од основних праваца истраживања је био проширење постојеће методе и познат је као претраживање локалне околине. Суштина методе је веома једноставна и састоји се у следећем: процес оптимизације стартује са субоптималним решењем одређеног проблема и претражује дефинисану околину тог решења не би ли нашао неко боље решење. Када га пронађе оптимизација се поново стартује од новог решења. Процес оптимизације се одвија све док се проналазе нова боља решења и зауставља се када се не може пронаћи ни једно ново боље решење од постојећег (текућег) решења.

Једна од могућности која се релативно скоро појавила је метода којом се дозвољава кретање оптимизационој методи и “уз брдо”. Класичне оптимизационе методе дозвољавале су само кретање “низ брдо”. Омогућавањем кретања “уз брдо” дозвољено је оптимизационом алгоритму да се извуче из локалног минимума и настави са претрагом за новим, бољим локалним минимумом.

Класичне методе оптимизације су засноване на чисто математичким теоријама. Последњих година се јавила идеја да се у оптимизацији техничких система покушају симулирати неки природни процеси. Ова идеја се показала као веома успешна у решавању комплексних проблема. Развијено је више метода међу којима су:

- симулирано очвршћавање (simulated annealing) које представља аналогију са термодинамичким процесима,
- генетски алгоритми (genetic algorithms), еволуционарне стратегије (evolution strategies) и еволуционо програмирање (evolutionary programming) представљају покушаје поједностављеног моделовања теорије еволуције у оптимизацији сложених техничких система.

### Генетски алгоритми

Генетски алгоритми (ГА) су адаптивне методе које могу да се користе приликом решавања комплексних проблема претраживања и оптимизације. Они су засновани на упрошћеној симулацији генетских процеса у оквиру биолошких организама. Током много генерација, природне популације развијају се према принципима природне селекције и “преживљавања најбољих”, које је први описао Charles Darwin у својој чувеној књизи “Порекло врста”. Имитирајући тај процес генетски алгоритми могу да “развију - еволуирају” решења за стварне комплексне проблеме.

У природи јединке у популацији се такмиче међу собом за ресурсе као што су храна, вода, заклон. Чланови исте врсте се често такмиче да привуку женку. Јединке које су више успешне у преживљавању и привлачењу женки имаће релативно већи број потомака.

ГА користе директну аналогију са природним понашањем. Они раде са популацијом “јединки” које представљају могућа решења датог проблема. Свакој јединки је додељена одређена вредност према томе колико је то решење проблема добро. Јединке са већом функцијом за оцену добијају више шанси да “репродукују” путем “укрштања” са осталим “родитељима” са високом функцијом за оцену. Јединке са ниском функцијом за оцену имају малу вероватноћу да буду изабране за репродукцију и полако “изумиру”.

Читава нова популација могућих решења проблема се производи избором најбољих јединки из текуће “генерације” и размножавајући их међу собом да произведу нови скуп јединки. Та нова генерација садржи већи број особина које су поседовали добри чланови претходне генерације. На тај начин, током доста генерација, добре особине се шире кроз популацију, мешају се и размењују са осталим добрим карактеристикама. Фаворизујући спајање јединки са највећом функцијом за оцену, истражују се области простора претраживања које највише обећавају. На тај начин популација ће конвергирати ка оптималном решењу проблема.

Током двадесетак година истраживања дефинисано је више варијанти ГА од којих ће овде бити описана само основна варијанта, тзв. канонични ГА или класични ГА. Снага ГА се огледа у чињеници да они представљају робустан алгоритам који може успешно да решава широку област проблема, укључујући и такве проблеме који су тешки или нерешиви за остале методе. ГА не гарантују проналажење глобалног оптималног решења проблема, али они су углавном добри у проналажењу “прихватљиво добрих” решења проблема на “прихватљиво брз” начин. Тамо где постоје специјализоване технике за решавање одређених проблема оне вероватно дају боље резултате од ГА како у питању брзине конвергенције тако и питању тачности крајњег решења. Главна примена ГА је у специфичним и тешким областима где не постоје специјализоване технике. Чак и тамо где постоје специјализоване технике које добро раде, постигнута су унапређења у повезивању ГА са тим техникама, тзв.

хибридизација ГА.

### ✚ Симулирано каљење (очвршћавање)

Идеје које чине основу симулираног очвршћавања први су објавили Metropolis и остали. Алгоритам који симулира процес каљења, који се у суштини састоји од загревања материјала до температуре нешто изнад тачке топљења и каснијег полаганог хлађења. У основи, Metropolis-ов алгоритам симулира промену енергије система у процесу хлађења док систем не конвергира у стабилно “замрзнуто” стање. Тачно тридесет година касније, 1983. године, Kirk Patrik и остали су предложили да се та симулација може користити као оптимизациона метода. Тај рад објављен у часопису *Science* изазвао је велико интересовање и велики број истраживача је покушао да га примени у оптимизацији разних техничких система.

Симуларно очвршћавање је засновано на физичким законима који су постављени у статистичкој механици и термодинамици. Metropolis је дефинисао свој алгоритам који омогућава ефикасну симулацију скупа атома у стању равнотеже за дату температуру. У сваком кораку тог алгоритма атом се на случајан начин помера за малу величину и срачунава се резултујућа промена  $\Delta E$  у енергији система. Ако је  $\Delta E \leq 0$  померај се прихвата и конфигурација са помереним атомом се користи као полазна тачка за следећи корак симулације. За случај  $\Delta E > 0$  поступа се према законима вероватноће. Вероватноћа да ће конфигурација бити прихваћена је изражена једначином:

$$P(\Delta E) = \exp\left(\frac{-\Delta E}{k \cdot T}\right) \quad (6.19)$$

где су:

- $k$  - Boltzmann-ова константа;
- $T$  - тренутна температура на којој се налази систем.

Једначина (6.19) представља познати Boltzmann-ов закон расподеле из физике. За генерисање случајних бројева који су потребни алгоритму могу се користити униформно распоређени случајни бројеви у интервалу (0,1). Вира се један случајан број и пореди се са вероватноћом  $P(\Delta E)$ . Ако је случајан број мањи од  $P(\Delta E)$  нова конфигурација се задржава, а ако је већи користи се оригинална конфигурација.

Понављајући овај основни корак велики број пута, може се симулирати топлотно кретање атома на температури  $T$ .

На релативно једноставан начин може се прећи са симулације термодинамичких процеса на оптимизацију. Табела 6.3 преводи величине које се користе у термодинамици у величине које се користе у комбинаторној оптимизацији.

**Табела 6.3.** Кореспонденција појмова из термодинамике и комбинаторне оптимизације

Термодинамичка симулација	Комбинаторна оптимизација
Системско стање	Доступно решење
Енергија	Функција за оцену
Промена стања система	Суседно решење
Температура	Контролни параметар
Замрзнуто стање	Хеуристичко решење

Треба имати у виду да је температура у процесу оптимизације обичан контролни параметар изражен у истим јединицама као и функција за оцену и да нема никакво физичко значење.

Најважнија особина алгоритма за симулирано очвршћавање је његова могућност да изађе из лоших локалних минимума тако што ће да дозволи погоршање функције за оцену са одређеном вероватноћом. Та врста “опраштајућег принципа” не може се пронаћи у већини оптимизационих метода.

Иако је сама структура алгоритма веома проста, веома је тешко одредити одговарајуће почетне вредности слободних параметара:

$T^{(0)}$  - почетна температура;

$d^{(0)}$  - почетни распон;

$\alpha$  - фактор хлађења;

$\beta$  - фактор смањеног распона;

$N$  - критеријум на основу кога се одлучује када је наступила "равнотежа";

$\varepsilon$  - доња граница температуре

### Monte Carlo алгоритам

Monte Carlo алгоритам је једна од најједноставнијих мета-хеуристичких метода која има широку примену у науци и инжењерству. Почев од пионирских студија Ulam-a, von Neumann-a, и Metropolis-a током 1940-их и 1950-их, овај алгоритам се примењују у готово свим областима симулације, моделирања и оптимизације. Под именом Monte Carlo налази се читава класа метода које се данас користе у рачунарској симулацији у сврху оптимизације. Класични Monte Carlo алгоритам се користи за анализу неизвесности детерминистичког прорачуна јер даје расподелу вероватноће алтернативних могућих вредности око номиналне (циљане) тачке. Monte Carlo алгоритам је настао као супротност детаљном претраживању простора допустивих решења које је практично неизводљиво у случају сложених проблема са великим бројем променљивих. Идеја Monte Carlo алгоритма, која се састоји у томе да се из простора допустивих решења на случајан начин бира нова тачка која представља ново решење, постала је саставни део готово свих мета-хеуристичких метода. Уколико је то решење боље од тренутно најбољег решења, усваја се као ново најбоље, у противном се одбацује. Овај поступак се понавља све док се не задовољи неки, унапред задати критеријум (број итерација, број покушаја између две поправке текућег најбољег решења) [43]. У циљу повећања тачности добијеног решења, може се применити вишестепени приступ где се израчунавања понављају тако што се у сваком следећем кораку смањује интервал претраге око најбољег нађеног решења. Како је за добијање довољно тачних решења потребно извршити веома велики број израчунавања, као и одговарајућих статистичких анализа, ефективна примена метода заснованих на Monte Carlo алгоритму почиње са појавом брзих рачунара. Основни кораци у примени Monte Carlo алгоритма за решавање инжењерских оптимизационих проблема су:

Генерисање псеудо-случајних бројева узимајући у обзир ограничења улазних односно независних променљивих, израчунавање зависних променљивих тј. функција циља, понављање израчунавања велики број пута, анализа добијених резултата.

## Еволуционе стратегије

Еволуционе стратегије (ES) су алгоритми који имитирају принципе природне еволуције као методе за решавање проблема параметарске оптимизације. Развили су их заједнички Bienert, Rechenberg i Schwefel у Немачкој током 60-тих година. Еволуционе стратегије се могу поделити на две велике групе:

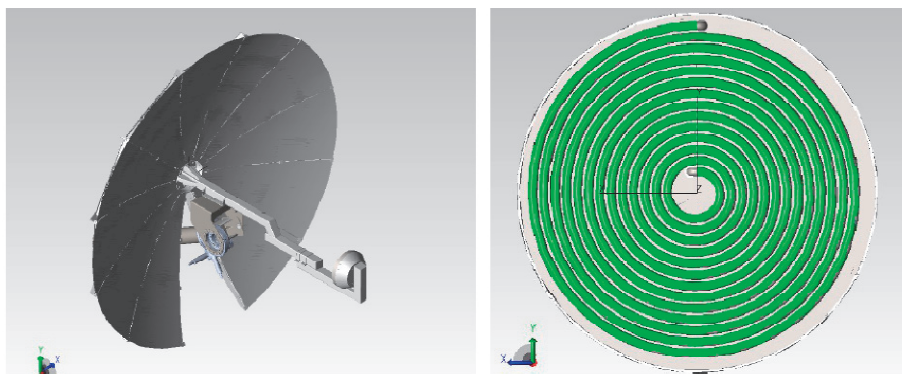
- двочлане еволуционе стратегије;
- вишечлане еволуционе стратегије.

Поред наведених метода у оквиру оптимизације соларних концентришућих оптичких система добре резултате су показале и методе: метод ројевима честица (Particle Swarm Optimization, (Брент-ов метод ) - Brent's method, downhill simplex optimizer (Nelder-Mead method). Многи софтверски и оптимизациони алати у себи садрже ове оптимизационе методе. Brent-ов метода је оптимизациона техника за проналажење минималне вредности функције у једнодимензионом простору решења (то је само једна променљива). Нумеричка симулација и оптимизација параметара је урађена у комерцијалном софтверу TracePro 7.3.4. TracePro садржи у себи Monte Carlo оптимизер 2D симетрични и 3D несиметрични. Оптимизациони метод *Downhill Simplex* или *Nelder – Mead* метод су коришћене за проналажење оптималних параметара оптичког соларног концентришућег система.

### **6.3. Оптимизације прототипа вишесегментног параболичног рефлектора соларног концентришућег система**

#### **6.3.1. Формулација проблема оптимизације**

Основни задатак који се поставља приликом оптимизације соларног концентришућег система састоји се у оптимизацију рефлектора и оптимизацији пријемника - апсорбера концентрисаног зрачења. Основни задатак је обезбедити равномерну расподелу флукса апсорбованог зрачења на површини апсорбера као и прихватити што више флукса који долази са параболичног рефлектора (близу 100%-фактор хватања ближи јединици).



Слика 6.9. Соларни параболични концентратор (лево); Спирални глатки топлотни апсорбер окренут према концентратору (десно)

Димензије соларног концентратора	Димензије топлотног апсорбера
Параболични рефлектор са 11 идентичних сегмената	Спирална глатка и наборана цев апсорбера
Спољни пречник: 3800 mm	Спољашњи пречник спирале: 400 mm
Унутрашњи пречник отвора: 400 mm	Унутрашњи пречник: са. 19 – 31 mm
Жижна даљина: 2260 mm	Коефицијент апсорптивности: 90%
Коеф. рефлективности: 88 %	Секундарна рефлексија: 60 %

У свим нумеричким оптичким симулацијама које су спроведене у овој дисертацији усвојена је константна вредност за интензитет сунчевог зрачења од  $800\text{W/m}^2$ . На основу овог податка укупан флуks упадног зрачења на површину апертуре параболичног вишесегментног рефлектора је  $9073\text{W}$ . Са оптичке тачке гледишта модел соларног параболичног концентратора има једну празнину - површину на месту 12-те латице (сегмента). Идеја приликом пројектовања система је да се изостави 12- латица на уштрб постављања конструкционих елемената за ношење и покретање система у две управне осе (азимут и елевација). С друге стране у случају погоршања временских услова систем у року од 5 минута се паркира у сигурностни положај што је јако значајно са аспекта сигурности. Тако да је цела површина рефлектора заштићена од временских непогода. Облик профила специфичног флуksа апсорбованог сунчевог зрачења одговара профилу параболичног рефлектора (са једном празнином). Оптимизација и развој облика профила сегмената рефлектора као и облика и величине апсорбера треба да укажу како расподела флуksа зрачења утиче на



ефикасност апсорбера што је једна од ф-је циља. Садашња расподела флуksа зрачења је неуниформна са оптичке тачке гледишта. У оквиру ове оптимизације спроведен је поступак избора оптималних параметара како би профил расподеле флуksа зрачења на површини апсорбера био униформан.

#### **Гранични услови**

Гранични услови у оквиру нумеричке симулације: параболични рефлектор са 11 идентичних рефлектујућих сегмената, празнина на површини рефлектора мора остати из конструктивних разлога, укупни упадни флуks зрачења 9073W. Систем је пројектован као јефтин - са ниским трошковима израде (low-cost system). Из тог разлога рефлектор је пројектован из већег броја идентичних сегмената. Оптимизовани рефлектор такође ће бити сачињен из идентичних сегмената. Идеја је да се оптимизује систем али да при том облик и број сегмената остану исте како би се могао користити исти мастер калуп за све сегменте и на тај начин смањили трошкови израде реалног експерименталног прототипа. Уз помоћ комерцијалног софтвера TracePro 7.3.4 и TracePro 7.6 могуће је спровести нумеричку оптимизацију рефлектора. TracePro поседује алгоритам који је јако погодан за локалну оптимизацију.

То значи да ће од почетне конфигурације система он наћи локални минимум. Један од кључних ствари за добре оптимизационе резултате је почетна конфигурација система. То укључује одређивање параметара (променљивих) који се могу варирати у току нумеричке оптимизације. Расподела (дистрибуција) флуksа апсорбованог сунчевог зрачења на површини топлотног апсорбера се карактерише:

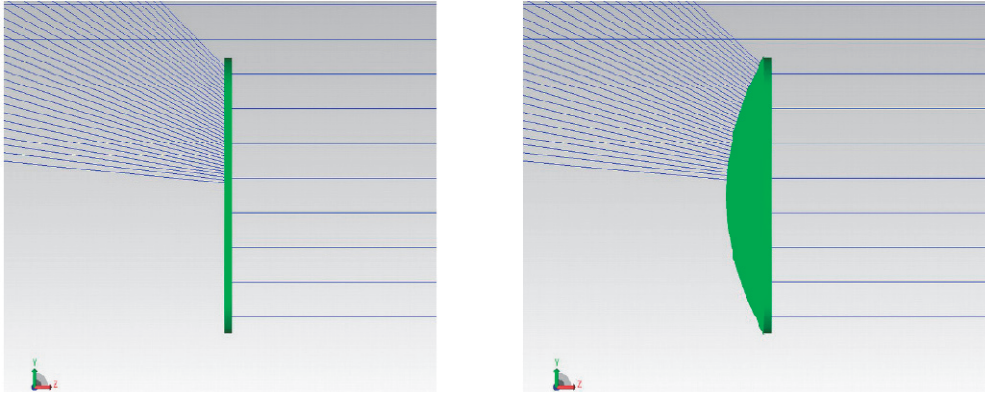
- променом просечног флуksа (ирадијанца) зрачења од центра ка периферији
- променом укупне снаге апсорбованог зрачења на површини апсорбера

### **6.3.2. Нумеричка оптимизација параболичног рефлектора**

#### **Униформизација флуksа концентрисаног сунчевог зрачења**

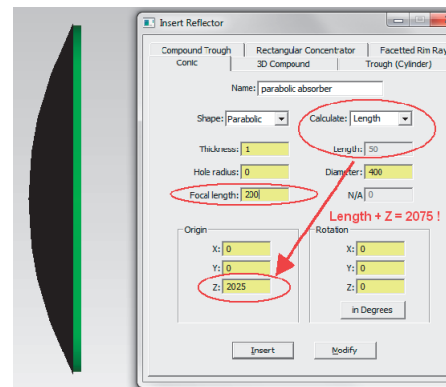
Нагиб профила расподеле специфичног флуksа апсорбованог зрачења на површини равног кружног апсорбера у фокусној равни карактеристично је за параболоидне концентраторе. Да би смо добили равномернији флуks зрачења на површини апсорбера потребно је симулирати нешто другачији облик од равног диска. На наредној слици биће детаљно приказан правац снопа упадних рефлектованих зрака на равни кружни и параболоидни апсорбер. Жижна даљина

параболичног/параболоидног апсорбера је одређена аналитичким путем и износи 200mm. Број симулираних зрака приликом аналитичког одређивања оптималне величине жишне даљине параболичног апсорбера је 120 000 сунчевих зрака.



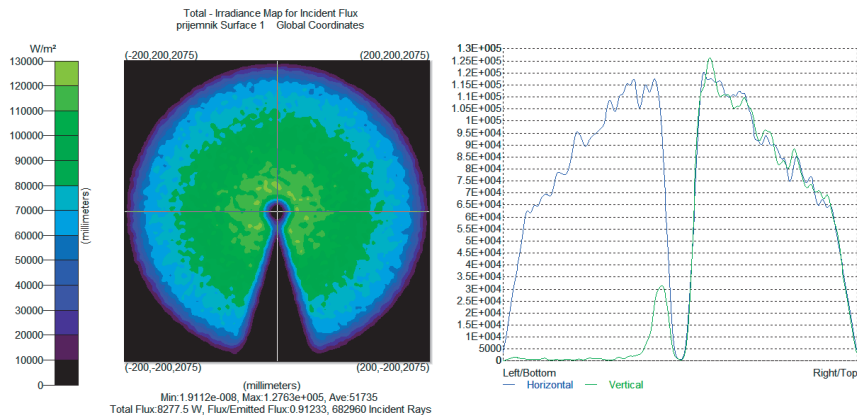
Слика 6.10. Приказ рефлектованих зрака на раван кружни апсорбер (лево); и параболоидни апсорбер (десно)

Оптимални положај рефлектора представља најближи положај рефлектора пријемнику/рисиверу за који је доњи део спиралног/равног/конусног апсорбера потпуно или максимално израчен.

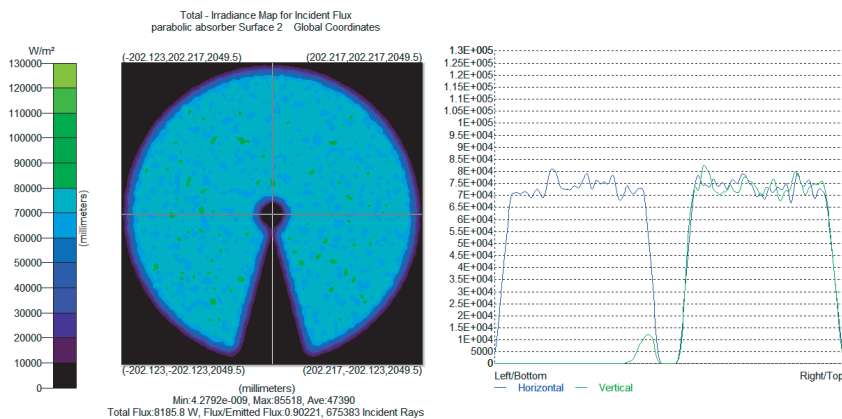


Слика 6.11. Дефинисање параметара параболичног апсорбера у оквиру TracePro Едитора

На наредним сликама су приказане мапе апсорбованог флукса на равном кружном и параболичном апсорберу. Разлика је очигледна у униформности флукса зрачења у радијалном правцу површине апсорбера дуж вертикалног и хоризонталног пресека. Прилагођавање облика апсорбера у многе може побољшати расподелу флукса зрачења и учинити је унуформнијом.



Слика 6.12. Расподела флуksа апсорбованог сунчевог зрачења на површини кружног апсорбера



Слика 6.13. Расподела флуksа апсорбованог сунчевог зрачења на површини параболоидног апсорбера

Разлика у укупној снази сунчевог зрачења за оба типа апсорбера је око 1%. Обе слике изнад имају исту скалу тако се лако могу поредити директно вредности укупне снаге сунчевог зрачења, просечног специфичног флуksа апсорбованог сунчевог зрачења као и фактора прихватања. Може се заочекивати да ће резултати са глатком спиралном цеви апсорбера бити слични. Мада они неће бити тако очигледни због закривљености цеви.

Слични резултати се могу постићи и са сферним обликом апсорбера, јер је параболоидни апсорбер прилично раван тако да може довољно добро апроксимирати помоћу сферичног сектора. Овим приступом могу се извући следећи закључци:

1. Пошто је топлотни апсорбер у облику Архимедове спиралне цеви може се обликовати у параболни облик без превише труда; Само конструкција кућушта мора бити пројектована са кавитетом који је истог облика као и

апсорбер. Ово је јако интересантно и има велику предност за истраживање, јер не захтева пуно новца за израду физичког модела, а могу се анализирати различите расподеле флукса зрачења на површини апсорбера.

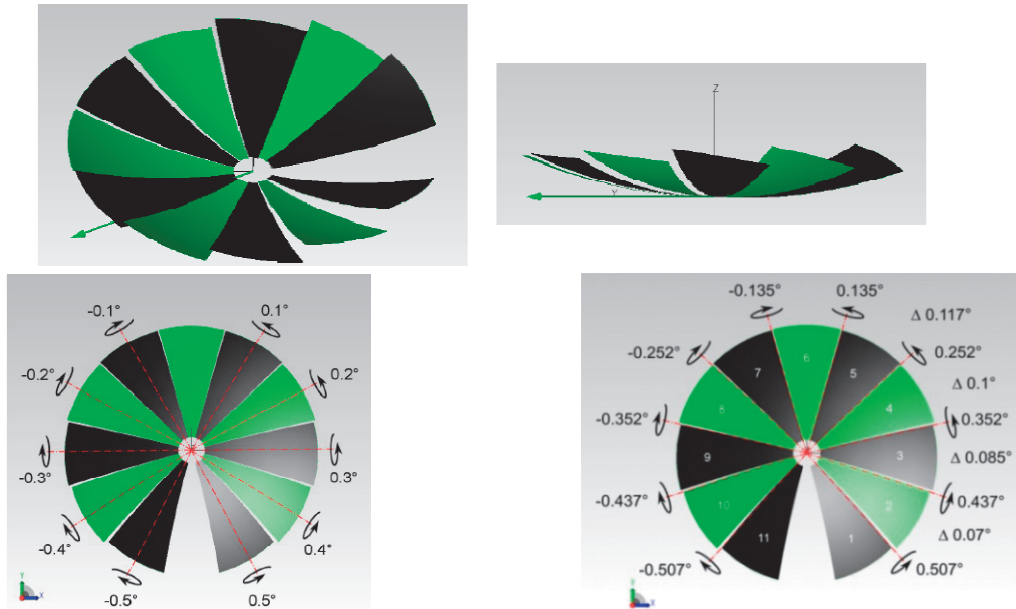
2. Постављањем апсорбера иза теоријског фокуса (2260 mm) и ротирањем за  $180^{\circ}$  такође би дао исти ефекат. У овом положају задњи део апсорбера такође може бити обликован у параболичном облику, што би могло имати предност приликом смањења напонских стања целе структуре од динамичког притиска ветра.

У наставку биће приказан начин како да се елиминише шупљина (неуниформност) у расподели флукса зрачења на површини апсорбера због недостатка једног сегмента параболичног рефлектора.

- а) Аксијално симетрични рефлектор. Оса симетрије сече рефлектор на два идентична дела на средини површине сегмента који недостаје. Обе половине рефлектора су тако обликоване да оне попуњавају једну половину равни апсорбера равномерно. Ово решење не може бити реализовано пошто захтева различиту геометрију сегмената, те стога неће бити разматран у наставку дисертације;
- б) Пошто садашњи систем има 11 сегмената, сваки сегмент зрачи у  $1/11$  равни апсорбера. Ако би сваки сегмент рефлектовао у  $1/12$  равни апсорбера тада би се сегменти могли заокретати на такав начин да се покрије озраченост целокупне површине апсорбера.
- ц) Рефлектујући сегменти треба да буду пројектовани тако да рефлектују/концентришу упадни флукс сунчевог зрачења строго униформно по целој површини апсорбера, са што мање пикова.

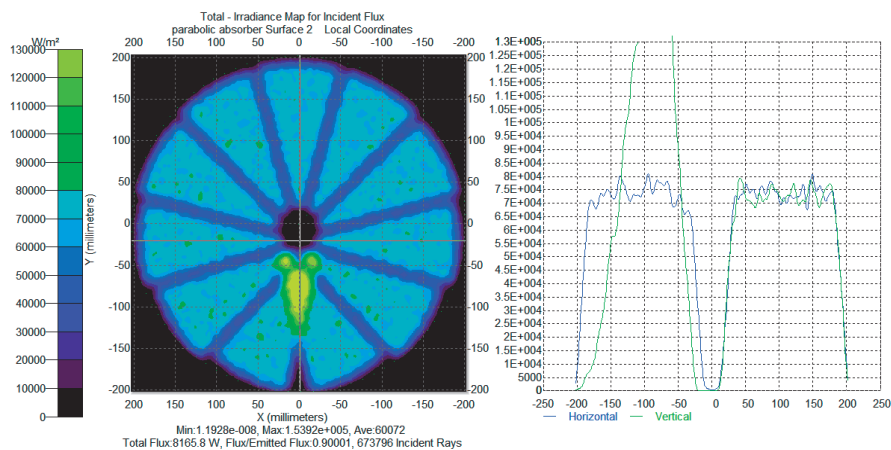
На нареднима сликама приказано је неколико начина елиминисања шупљина слике флукса зрачења на површини апсорбера закретањем сваког рефлектујућег сегмента (латице) понаособ. Ово је за сада теоријски приступ али се врло лако може применити и на реалном параболичном рефлектору уз мале модификације конструкције. Угао нагиба сваког наредног сегмента је повећан за  $0.1^{\circ}$ . Како би се омогућило видљиво закретање сваког сегмента, угао нагиба је повећан на  $3^{\circ}$ . Следећа слика приказује осе ротације сваког сегмента понаособ као и углове закретања у

односу на осу сваког сегмента. Постоји решење да се сви сегменти ротирањем доведу у исту раван, један испод другог. На тај начин је извршена брза аутоматизација процеса монтаже и демонтаже при екстремним временским условима.

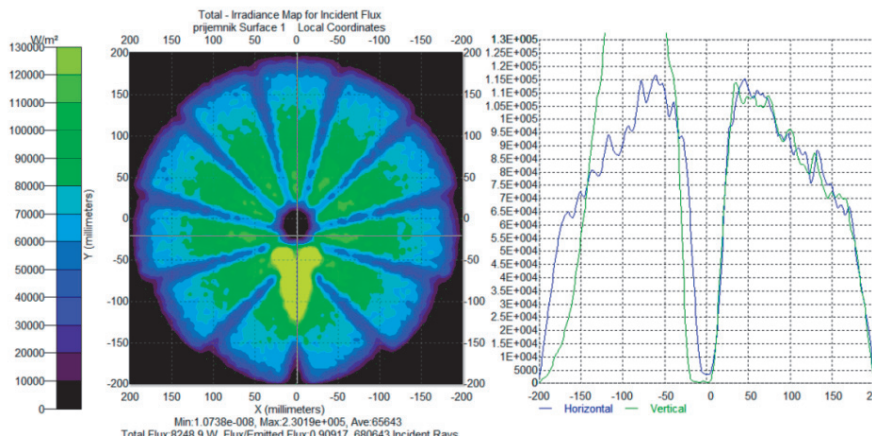


**Слика 6.14.** Осе ротације и углови нагиба рефлектора (лево); Поглед с преда параболничног концентратора са осама ротације, угловима нагиба појединих сегмената (десно)

Овај модел са закретањем појединих сегмената је такође креиран применом итеративног поступка у оквиру програмског језика Scheme Масго, који срачунава углове ротације сваког појединачног сегмента. Тако направљен параметарски модел је могуће оптимизовати у циљу добијања равномерније расподеле флукса зрачења на површини апертуре апсорбера.



**Слика 6.15.** Распореда флукса концентрисаног апсорбованог зрачења на параболоидном апсорберу ( $f = 200 \text{ mm}$ )



**Слика 6.16.** Распореда флуksа концентрисаног апсорбованог зрачења на равном кружном апсорберу озраченог параболичним рефлектором закренутих сегмената

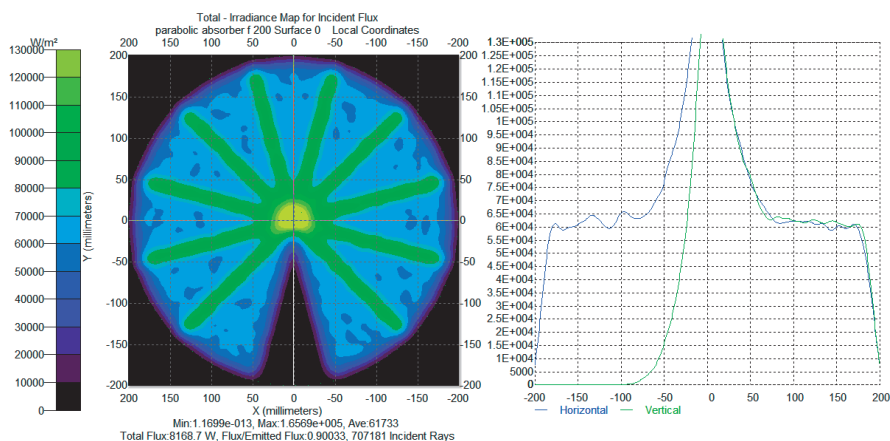
На овај начин је извршено униформно формирање флуksа зрачења, где је профил расподеле флуksа у радијалном правцу знатно равномернији код параболичног него код кружног апсорбера истог пречника. Може се видети са слика да празнина у флуksу која се генерише код почетног модела сада је затворена у оба случаја. Међутим на мапи флуksа запажа се да постоји место "врућа тачка" (hotspots) са високом вредношћу ирадијансе (специфични флуks апсорбованог флуksа зрачења), управо на месту преклапања сегмената у доњем делу параболичног рефлектора. Поред тога са слика се може констатовати да је ирадијанца између сегмената ниже вредности. То је и за очекивати, јер сваки сегмент концентрише флуks само на 1/11 од површине апсорбера.

Поље расподеле специфичног флуksа апсорбованог зрачења са површине концентратора може бити проширено

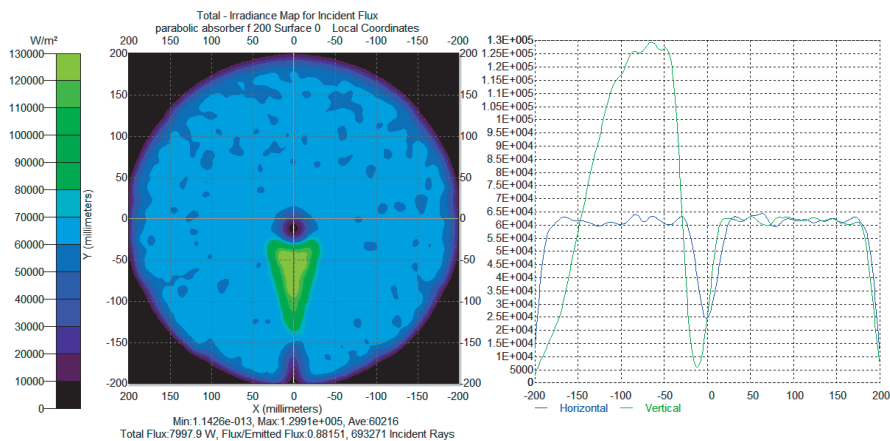
Зелене радијалне линије у облику профила звезде са изразитим "пиковима" на мапи флуksа зрачења показују повећање флуksа на месту преклапања области сегмената што је и за очекивати. У центру се налази област максималне вредности флуksа зрачења (ирадијансе) која показује да закривљење сегмената може такође попуњити област флуksа у центру апсорбера.

Резултат ове оптимизације је приказан корак по корак. Може се приметити да је дистрибуција флуksа зрачења веома равномерна (униформна). Велика празнина у површини озрачености је сада затворена, али још увек постоји мала празнина при дну.

У центру апсорбера се налази велика површина озрачености у облику троугла са високим вредностим специфичног флукса зрачења. Следећи корак оптимизације је елиминација високе вредности флукса троугластог профила. (слика 6.17). Направљен је нови математички модел са новим радијусом кривине како би проширио поље зрачења са површине сегмената.



Слика 6.17. Распдела флукса зрачења на параболичном апсорберу ( $f = 200 \text{ mm}$ ) озрачен концентратором са новим сегментима

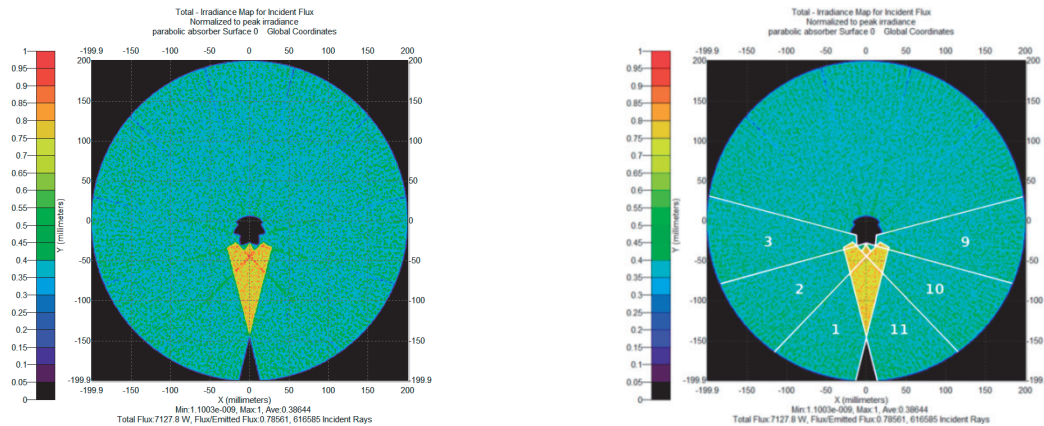


Слика 6.18. Распдела флукса зрачења на параболичном апсорберу ( $f = 200 \text{ mm}$ ) озрачен концентратором са проширеним пољем зрачења и нагнутиим сегментима

#### Анализа максималног флукса апсорбованог зрачења

Резултати оптимизације до сада су показали униформну расподелу флукса апсорбованог зрачења са озраченим највећим делом површине апсорбера. Максимум флукса зрачења који се појављује у доњем делу је резултат преклапања поља флукса апсорбованог зрачења заокренутих рефлектујућих сегмената.

На слици изнад се може видети да је максимум флукса зрачења настао услед преклапања поља озрачења због ротације сваког сегмента параболичног концентратора. Тако интензивно поље флукса није погодно јер може генерисати локална прегревања као и огромна термичка напрезања на површини зида цеви апсорбера услед смањеног одавања толите (смањена циркулација флуида).



Слика 6.19. Мапа флукса зрачења (лево) и мапа флукса са означеним кључним сегментима (Inkscape програм) (десно)

Поље флукса зрачења на параболичним сегментима није идентично, и мало је закривљено као резултат различитих углова ротације око осе сегмената. Тако да долази до преклапања:

*Сегмент (латица) 1 преклапа сегменте 11, 10 и 9.*

*Сегмент (латица) 11 преклапа сегменте 1, 2 и 3.*

*Сегмент (латица) 2 преклапа сегменте 11 и 10.*

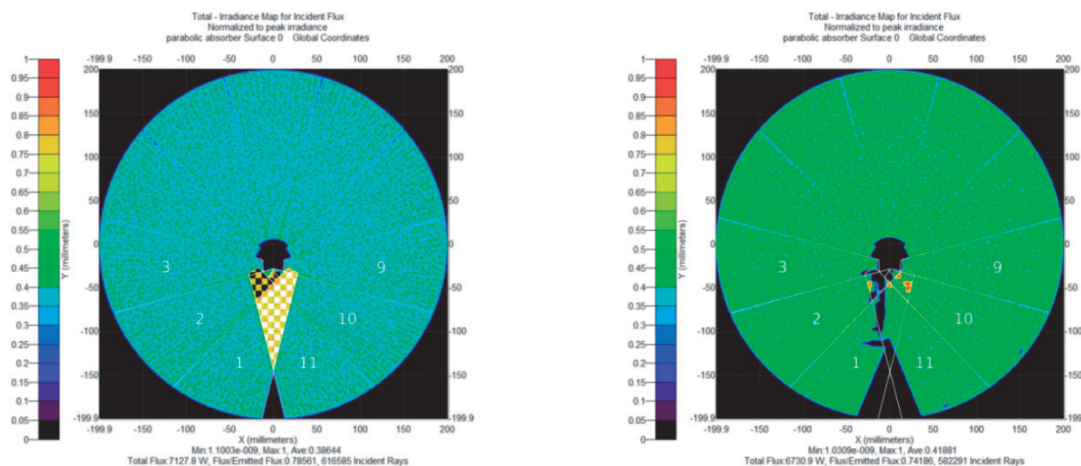
*Сегмент (латица) 10 преклапа сегменте 1 и 2.*

Слика 6.20 лево приказује осенчену зону сегмената 11, 1 и 2 који могу бити прекривени да би заштитили од превисоког (максималног) флукса на површини апсорбера. Постоје мала одступања услед ротације рефлектујућих сегмената око сопствене осе, што се наравно може објаснити тиме што ће покривена површина апертуре концентратора бити мало већа.

Слика 6.20 десно приказује осенчење апсорберске површине услед механичких склопова система за праћење сунца (Slew Drive system). Значано је напоменути да је максимаани флукс апсорбованог зрачења управо на месту прекривања сенком (засенчењем) од механичких компоненти. Такође је важно напоменути да је мала

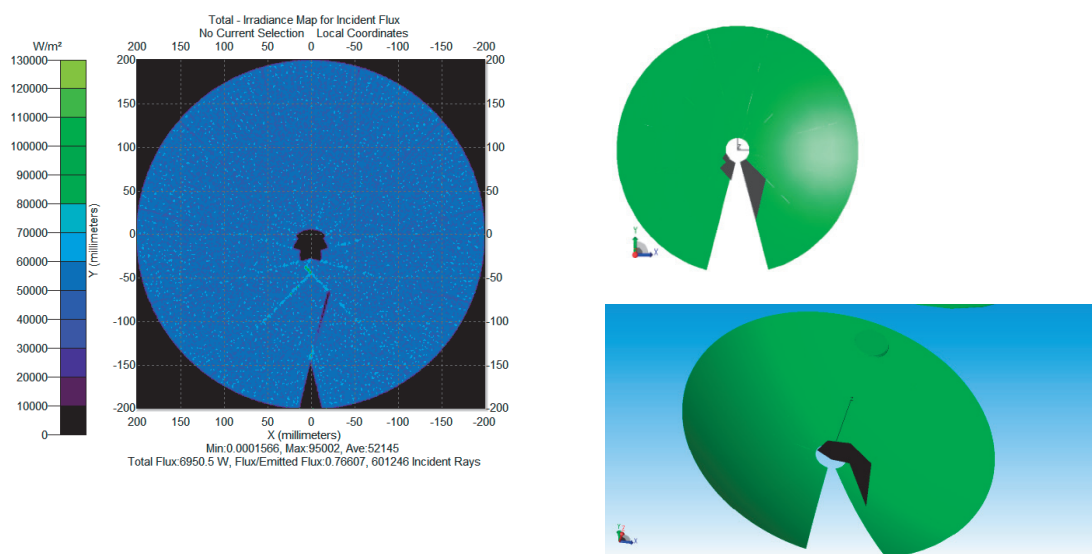


троугаона област зрачења (шупљина) у доњем делу проширена такође засенчењем од механичких компоненти.



**Слика 6.20.** Спречавање максималних флукса зрачења покривањем површине сегмената (лево), засенчење површине апсорбера од механичких компонента (десно)

У општем случају покривач не треба да буде у потпуном контакту са концентратором за спречавање деформитета услед температурских разлика. Оптимизација са равним прекривачем на месту недостатка 12-ог рефлектујућег сегмента концентратора без осенчења од механичких компонента приказано је на слици испод. На месту генерисања високе вредности флукса концентрисаног сунчевог зрачења на површини апсорбера, постављен је танак слој апсорбујуће танке површине испред површине рефлектора како би умањио пикове ирадијансе.



**Слика 6.21.** Мапа флукса на параболичном апсорберу (лево), недостатак 12- латице замењен танким слојем површинског покривача идеалне апсорптивности (десно)

Дизајн параболичног рефлектора са ротирањем сегмената повећава униформност флуksа апсорбованог зрачења на апсорберу. Налажење оптималних углова ротације сваког од сегмента значајно повећава оптичку ефикасности система као и униформност флуksа зрачења. Прилагођавањем геометрије сегмената може се попунити шупљина на мапи флуksа апсорбовааног зрачења.

### Оптимизација спиралног топлотног апсорбера

Интересантно решење за добијање униформне расподеле флуksа зрачења на површину апсорбера јесте коришћење параболичног облика апсорбера. То је један од начина оптимизације спиралног глатког апсорбера. У свим горе наведеним анализама површина апсорбера увек је представљена као равни диск а не као оригинални физички модел (наборана спирала). За то постоји двоструки разлог:

1. Оптимизација расподеле флуksа зрачења се односи на целу површину апсорбера. Равна површина апсорбера показује битније разлике у односу на спиралну површину, а самим тим олакшава процес;
2. Због великог нумеричког домена модела концентратора и спиралног апсорбера, веома је тешко мапирање флуksа зрачења, као и оптимизовати наборани спирални апсорбер због огромне разлике у величини. За оптимизацију је довољно да користите равну површину диска или глатку апсорберску цев.

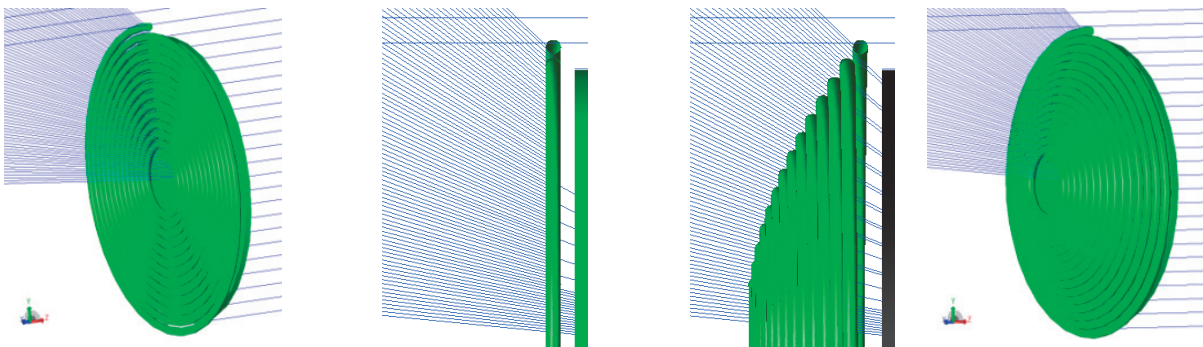
У оквиру нумеричког модела соларног топлотног апсорбера разматрана су три модела. С тим да је на крају изабран спирални апсорбер са попречним наборима. Наравно за поређење нумеричких резултата са набораном спиралом узета је глатка спирала као идеалан случај. У овом случају биће спроведена нумеричка оптимизација спиралног глатког апсорбера. Циљ ооптимизације је пре свега да се повећа укупна површина спирале изложена концентрисаном зрачењу, Код равног спиралног глатког топлотног апсорбера само половина укупне спољашње површине је изложена зрачењу што ће бити приказано у овом делу истраживања.

Без обзира на све, спирални цевни апсорбер има сигурно већи потенцијал за оптимизацију;

- Прва променљива (варијабла) - **корак спирале**: Очигледно је да гушћи навојци на спирали смањују губитке концентрисаних зрака који пролазе кроз шупљину апсорбера
- Друго - **параболични облик спирале**: Жижна даљина параболичног профила мора бити тако изабрана да генерише равномерну расподелу флукса апсорбованог зрачења. Жижна даљина параболичног равног апсорбера не може бити иста и за параболични спирални глатки апсорбер због услова рефлексије и угла упадних рефлектованих зрака са површине рефлектора.

#### **Корак спиралног глатког топлотног апсорбера концентрисаног зрачења**

Слике испод приказују разлику у пролажењу концентрисаних зрака између равног спиралног апсорбера и параболоидног спиралног апсорбера са идентичним кораком навојака спирале.



**Слика 6.22.** Пролажење концентрисаних зрака кроз шупљине спиралног равног апсорбера (лево) и кроз параболоидни спирални апсорбер (десно)

Слике изнад показују на који начин долази до концентрације сунчевог зрачења на равну површину спиралног топлотног апсорбера као и на параболичну површину (параболичан облик спиралног апсорбера). Слике приказују концентрацију сунчевих зрака са концентратора на горњој површини  $y$ - $z$ -равни. Оба типа спиралног топлотног апсорбера имају исти корак.

Са горње слике од средине лево део зрака се не апсорбује на горњој површини спиралног апсорбера, јер пролази кроз шупљине између цеви спирале. Са горње слике од средине десно већи део концентрисаних зрака се апсорбује на целом радијусу спирале. Ово је углавном због чињенице да су шупљине на спирали нормалније

вектору упадног сунчевог зрачења преко целог пречника апсорбера. Са друге стране параболични облик топлотног апсорбера доводи до равномерније расподеле флукса топлотног зрачења у односу на раван спирални апсорбер

Да би се смањило број зрака који пролазе кроз шупљине спиралног топлотног апсорбера, корак спирале треба да буде што је могуће мањи посебно за параболични облик спиралног апсорбера. Друго решење је боље, јер губи мање концентрисаних зрака кроз шупљине спирале. Решење се оправдава постављањем секундарне рефлексионе површине (огледала) иза спирале и бочно да би рефлектовали најмањи део зрака који долазе са задње стране топлотног апсорбера. Ово решење је усвојено као такво. Кавитет је конусно-цилиндричног облика са огледаластом површином унутар њега.

Број зрака који пролазе кроз центар отвора на спиралном апсорберу мора бити редукован, отвор у центру апсорбера мора бити смањен, отвор у средини параболичног концентратора такође треба бити смањен, тако да кривина параболичног концентратора у центру мора бити подешена.

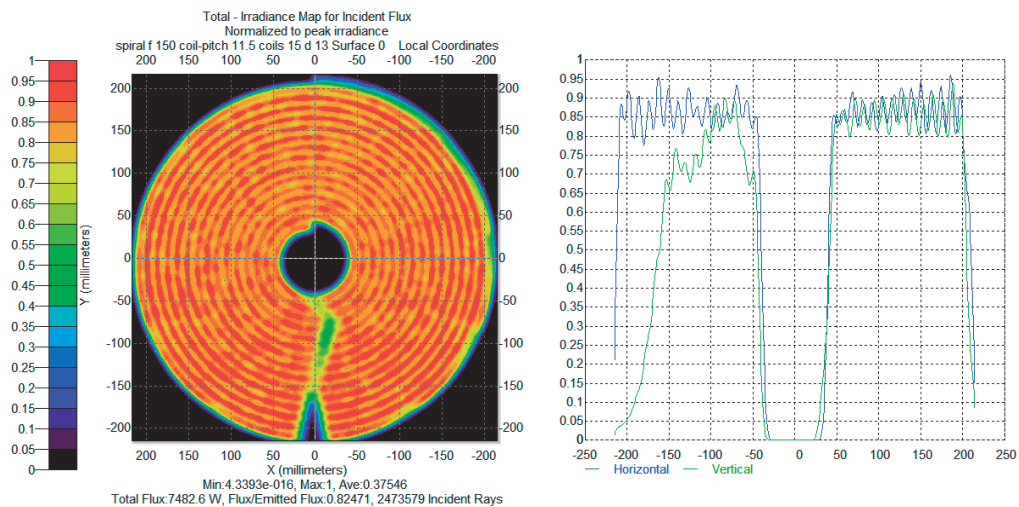
#### **✚ Спирални параболоидни топлотни апсорбер концентрисаног зрачења са глатком цеви**

Жижна даљина правога параболоидног апсорбера је  $f = 200\text{mm}$ . Расподела флукса апсорбованог сунчевог зрачења на површини спиралних цеви није униформна (равномерна), тако да жижну даљину је потребно додатно подесити (оптимизовати) на бази нумеричке симулације. Оптимизација је спроведена на полуатоматизован начин, генерисањем макроа за параболоидни спирални топлотни апсорбер. Направљен је математички модел у MathWorks програмском пакету. А затим у Scheme Macro програмском језику формиран је геометијски модел (scm. file). Поступак налажења равномерне расподеле флукса апсорбованог зрачења је спроведен итеративним поступком. Променом жижне даљине параболоидног апсорбера добијена је униформна расподела флукса на апсорберској површини.



Слика 6.23. Соларни параболични концентратор са параболоидним спиралним глатким топлотним апсорбером

Профил флукса апсорбованог зрачења на десној страни слике 6.24 показује да ирадијанса благо расте ка периферији апсорбера. Физички гледано врхови профила (тестерасти профил) представља делове цеви где је одређени број стохастичких зрака погодио цев под правим углом.



Слика 6.24. Мапа флукса параболоидног спиралног глатког апсорбера са подешеном жижном даљином  $f=150$ , пречник цеви  $d=13\text{mm}$  и корак спирале  $p=11.6\text{mm}$

#### Коначни модел спиралног глатког параболичног топлотног апсорбера

Параметри коначног спиралног параболичног апсорбера су:

жижна даљина  $f$ : 150mm

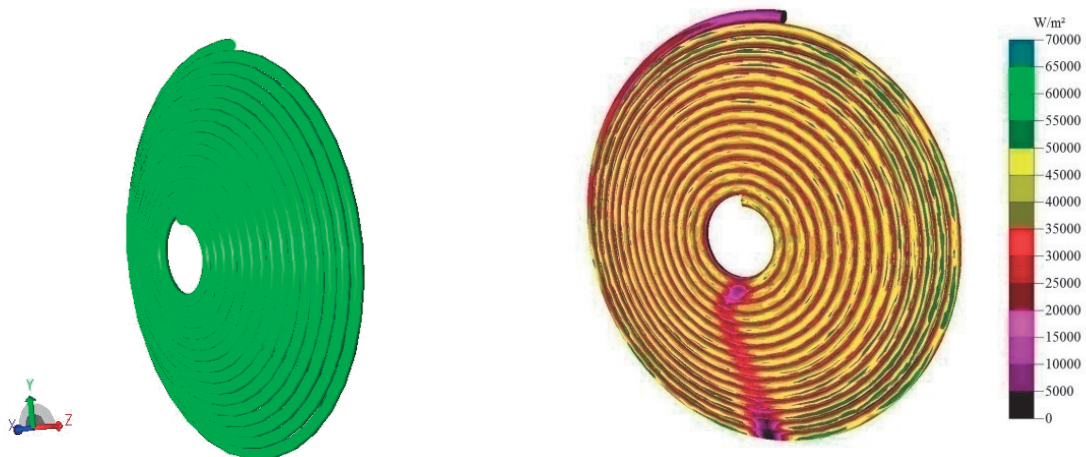
број навојака: 15

корака навојака спирале  $p$ : 11.5mm

спољашњи пречник цеви спирале: 13 mm

Гледајући врхове профила у хоризонталном и вертикалном пресеку на слици 6.24 десно може се закључити да они леже између 0.85% и 0.96% максималне ирадијансе 1 (специфични просечни флуks апсорбованог зрачења). То је веома близу захтеване униформности за расподелу флуksа зрачења +/- 5% просечног/осредњеног флуksа апсорбованог зрачења.

За овако сложене геометрије параметарски модели дају најбоље резултате. Изграђена је макро датотека са параметрима параболоидног спиралног топлотног апсорбера са глатким цевима и дефинисана као *spiral-pipe-z.scm*. Променљиве могу бити подешене на жељене вредности пре извршења самог макроя у било ком текстуалном едитору. У оквиру ове дисертације коришћен је Едитор Notepad++ који има директну спрегу са оптичким софтвером TracePro (Monte Carlo Ray Tracing).



**Слика 6.25.** Коначни 3D модел параболочног спиралног апсорбера (лево); 3D расподела флуksа апсорбованог зрачења

Главни инструмент за процену (предикцију) расподеле флуksа зрачења на површини топлотног апсорбера јесте карта (мапа) флуksа. То је од изузетне важности за разматрање, карта флуksа не представља реалну слику, али донекле предвиђа вредности флуksа који се очекују за дате услове истраживања. То се лако може видети променом опције за генерисање карте флуksа на површини апсорбера. У овом истраживању углавном су коришћени прикази дистрибуције флуksа зрачења у дводимензионалном облику, јер је време рачунања много брже него за генерисање флуksа у 3D простору. За даљу оптимизацију преноса топлоте (CFD анализа што није циљ ове дисертације), 3D расподела флуksа је од битне важности за комбиновање података за сваку чворну тачку генерисане мреже на спиралној цеви апсорбера.

### 6.3.3. Оптимизациони алгоритам

Алгоритам се може неформално описати као скуп правила која прецизно дефинишу редослед операција (видети [https://en.wikipedia.org/wiki/Algorithm#Informal\\_definition](https://en.wikipedia.org/wiki/Algorithm#Informal_definition)).

Почевши од формалне дефиниције компјутерског алгоритма за решавање тренутног оптимизационог проблема, подразумевало би пуно времена за његову имплементацију, како је проблем јако специфичан неопходно је учинити оплемењивање алгоритма од почетне тачке оптимизације. Ми смо одлучили да се задржимо на полуаутоматизованој оптимизацији. Да би се убрзао развој параметарских модела како самог параболичног концентратора тако и апсорбера различитих облика и димензија написани су одговарајући макрои у Scheme Macro језику за аутоматизацију и спрегу са оптичким симулационим окружењем TracePro.

#### Гранични услови

**Оптички систем:** вишесегменти параболични концентратор са шупљином, симетрични рефлектор, 11 огледаластих сегмената, спирални цевни апсорбер

**Симулационо окружење:** TracePro Expert from Lambda Research Corp., U.S.A.

#### Циљ оптимизације

Почетна расподела (дистрибуција) флукса апсорбованог зрачења у равни апсорбера, који је веома неуједначен (неравномеран), треба да буде што равномернији и што већи уколико је то могуће.

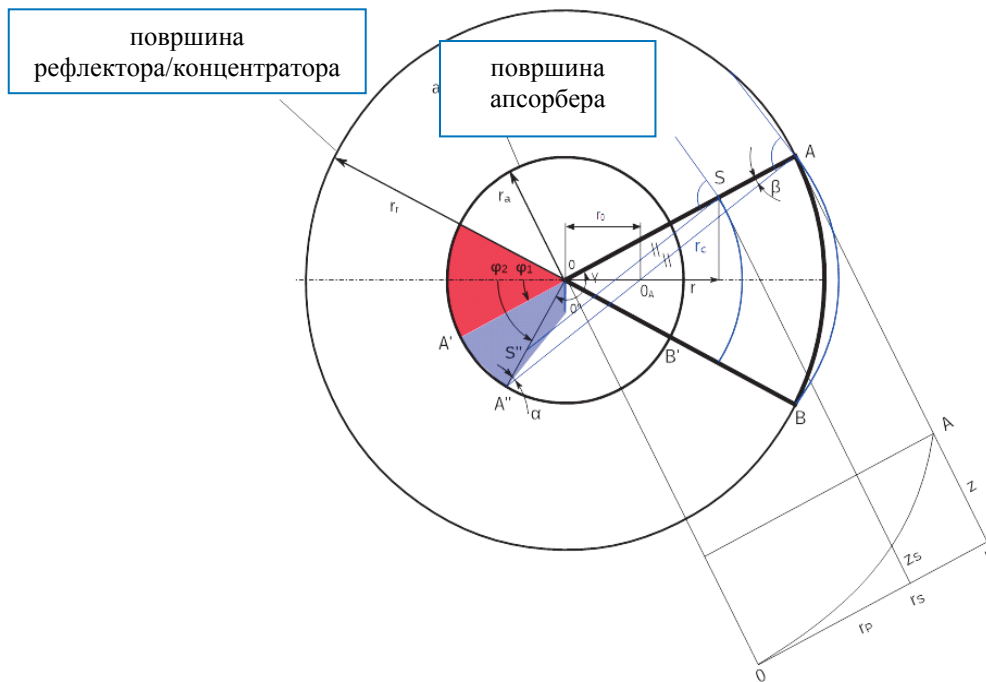
- Захтевана униформност флукса зрачења: +/-6% одступање од максималне ирадијансе (флукса апсорбованог зрачења), без појединачних пикова на профилу.
- Апсорбовани флукс (апсорбована снага концентратора): > 95% - да 95% рефлектованог флукса сунчевог зрачења са површине концентратора доспе на површину апсорбера - фактор хватања 0.95

#### Анализа и дискусија резултата

Сви кораци заједничких резултата система доводе до циљева оптимизације: Униформност флукса сунчевог зрачења +/- 6 % одступања од максималног зрачења, без појединачних пикова. За прецизније утврђивање одступања, неопходно је спровести нумеричке симулације са великим бројем зрака (преко 10 милиона), тако да

мапа флукса без *smoothing-a* (изравнавања- идеализовања флукса) показује глатку слику. **Флукс:** >90% рефлектованог флукса са површине параболичног концентратора. Фактор хватања може достићи вредност близу 0.95 (intercept factor) уколико је отвор у центру спиралног апсорбера мањи, што се касније и види у експерименталном тестирању концентришућег система.

У овом истраживању спроведена је нумеричка оптимизација соларног концентришућег система за апсорбер позициониран испред теоријског фокуса. Такође је могуће спровести математички и нумерички модел за позиционирање топлотног апсорбера иза теоријског фокуса. Поступак симулације и оптимизације је идентичан.



Слика 6.26. Развој математичког модела за нови радијус кривине сегмента концентратора за апсорбер постављен иза теоријског фокуса

#### 🔧 Оптимизација параболичног спиралног апсорбера постављеног иза теоријског фокуса код пуног параболичног концентратора

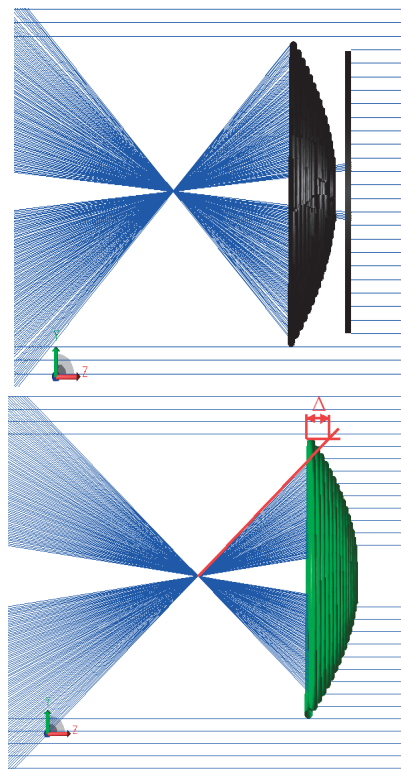
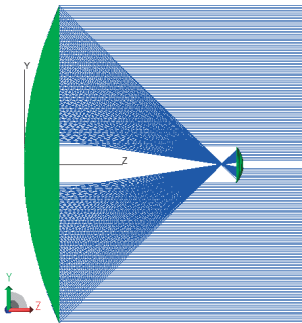
У овом делу спроведен је велики број нумеричких симулација у циљу тражења оптималног облика апсорбера са могућношћу максималне апсорпције упадних рефлектованих зрака (са малим кораком спиралног апсорбера). Затим је урађено преко 10-ак нумеричких симулација у циљу налажења жижне даљине за најбољу



дистрибуцију флукса апсорбованог зрачења (ирадијанса) - оптимум униформности

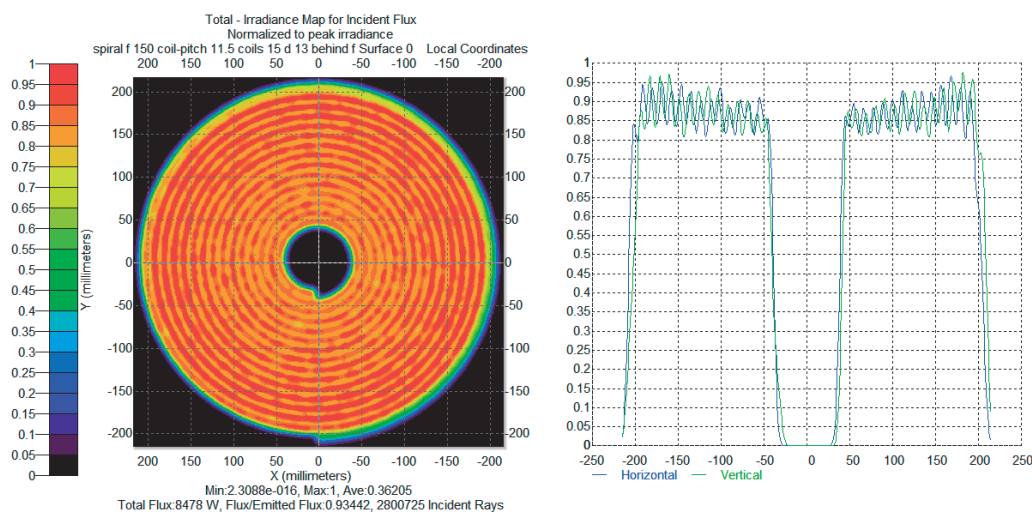
- Однос апсорбованог флукса/емитованог флукса на површини спиралног апсорбера: *Фактор хватања* спиралног параболичног топлотног апсорбера 0.825
- *Фактор хватања* параболичног концентратора: 0.904
- Флукс на површини апсорбера /флукс са површине апертуре концентратора:  $0.825/0.904 = 0.913$  - *фактор хватања*

Слика 6.27. Оптимални положај топлотног апсорбера ( $f=2445$  mm)

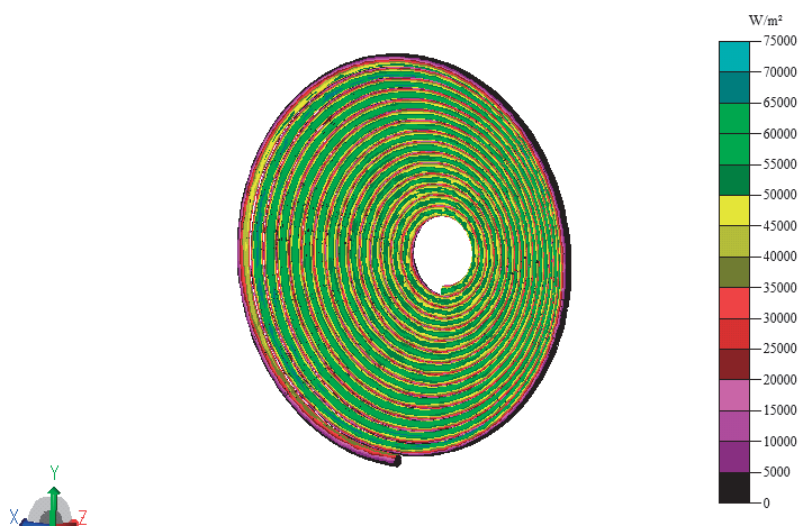


Слика 6.28. Почетна конфигурација за спирални апсорбер постављен иза теоријског фокуса (2260) mm

Слике 6.28 приказују почетну конфигурацију система. Првобитна позиција спиралне цеви је постављена као лик у огледалу у односу на теоријски фокус. Десна слика приказује лепезу концентрисаних зрака након преласка теоријског фокуса. Мало линијско померање (растојање)  $\Delta$  за апсорбер чија позиција одговара потпуном озрачењу површине спирале може се лако измерити.



Слика 6.29. Расподела флуksа на параболоидном апсорберу применом пуног параболочног концентратора, однос апсорбованог и емитованог флуksа је 0.93



Слика 6.30. 3D-Расподела флуksа на параболочном спиралном апсорберу постављеног иза теоријског фокуса пуног параболочног концентратора

### 📌 Закључци и нека практична разматрања

За безбедан и ефикасан рад соларног концентришујућег система важно је спречити пикове (високе вредности густина флуksа зрачења) на површини спиралног апсорбера, јер то може довести до прегревања и топљења цеви апсорбера као и прегревања зида цеви и флуида и довести до кључања и кавитације која уједно доводи до смањења ефикасности система. Све то захтева ниво толеранције приликом пројектовања система, да би се спречило генерисање пикова (високих уских тачкастих

поља зрачења) то захтева високе трошкове израде и квалитета параболичног рефлектора. Веома прецизан систем за праћење као и висока прецизност подешавања свих 11 рефлектујућих сегмената. Прецизним подешавањем углова закретања сваког сегмента око сопствене осе може се значајно утицати на равномерност флукса апсорбованог зрачења у фокусу концентратора. Ово се треба додатно истражити. Претпоставка је да толеранција углова нагиба сегмената могу нанети већи ризик од толеранција које се могу доделити на површини. У том случају не треба мењати закривљеност сегмената површине концентратора или променити у мањој мери. Утицај грешака праћења, геометријских деформација параболичне површине услед струјања ветра и температурских напрезања морају бити предвиђене и истражене да би се могло брзо и превентивно заштитити од пикова зрачења на апсорберској површини цеви које нису пожељне у системима концентрисања сунчеве енергије. У прилогу **ПЗ** дата је листа свих макроа који су коришћени за нумеричко моделирање, симулацију и оптимизацију. Коришћење ових макроа захтева основно познавање Макро система оптичког софтвера TracePro као и одлично познавање Scheme Macro језика. Сваки макро је написан тако да у сваком тренутку се може изменити параметар геометријског модела како самог параболичног концентратора тако и спиралног апсорбера. Величине набора на сваком навојку спиралног апсорбера су променљиве величине. Прави оптимизациони алгоритам ће бити у скорије време направљен, где ће у разматрање и тражење оптималних параметара ући и термички параметри, како би смо знали колико је наш концентришући систем ефикасан у термичком смислу поред оптичког сагледавања модела. Биће направљен алгоритам оптимизације у оквиру TracePro софтвера, Scheme Macro језика и Matlab-а, где ће се нумеричка симулација спроводити у оквиру TracePro-а, док ће оптимизација бити извршена преко Scheme Macro-а у Matlab-у. Примена Генетских алгоритама ће послужити за хомогенизацију униформности флукса сунчевог зрачења на површину апсорбера (Спрега Monte Carlo методе хода зрака и Генетског алгорита)..

# Глава 7

## **7. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСТРАЖИВАЊЕ**

---

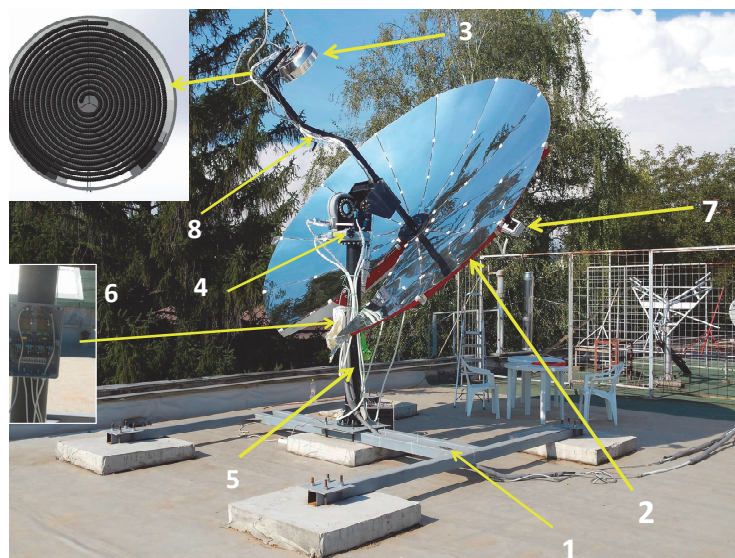
### **7.1. Циљ експерименталног истраживања**

Експерименталним испитивањима верификовани су формиран теоријски математички модели оптичког и термичког понашања поменутих концентришућих пријемника сунчевог зрачења. На основу анализираних резултата истраживања закључено је да постоји оправданост коришћења предложеног пријемно-рефлектујућег система. Централно место истраживања је испитивање функционалних карактеристика параболичног концентратора у реалним радним условима и утврђивање критеријума за оцењивање поузданости концентришућег система у целини. Експериментална истраживања овог типа су због своје сложености малобројна, а у нашим условима их практично и нема у овом облику па се на основу експерименталних резултата и савремених теоријских поставки (нумеричких метода) може доћи до веома значајних резултата оваквог типа пријемника сунчевог зрачења. Истовремено, соларни параболични концентришући пријемник сунчевог зрачења је конструисан и експериментално тестиран у циљу верификације формираних теоријских модела. У циљу симулирања реалних радних услова концентришућег пријемника сунчевог зрачења формиран је физички модел параболичног концентратора и спиралног

набораног топлотног апсорбера са пратећим хидраучним системом. Резултати ових истраживања могу имати директну примену при изградњи малих соларних концентришућих система али и при конципирању и изградњи великих соларних полигенерацијских система. Наравно, акценат ове докторске дисертације је више ка оптичком моделирању, као и анализи и истраживању оптималне геометрије концентришућег соларног система. Биће приказан и термички модел соларног концентришућег система са аспекта одређивања термичке енергетске и ексергетске ефикасности.

## 7.2. Реални соларни параболични концентришући систем и саставне компоненте експерименталног система

Соларни параболични концентришући систем (пријемно-рефлектујући систем- слика 7.1) састоји се од следећих компонената: постоље (фундамент - позиција 1), параболичног рефлектора-концентратора (позиција 2), пријемника са спиралним набораним апсорбером (позиција 3), систем за двоосно позиционирање (позиција 4), носећег стуба (позиција 5), контролно управљачке јединице система праћења (позиција 6), сензора азимута и елевација (позиција 7) подешавање фокуса дуж оптичке осе концентратора (позиција 8) и других елемената концентришућег соларног система.



Слика 7.1. Пријемно рефлектујући систем - параболични концентришући пријемник сунчевог зрачења

Постоље (фундамент) соларног параболичног концентратора чини бетонско челична конструкција која је пројектована од стране аутора ове дисертације и која је оптимизирана са циљем обезбеђења стабилности у свим временским условима. Постоље је пројектовано да прими велике аксијалне, радијалне силе као и момент увијања, момент превртања који настају услед великих оптерећења саме структуре и оптерећења која се генеришу приликом струјања јаких ветрова. Пошто је систем постављен на крову (висине до 6m), његов положај је изложен веома јаким ударима ветра. Из тог разлога систем је пројектован за два положаја: радни (окренут ка сунцу) и систем у сигурносном положају (што се види са слика испод).

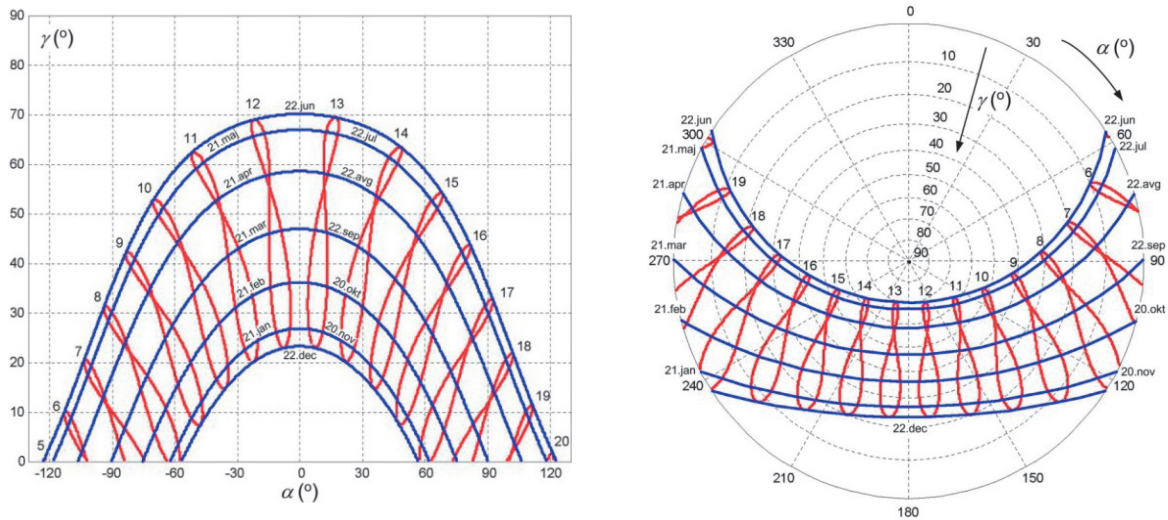


Слика 7.2. Соларни концентришући систем у радном и сигурносном положају

### 7.2.1.Избор система за позиционирање г параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења

Данас је познато више различитих система за конверзију сунчеве енергије у електричну и/или топлотну енергију, али већина тих система је фиксирана и непокретна, што доводи до тога да је степен њиховог искоришћења мали. Искоришћеност је мала из једног основног разлога, а то значи да је систем за конверзију сунчеве енергије најдуже око сат времена у оптималној позицији према Сунцу, јер није у могућности да прати кретање Сунца и да се прилагођава, тј. да Сунчеви зраци увек падају под правим углом на површину апертуре параболичног концентратора.

За остваривање максималног енергетског учинка сунчевог зрачења, неопходно је омогућити оптималан нагиб и оријентацију површине пријемника сунчевог зрачења применом ротирајућих система за праћење Сунца. Такође, код оваквих система неопходно је познавање и утицаја различитих препрека на путу сунчевих зрака до пријемника, који се манифестује формирањем непожељних сенки. Због тога је од пресудног значаја познавање привидног кретања Сунца на небу, у било ком тренутку током дана или године. Због промене положаја Сунца мења се и вредност енергије зрачења која доспева на површину концентришућег пријемника. Положај Сунца може се дефинисати помоћу углова његовог положаја (углова азимута и елевације). Постоји велики број различитих решења за позиционирање соларних параболичних система. Основна функција циља јесте остваривање ротације система у две управне осе, тј. на тај начин вектор упадног сунчевог зрачења је увек нормалан на раван апертуре рефлектујуће параболичне површине. У случају да постоји одступање између вектора упадног (инцидентног) сунчевог зрака и површине рефлектора говоримо о грешки праћења која смањује концентрациони однос као и флуks апсорбованог зрачења на површини пријемника. То значи да систем рефлектује сунчеве зраке ван жижне (фокусне) области. У оквиру пројектовања и нумеричког моделирања, симулације соларних концентришућих система увек треба узети у обзир грешку праћења (mrad). Грешка праћења путање сунца може се манифестовати кроз непрецизност соларних сензора или алгорита који у себи садржи једначине соларне геометрије за дати географски положај испитиваног система. Постоје два начина праћења привидног кретања сунца: применом соларних сензора или применом астрономских података на основу ортографских и стереографских пројекција сунчевог дијаграма за одређени географски положај. У овој докторској дисертацији урађен је дијаграм кретања Сунца који је добијен ортографском пројекцијом. На слици 7.3 је програмирањем математичких једначина соларне геометрије у Matlab-у приказан дијаграм кретања Сунца у оваквом координатном систему, за локацију Машинског факултета у Нишу са координатама  $\varphi=43^{\circ}19'51''$  N (северна географска ширина) и  $\lambda=21^{\circ}53'30''$  E (источна географска дужина), на којој ће бити извршено завршно лоцирање ротирајућег пријемника сунчевог зрачења.

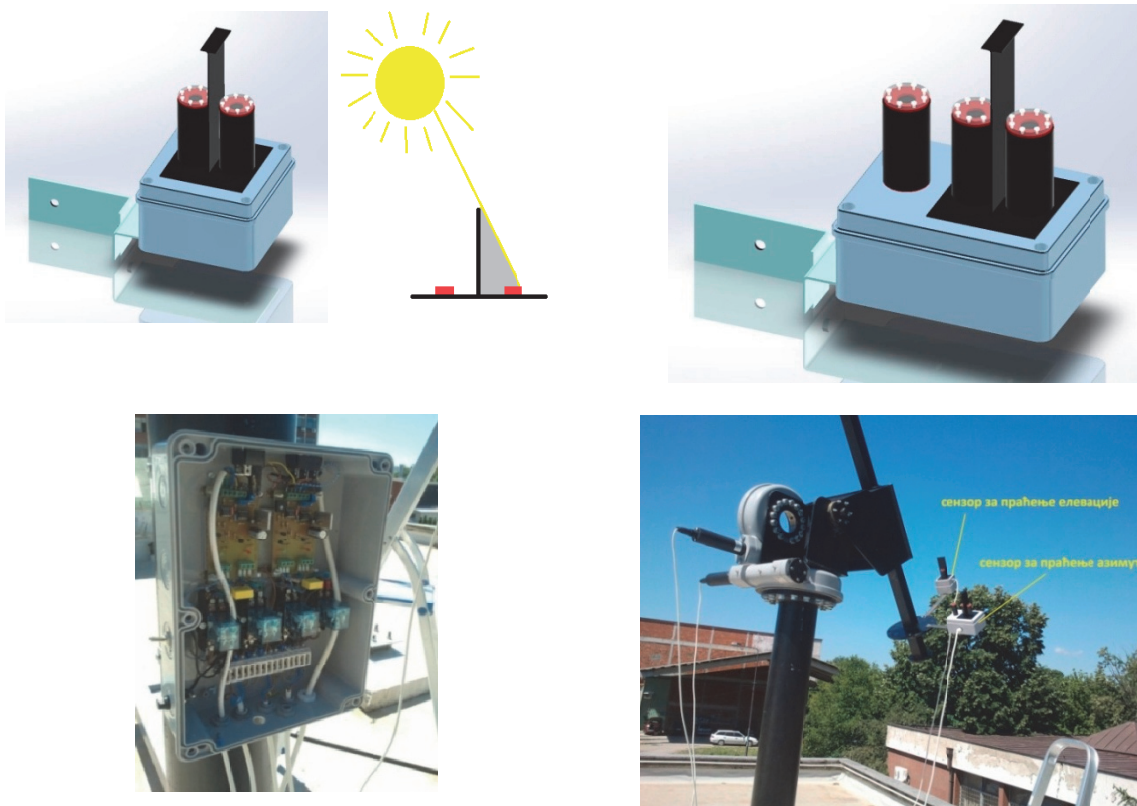


Слика 7.3. Ортографска и Стереграфска пројекција сунчевог дијаграма за координате  $\varphi=43^{\circ}19'51''$  N и  $\lambda=21^{\circ}53'30''$  E

Одређивање тачне геометрије кретања привидне путање Сунца на небу је битно са више аспеката практичног пројектовања концентришућег пријемника сунчевог зрачења. Због промене положаја Сунца током дана и године, на различитим локацијама на Земљи мења се и вредност дозрачене енергије која доспева на површину пријемника сунчевог зрачења. Величина поља пријемника потребног за напајање одређеног потрошача може се оптимизовати кроз одговарајуће геометријске анализе. Познавање соларне геометрије је такође битно у процењивању периода делимичног или потпуног осенчавања. У оквиру овог истраживања усвојен је тип соларног позиционера (solar tracker) са два независна сензора. Један сензор управља променом азимутног угла (исток-запад), док други управља елевационим углом (север-југ). 3D модел соларних фотосензора (фотоотпорник) са одговарајућим кућиштем је приказан на слици испод као и реални физички модел. Соларни фотосензори су фотоотпорници са одговарајућим половима који се гасе и пале у зависности од јачине (интензитета) сунчевог зрачења које доспе до њих. Систем има јако брз одзив, тако је јако поуздан у раду соларног параболичног концентришућег пријемника. Контролно - управљачка јединица је пројектована са становишта брзог и поузданог одзива система, тј. оптималног побуђивања DC мотора који су у спрези са пужним редукторима (Slewing Drive). Систем троши јако мало струје, тако да је на тај начин јако економичан. Систем позиционирања је тестиран на почетку без тежине параболичног рефлектора и показао је одличан резултат и прецизност праћења. Након уградње и завршетка целог



параболичног система систем је показао такође одличну прецизност и поузданост. Систем аутоматског управљања има три нивоа позиционирања: ручно, аутоматско и мод за ноћ-дан. први начин ручног позиционирања је погодан за прве прелиминарне тестове када је потребно ручно подесити место концентрисања сунчевог зрачења (фокус на површини апсорбера). Други начин позиционирања се користи у радном режиму испитивања (мерења) термотехничких карактеристика у реалном времену, где преласком на аутоматски мод, систем сам позиционира систем према азимутном и елевационом углу. Трећи начин (ноћ-дан) подразумева да када се јачина светлости на небу смањи на минималну вредност, фото отпорник аутоматски укључује реле у контролно управљачкој јединици и побуђује DC мотор са редуктором, тако да обара систем (паркира) у сигурносни положај до јутра. Након изласка сунца, систем сам реагује и поставља систем у радни положај пратећи вектор упадног сунчевог зрака у реалном времену. Више детаља о овом техничком решењу система за позиционирање биће у наредним научним радовима аутора.



Слика 7.4. Приказ соларних фотосензора као и контролно управљачка јединица система за позиционирање

Између фототпорника LDR1 и LDR2 налази се баријера (танка плочица витропласта) која прави сенку при померању сунца и ствара промену напона на пиновима 2 и 5, што се манифестује укључивањем релеа и померањем система. Када оба сензора буду подједнако осветљена систем поново мирује. На овој плочици се такође налази и фототпорник (LDR3) за детекцију заласка сунца. Плочица са сензорима мора бити заштићена од продора влаге и најједноставније је смести је у неку стаклену куглу или теглу. При избору водит рачуна да стаклена заштита буде хомогена и нема непотребног преламања светлости. Висина заклона у облику "Т" профила одређује осетљивост овакве врсте соларног сензора. Поред соларних фото сензора и контролно управљачке јединице за поуздан и сигуран рад уграђено је и по два граничника (2 за елевацију, 2 за азимут) од прекорачења опсега ротације система у случају да дође до нежељених побуда струје у моторима. Уколико желимо да соларни систем при јаком ветру поставимо у сигурносни положај можемо овај улаз искористити за то тако што ћемо поставити један прекидач кога треба само искључити. Свакако можемо направити и посебан уређај који може детектовати одређену јачину ветра и дати сигнал за позиционирање соларних пријемника. Систем граничника је пројектован са становишта максималног прихвата сунчевог зрачења од изласка до заласка сунца 365 дана у годни. На бази географског положаја локације Ниша, максимални опсег угла елевације је од  $-85^{\circ}$  до  $85^{\circ}$ , док је опсег азимутног угла између  $-135^{\circ}$  до  $+135^{\circ}$  од правца југа. На наредној слици приказано је 4 граничника који поседују импулсне даваче, тако да у тренутку контакта прекидају довод струје и прекидају ротацију електромотора. Склоп пужних редуктора поседује висок преносни однос што је јако повољно приликом брзог репозиционирања система у случају отказа циркулационе пумпе или прегревања површине апсорбера високим флуksom концентрисаног сунчевог зрачења. Ако је кретање исправно треба проверити налегањем граничника ЗАПАД (G1) да ли ће се систем зауставити и уколико долази до прекида кретања онда је све добро повезано. Ако је укључен реле 2 и светли црвена лед диода систем мора да се креће на исток и наравно други граничник ИСТОК (G2) када је налегнут мора да прекида ово кретање. Посто смо ово проверили и установили да је све добро повезано можемо проверити да ли сензор за детекцију заласка сунца ради. Да не би смо чекали да падне ноћ можемо на конектору 2 одспојити један прикључак и симулирати бесконачну отпорност, јер сензор уколико није осветљен има отпорност

већу од 500 килома. требали би да се одмах укључи реле 2 исистем крене на исток. Примером ТП2 треба увече подесити укључивање релеја 2 при жељеној јачини светлости



Слика 7.5. Границници са импулсним давачима система за позиционирање (лево); соларни параболични концентратор усмерен ка југу (десно)

### 7.3. Експериментална инсталација и принцип рада

У циљу симулирања реалних радних услова параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења израђена и формирана експериментална инсталација на Машинском факултету у Нишу у оквиру простора Лабораторије за термотехнику. Експериментални систем чије је испитивање извршено састоји се од соларног параболичног концентришућег пријемника (параболични вишесегментни концентратор + спирални наборани топлотни апсорбер) са пратећим хидрауличним системом. Инсталација обухвата пријемно-рефлектујући систем (концентратор + апсорбер) са системом за аутоматско позиционирање система и праћење трајекторије сунца на небу у две управне осе, хидрауличну и мерну инсталацију као и опрему за аквизицију мерних података.

Предвиђена су термотехничка испитивања параболичног концентришућег пријемника сунчеве енергије (КПСЕ) са течномшћу као преносиоцем топлоте. На наредним сликама приказана је експериментална инсталација унутар Лабораторије за термотехнику Л-10. На слици 7.6. приказана је унутрашња инсталација за спољашње

испитивање са затвореним циркулационим колом – елементи инсталације у унутрашњости лабораторије. На слици 7.6 приказана је испитна инсталација за спољашње испитивање са затвореним циркулационим колом – елементи инсталације на крову лабораторије са монтираним параболичним концентришућим пријемником топлоте усмереним ка југу. Развијени прототип соларног параболичног концентратора за област средње и високо температурне конверзије сунчевог зрачења у топлоту представља техничко решење које је намењено пре свега у системима полигенерације, индустријским постројењима, домаћинствима, јавним објектима, итд. Систем се може применити за продукцију топле воде, у КГХ системима, продукцију паре високих топлотних перформанси, спрегу са апсорпционим топлотним пумпама итд.



**Слика 7.6.** Испитна инсталација за спољашње испитивање са затвореним циркулационим колом – елементи инсталације у унутрашњости лабораторије

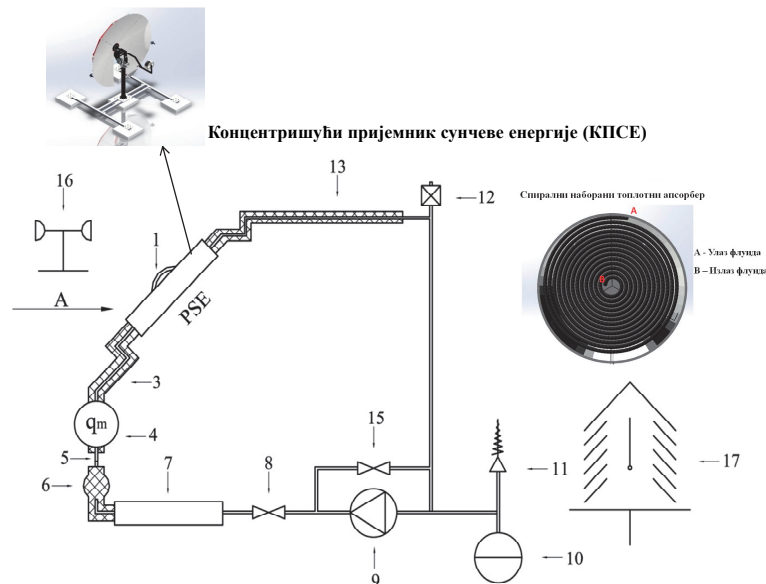
На сликама 7.7 приказан је физички модел испитиваног соларног параболичног концентришућег система.



Слика 7.7. Концентрисање рефлектованог сунчевог зрачења у спиралном набораном топлотном апсорберу

#### 7.4. Термотехничка испитивања

Испитивања топлотних карактеристика КПСЕ (prema JUS M.F5.110, тачка 4.6) врше се на линији за спољашње испитивање са затвореним циркулационим колом која је шематски приказана на слици 7.8.



Слика 7.8. Испитна инсталација за спољашње испитивање са затвореним циркулационим колом, 1. пиранометар; 3. мерење температуре на улазу КПСЕ; 4. мерач протока; 5. провидна цев; 6. филтер; 7. регулатор температуре; 8. вентил; 9. пумпа; 10. експанзиона посуда; 11. сигурносни вентил; 12. вентил за одваздушење; 13. мерење температуре на излазу ПСЕ; 14. изолација; 15. проточни вентил; 16. анемометар; 17. температура околине.

У инсталацији приказаној на слици 7.8, пумпа 9 потискује воду преко вентила 8 (TA-STAD) кроз регулатор температуре 7, филтер 6, провидну цев 5 (за визуелну проверу постојања ваздушних мехурова у инсталацији) и мерач протока 4 у колектор 1. У нивоу површине апертуре концентратора постављен је уређај за мерење сунчевог зрачења (за глобално зрачење пиранометар, за директно пирхелиометар, за дифузно пиранометар са штитом). На највишој тачки инсталације постављен је вентил за одваздушење 12. Ради сигурности инсталације, пумпа се затвара, циркулациони круг је помоћу проточног вентила, којим пумпа може да се кратко споји (обиђе), а додају се и одговарајући вентил сигурности и експанзиона посуда. Да би се обезбедила стабилност система, уграђен је електрични котао за стабилизацију режима. У повратном воду инсталације додата је још једна циркулациона пумпа фирме **IMPUMP** GHN 25/70-180 снаге 140W (слика 7.6 десно) да би побољшала (повећала) проток кроз инсталацију. Пошто је сам топлотни апсорбер на највишој тачки, потребан је велики напор да би се савладали хидраулички губици у деоницама. Тако да је проток обезбеђен са две циркулационе пумпе. Притисак у систему је константан и износи 2bar. Два температурна сензора (Pt500) су коришћена у циљу мерења температуре воде на улазу ( $T_{in}$ ) и излазу ( $T_{out}$ ) из пријемника сунчевог зрачења (слика 7.9 десно).



**Слика 7.9.** Изведена инсталација са акумулаторима топлотне енергије у оквиру експерименталног лабораторијског система и Pt 500 сонда за мерење температуре

Складиштење топлотне енергије обезбеђено је у акумулатору топлотне енергије капацитета  $1\text{m}^3$ .

## 7.5. Мерење протока

За мерење протока радног флуида и расхладне воде на улазу користе се ТА-STAD мерни вентили. Мерне стазе израђене су са довољном дужином правих деоница испред и иза вентила у циљу стабилизације водене струје. Запремински проток је мерен ултразвучним мерачем протока марке Kamstrup Multical 66CDE (тип 66C02F1124 - Multical 66CDE). Ултразвучни мерач протока је саставни део Калориметра марке Kamstrup. У наредној табели приказане су карактеристике ултразвучног мерача запреминског протока Kamstrup Multical 401 66CDE (тип 66C02F1124).

**Табела 7.1.** Карактеристике ултразвучног мерача запреминског протока Kamstrup Multical 66CDE, тип 66C02F1124

Тип	Ном. проток $q_{\text{nom}} [\text{m}^3\text{h}^{-1}]$	Макс. проток $q_{\text{max}} [\text{m}^3\text{h}^{-1}]$	Мин. проток $q_{\text{min}} [\text{m}^3\text{h}^{-1}]$	Прекид рада $q_{\text{cutoff}} [\text{m}^3\text{h}^{-1}]$
66C02F1124	1.5	1.2	0.006	0.003



**Слика 7.10.** ТА-STAD мерни балансни вентил Tour & Andersson и калориметар Kamstrup Multical 66CDE

## 7.6. Мерење температуре

Мерење температуре на површини спиралног набораног топлотног апсорбера је извршено применом 16 термопарова типа К (хромел-алумел) ради мерења расподеле температуре спољашњег зида цеви оребрене спиралне цеви, како дуж осе цеви, тако и по обиму цеви. Дебљина жице износи  $\varnothing 0.22\text{mm}$ , а с обзиром да аналогни - дигитални улазни модули имају способност компензације хладног краја, а позитивни и негативни извори термопарова су директно прикључени у улазне модуле. Како би било могуће

прецизно мерење локалних температура, мерни крајеви (главе термопарова) су прецизно изведене и сферичног облика, са пречником мањим од 1mm. Укупан број термопарова је 16, који су постављени на 13 аксијалних локација дуж спирале. Аксијалне локације су биране тако да се све налазе на истом радијалном правцу спирале (дуж истог полупречника), симетрично у односу на улаз и излаз спирале (под углом од  $180^{\circ}$ ).

С обзиром да је цев попречно наборана (ребраста), у складу са наведеним распоредом по обиму цеви, термопарови су лоцирани како на основном, минималном пречнику цеви, тако и на врховима набора, односно максималном пречнику цеви апсорбера.

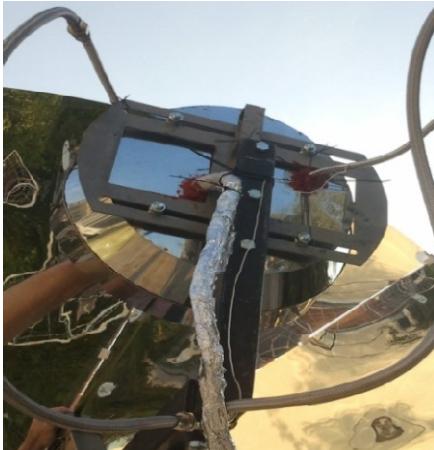


**Слика 7.11.** Аксијално позиционирање мерних крајева термопарова дуж истог радијалног правца спиралног апсорбера

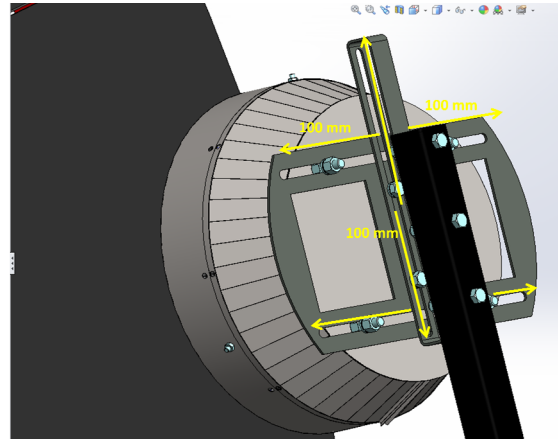
Спирални наборани топлотни апсорбер је смештен у конусно - цилиндричном кућишту од прохромског лима дебљине 0.5mm. Унутрашњост зидова конусног кавитета је рефлексиона површина која има задатак да упадно зрачење које није апсорбовано, а које је прошло кроз шупљине спиралног апсорбера додатно (секундарно) рефлектује и апсорбује на другој половини апсорберске цеви. На тај начин количина апсорбованог зрачења се повећава што је потврђено нумеричким моделом (Monte Carlo не секвенцијалном методом прорачуна хода зрака). Топлотни апсорбер (рисивер) поседује идејно решење финог подешавања применом двоосног манипулатора. Упркос чињеници да је познат теоријски фокус (жична равна) параболичног концентратора, неопходно је фино подесити положај спиралног апсорбера у односу на оптичку осу концентратора. Сваки реалан систем поседује тзв. грешку позиционирања (праћења) која умногоме зависи од самог геометријског



концепта концентришућег система као и система за праћење (tracking system). Систем пружа могућност подешавања лево, десно и навише по 100 mm у односу на централни носач.



**Слика 7.12.** Манипулатор двоосног подешавања фокуса параболичног концентратора



**Слика 7.13.** Подешавање апсорбера/рисивера у два управна правца

Мерни крајеви термопарова су заварени за цев без уношења додатног материјала, уређајем капацитивног типа, који посебно осмишљен и изведен за потребе овог експеримента. Након што су термопарови позиционирани, на већ нанесен слој високотемпературне отпорне црне боје Pyromark 2500 [157], чија минимална гарантована апсорптивност износи 0.9. Осетљивост мерења улазних модула са термопаровима типа "К" класе тачности 1 је мања од  $0,02^{\circ}\text{C}$ , док је након калибрације максимална грешка мерења у разматраном опсегу температура грешка мања од  $0,2^{\circ}\text{C}$ . Коришћени тип термопарова је у опсегу температура до  $0 - 480^{\circ}\text{C}$ .

Термопарови су пре позиционирања на спиралном апсорберу концентрисаног зрачења прикључени на аквизицијски систем и калибрисани у опсегу  $0 \div 150^{\circ}\text{C}$ , при чему су у аквизицијском софтверу (LabVIEW 2013) аутоматски генерисане полиномске калибрационе зависности између температуре и напона за сваки од термопарова. Како су мерни крајеви термопарова у контакту са електропроводним материјалом, вишеканални аналогни - дигитални претварачи су посебним каналом уземљени са самом спиралом ради изједначавања нултих потенцијала и добијања резултата мерења високе прецизности. Термопарови су повезани на улазном модулу марке National Instruments, типа NI 9213 са по 16 канала. Улазни аналогни сигнал на сваком каналу

пролази кроз диференцијални филтер, након чега се генерише 24- битни мултиплексни сигнал од стране аналогно-дигиталног претварача. Модул поседује и два додатна канала за компензацију хладног краја и изједначавање нултих потенцијала напона термопарова који су уземљени посебним проводником. Улазни модули су преко мрежног кућишта типа NI cDAQ - 9188 повезани са рачунаром, где се у аквизиционом софтверском окружењу LabVIEW 2013 бележе температуре и генеришу извештаји. Локалне температуре на површини набора спиралног апсорбера су доста варилале у току мерења, због тога што дан није био потпуно ведар, већ са повременим облачењем. Положај термопарова је намерно постављен на делу спирале где је мања озраченост (засенчење услед недостатка 12- те латице- сегмента и механичких делова). На тим локацијама постигнуте су температуре површине апсорбера на самим наборима и подножју оребрења у дијапазону између 75-95 °С

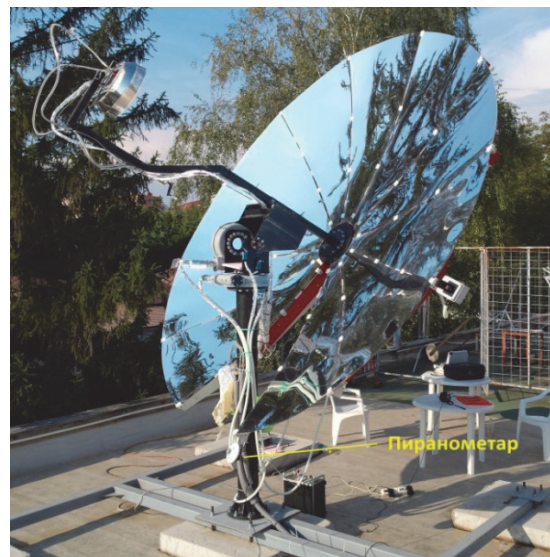
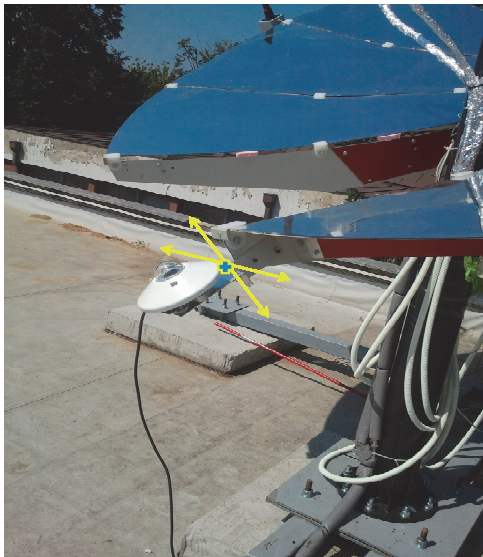


**Слика 7.14.** Приказ аквизиционог система мерења температуре (лево); National Instruments, типа NI 9213 са 16 канала (десно)

## 7.7. Мерење дозрачене сунчеве енергије

Мерење инсолације се врши пиранометром Kipp&Zonen CM11, тачности 3% и опсега дозрачене енергије 0÷1400W/m<sup>2</sup> (max. 4000W/m<sup>2</sup>), спектралног опсега 305÷2800nm и осетљивости 4÷6μV/(W/m<sup>2</sup>), који може да мери глобално сунчево зрачење. Помоћу пиранометра се мери интензитет зрачења широког интервала таласних дужина које долази из целокупне небеске хемисфере, односно из просторног

угла од  $2\pi$  grad. Сензорски део пиранометра има облик равне површине покривене полулоптом од кварцног стакла. Пиранометри могу имати термоелектричне, фотоелектричне, пироелектричне или биметалне елементе као сензоре. Постоље је заклоњено од зрачења па се референтни спојеви налазе на температури околног ваздуха. Од атмосферске влаге и ватре, пиранометар је заштићен са две концентричне полусфере од кварца.



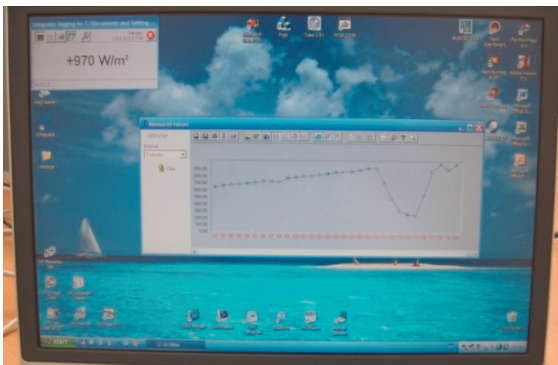
**Слика 7.15.** Носач пиранометра са могућношћу подешавања око две осе ротације

Положај пиранометра мора се подесити тако да раван пиранометра мора бити паралелна равни апертуре параболичног концентратора, што се са слике 7.15 десно може видети. Пошто за услове експерименталног испитивања је важна директна компонента сунчевог зрачења, потребно је измерити и дифузну компоненту сунчевог зрачења. Интензитет распршеног (дифузног) Сунчевог зрачења може се мерити и пиранометром, ако се Сунчев диск заклони тако да инструмент не буде директно изложен сунчевом зрачење. Разлика између укупног (глобалног) и дифузног зрачења одређује директну компоненту сунчевог зрачења. Најчешће се за заклањање користи полукружна или кружна метална трака, пречника од 0,5 - 1,5 m, орјентисана у смеру исток-запад, тако да заклања Сунчев диск од изласка до заласка Сунца са видним углом заклона довољним да потпуно блокира Сунчев диск. За одређивање директног сунчевог зрачења користе се пирхелиометри. Пошто не поседујемо овај уређај приступило се прављењу штита (заклона) преко површине пиранометра, како би измерили дифузиону компоненту сунчевог зрачења. Пиранометар је био повезан са

рачунаром чиме је било омогућено аутоматско прикупљање и складиштење података на рачунару.



**Слика 7.16.** Пиранометар Kipp&Zonen CM11 и мерни систем TESTO 454 са сондом за мерење брзине ветра, влажности и температуре



**Слика 7.17.** Прикупљање резултата мерења на рачунару

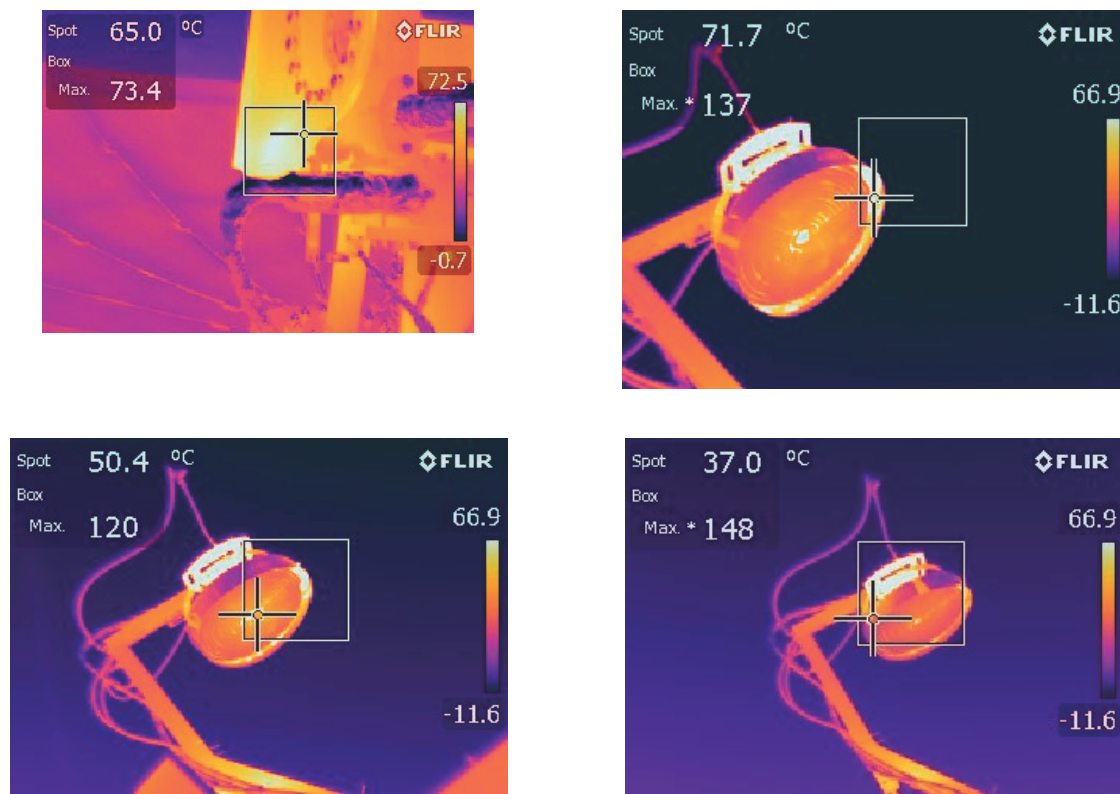
Брзина струјања ветра, релативна влажност и температура, као релевантни параметри за описивање стања околине, одређују се мерним системом TESTO 454 анемометарском сондом и сондом за мерење релативне влажности и температуре. Према декларацији произвођача тачност поменутих сонди износи 1%. На основу измерених величина мерни систем TESTO 454 (слика 7.17).

## 7.8. Испитивање термографијом

Инфрацрвена термографија је метода мерења температуре објекта помоћу инфрацрвене камере чији принцип рада се заснива на детекцији инфрацрвене радијације објекта. То је безконтактна температурна мерна метода. Данашња термовизијска техника омогућава добијање термовизијских слика високе резолуције уз

нумерички и графички приказ температуре сваке тачке са грешком мањом од  $0.05^{\circ}\text{C}$ . Температурни опсег, графичка и температурна резолуција и добар пратећи софтвер омогућавају праћење широког спектра објеката и процеса, почев од најфинијих електронских компонената до великих котловских постројења.

Испитивања су изведена снимањем помоћу термовизијске камере типа FLIR E50 високе резолуције  $240 \times 180$  пиксела. Камера дозвољава регистровање температурне разлике од  $0,1^{\circ}\text{C}$  у интервалу температура од  $-20$  до  $650^{\circ}\text{C}$ . У самој камери је интегрисана инфрацрвена оптика, детектор инфрацрвеног зрачења, монитор и картица за архивирање података. Пратећи софтвер FLIR Tools омогућује да се добијени термовизијски снимци прикажу у боји заједно са пратећом температурном скалом, тако да постоји трајан докуменат о обављеном снимању. Непосредно након снимања камера приказује најтоплије место на снимку и његову температуру. FLIR E50 се уз одговарајући прибор може инсталирати као непокретни сензор и њиме управљати преко персоналног рачунара. Рачунар служи за обраду термограма помоћу одговарајућег софтвера и у њега се учитавају подаци са картице која се налази у камери. Опремљена одговарајућим прибором за повезивање и софтвером, омогућава континуално снимање објеката. Камера и рачунар се могу на једноставан начин програмирати, тако да се термограми снимају у редовним временским интервалима. Применом термовизијске камере извршена су мерења критичних места на механичким компонентама које су изложене високим флуksom рефлектованог зрачења са површине параболичног рефлектора, како би предвидели вредности температуре на склоповима и осигурали структуру елеманата од прегревања и прекорачења термичких напрезања материјала. Затим је мерена температура на површини кућишта спиралног топлотног апсорбера као и максимална температура на површини набораног спиралног апсорбера. На сликама испод су приказане неке од термовизијских снимака у току самог експеримента.



Слика 7.18. Термовизијски снимци на површини спиралног топлотног апсорбера и на шасији механичког склопа система за позиционирање

## 7.9. Услови и процедура испитивања

Експериментална испитивања параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења вршена су за различите вредности запреминских протока воде и различите вредности улазних температура воде, у периоду од 31. августа до 3 септембра 2016. године. Мерења су трајала 2 дана, с обзиром да су временски услови толико дозвољавали. У обради резултата укључена су два изабрана испитивања. Експериментална мерења је потребно спровести по ведром и сунчаном времену, без ветра и облака. У току мерења било је тренутака када је дошло до повећања облачности и морало би се прекидати са мерењима, јер је била велика дифузија зрачења у атмосфери. Експериментална мерења најчешће крећу око 10:00h ујутру, а завршавају се у 17:00h послеподнева. Током мерења који је обухватао почетак септембра мерења би се прекидала и пре 17:00h због смањења интензитета сунчевог зрачења. Систем за праћење (Solar tracking system) је пратио путању сунца на основу

сензорике која је уграђена на самом соларном концентришућем пријемнику сунчевог зрачења. Положај пријемника (спиралног топлотног апсорбера) у односу на теме параболичног концентратора је подешено на оптималну вредност од 2100mm. На основу нумеричког оптичког модела који је приказан у шестом поглављу, положај пријемника је постављен на фиксном растојању. Мерења су вршена за различита жижна растојања: 2000, 2050, 2075, 2100, 2150, 2260, 2420, 2485, 2550mm. На основу максималне површине (потпуне) озрачености спиралног набораног топлотног апсорбера као и параметара који су добијени приликом испитивања усвојено је растојање од 2100mm. На тај начин смо извршили валидацију резултата са нумеричким оптичким и термичким моделом. Применом нумеричке симулације, добивено је оптимално растојање пријемника у односу на рефлектор у дијапазону између 2075-2100 mm.

Сваким даном испитивања истовремено су се прикупљали следећи подаци о:

- тренутном дозраченом глобалном сунчевом зрачењу,
- улазним и излазним температурама воде у оквиру соларног пријемника,
- запреминским протоком воде кроз соларни пријемник,
- температури површине спиралног апсорбера применом термопарова типа "К",
- тренутном дозраченом дифузном сунчевом зрачењу,
- температури околине,
- брзини ветра.

Подаци о дозраченом зрачењу на површину апертуре параболичног концентратора регистровани су на сваких 5 минута, температуре воде на улазу и излазу на сваких 15 минута, температура околине на сваких 15 минута, а брзина ветра на сваких сат времена трајања експерименталног мерења. Мерна опрема којом је инструментизована експериментална инсталација одабрана је на основу захтева примене, мерног опсега и потребне тачности. На почетку сваког мерења, након подешавања наведених променљивих, а пре усмеравања параболичног концентришућег система према сунцу, бележене су вредности запреминског протока, одговарајуће температуре флуида на улазу и излазу, разлика температура. Након укључења пумпи за циркулацију и постизања максималног протока у систему, систем је остављан у раду

до достизања стационарног стања када промене очитавања температура флуида на улазу и излазу не премашују вредност од  $0.2^{\circ}\text{C}$ . Након постизања стационарног стања, систем се усмерава директно према сунцу укључивањем аутоматског мода за праћење до положаја заузимања радног положаја.

## 7.10.Поређење експерименталних и нумеричких резултата

У овом подпоглављу приказани су експериментални резултати као и валидација са нумеричким истраживањем термичких параметара. Интереснатно је навести да је излазна температура флуида све већа у току рада (концентрисања сунчевог зрачења на површини апсорбера) зато што улазна температура има такође повећање своје вредности. Топлотни резервоар помаже складиштењу (чувању) топлотне енергије и служи за складиштење енергије на вишим температурским нивоима у току експерименталног мерења. Соларни параболични концентришући пријемник повезан је са резервоаром/топлотним акумулатором запремине 1000 литара.

Прорачун масеног протока флуида, интензитет директног сунчевог зрачења, топлотна ефикасност и ексергетска ефикасност је дат у једначинама 7.1-7.4. Важно је напоменути да у једначини 7.4, температура мора бити у Келвинима.

$$m(\text{kg} / \text{s}) = \frac{V(L / \text{h})}{\rho(\text{kg} / \text{l}) \cdot 3600(\text{s} / \text{h})} \quad (7.1)$$

$$G_b = G - G_d \quad (7.2)$$

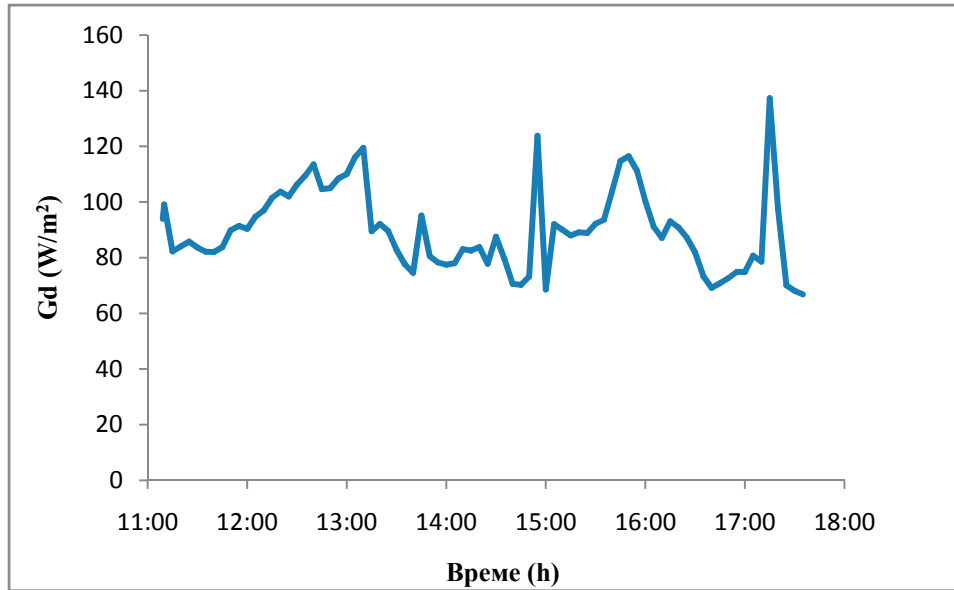
$$\eta_{th} = \frac{m \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in})}{A_a \cdot G_b} \quad (7.3)$$



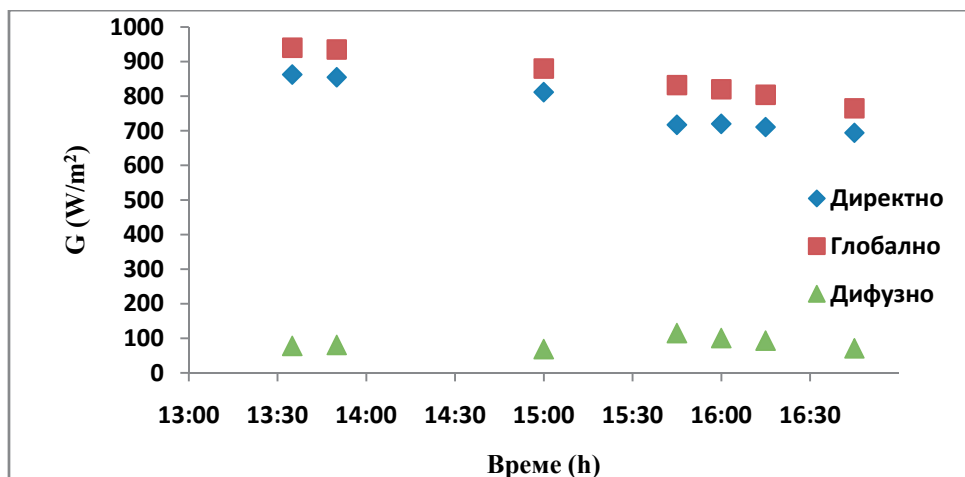
$$\eta_{ex} = \frac{m \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in}) - m \cdot c_p \cdot T_{am} \cdot \ln \left[ \frac{T_{out}}{T_{in}} \right] - m \cdot T_{am} \frac{\Delta P}{\rho \cdot T_{fm}}}{A_a \cdot G_b \cdot \left[ 1 - \frac{4}{3} \cdot \left( \frac{T_{am}}{T_{sun}} \right) + \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{T_{am}}{T_{sun}} \right)^4 \right]} \quad (7.4)$$

Акцент ове докторске дисертације је на истраживању оптималних геометријских и оптичких параметара параболичних концентришућих пријемника сунчевог зрачења. На тај начин формиран је нумерички оптички и термички модел.

Међутим, пошто је опрема за мерење оптичких перформанси јако скупа и недоступна у оквиру наше лабораторије, приступило се мерењу топлотних (термичких) перформанси параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења. На тај начин биће приказана валидација (поређење) топлотних перформанси система са експерименталним, док су резултати оптичког моделирања коришћени као гранични услови приликом термичког моделирања и постављања енергијског биланса. Искључена је могућност истраживања термо-струјних процеса (применом CFD-Computational Fluid Dynamics анализе) у оквиру набраног спиралног топлотног апсорбера, што није тема ове докторске дисертације. У раду су дати резултати тренутне топлотне ефикасности, излазне температуре флуида, ексергетске ефикасности, корисне топлотне снаге, укупног и дифузног сунчевог зрачења у функцији времена. Прва фаза експерименталног испитивања је спроведена 31 августа. Овај дан је изабран из разлога што су флукуације интензитета сунчевог зрачења мале. На слици 7.19 приказана је зависност дифузног сунчевог зрачења у функцији времена (од 11:00 ÷ 18:00 сати). Мерења су веома осетљива у случају рефлексije суседних објеката, тако да треба максимално обезбедити уређај од додатне рефлексije из околине.

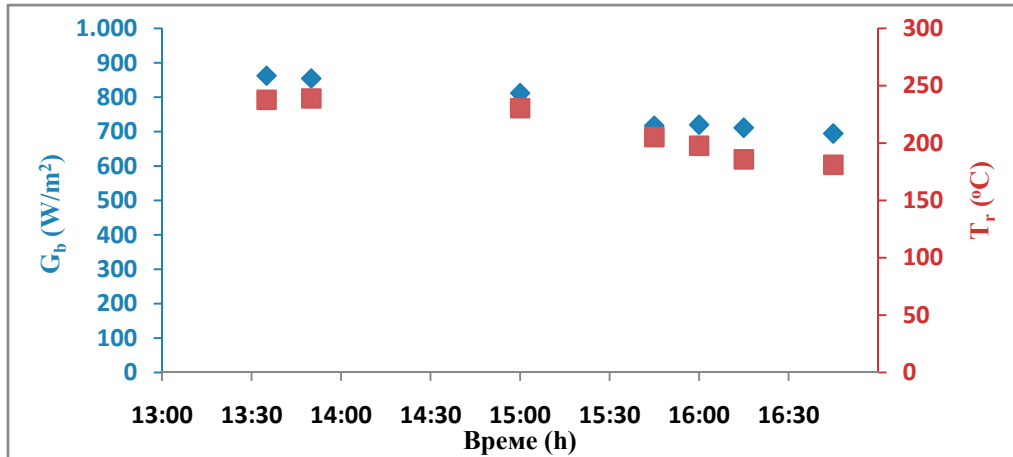


Слика 7.19. Мерење дифузног сунчевог зрачења (31.08.2016)

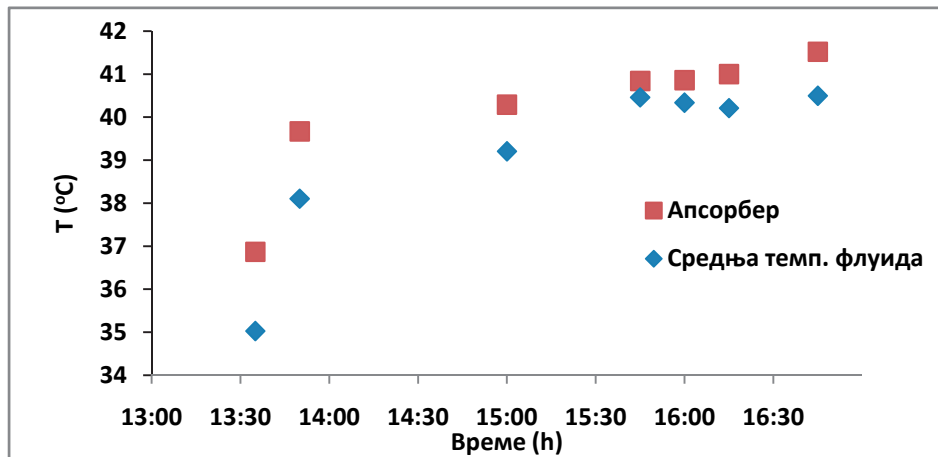


Слика 7.20. Мерење глобалног (укупног) и дифузног сунчевог зрачења за 31. август 2016.

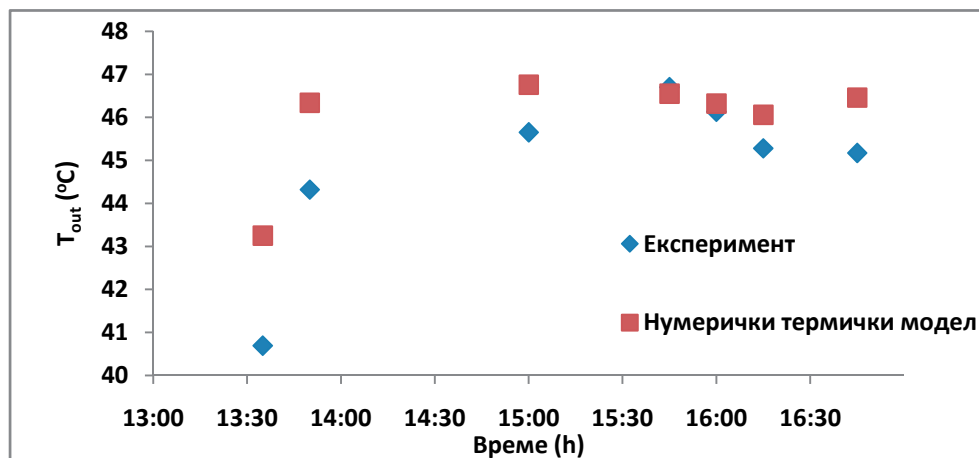
Најкритичнији параметар експерименталних резултата мерења је излазна температура воде. Овај параметар је веома значајан за корисну количину топлоте као и прорачун термичке ефикасности параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења.



Слика 7.21. Зависност глобалног сунчевог зрачења и температуре пријемника (апсорбера) у функцији времена 31. август 2016.



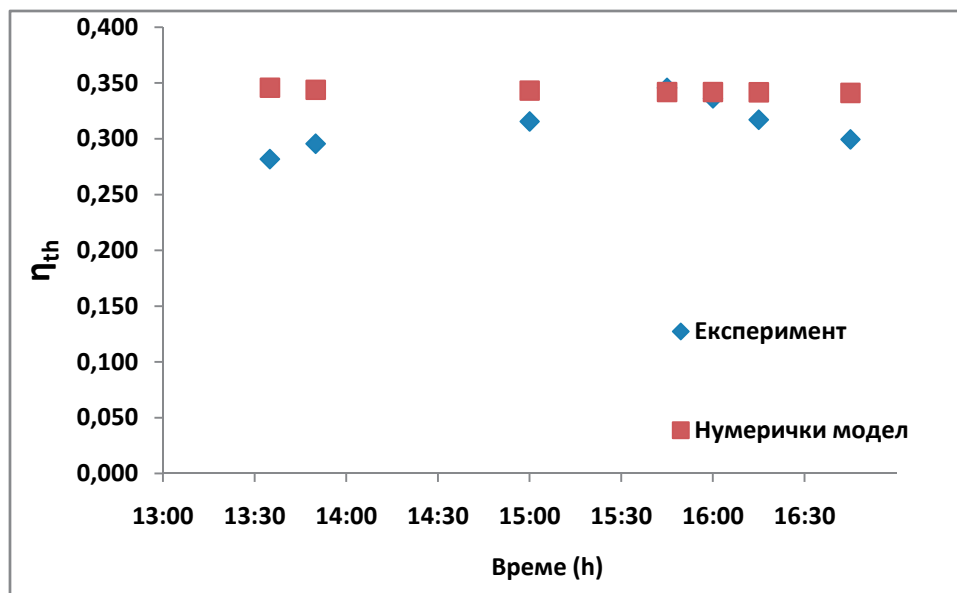
Слика 7.22. Зависност средње температуре флуида као и температуре апсорбера у функцији времена за 31. август 2016.



Слика 7.23. Поређење излазне температуре флуида експерименталног и нумеричког модела

Слика 7.23 (31 август 2016) приказује поређење резултата излазне температуре флуида експерименталног и нумеричког истраживања (модела). Према приказаним резултатима, њихова разлика је јако мала и износи око 1.1% (средња грешка). Табела 7.2 приказује разлику нумеричких и експерименталних резултата излазне температуре воде. Њихова разлика је јако мала. Важно је напоменути да је фактор хватања концентришућег параболичног система процењен на вредност око 65%. узимајући у обзир производне грешке у конструкцији система због њихових ниских трошкова израде. Оптичка ефикасност приказана је у једначини (7.5). Овај резултат је коришћен касније у нумеричком термичком моделу.

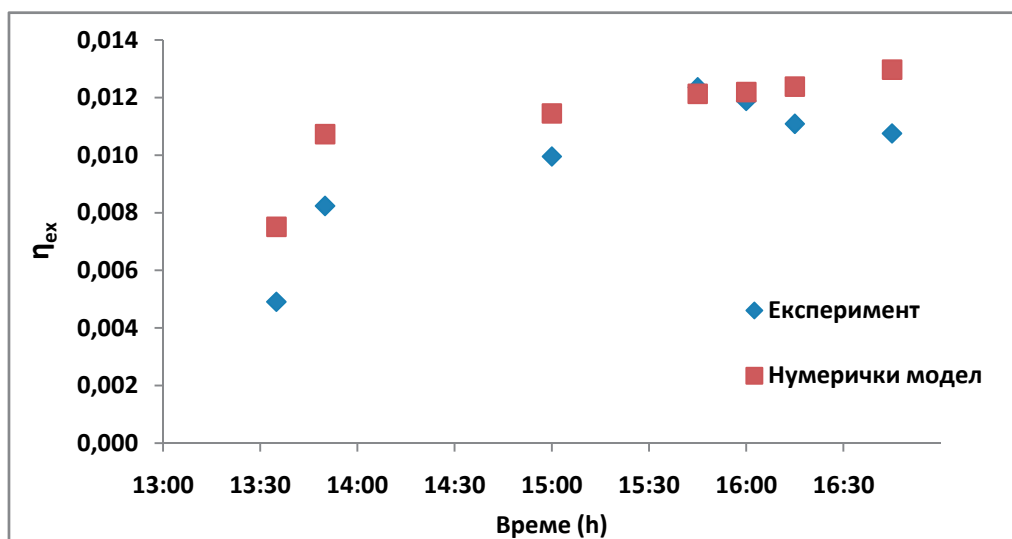
$$\eta_{opt} = \rho \cdot \alpha \cdot \gamma \approx 0.6 \cdot 0.9 \cdot 0.65 = 0.35 \quad (7.5)$$



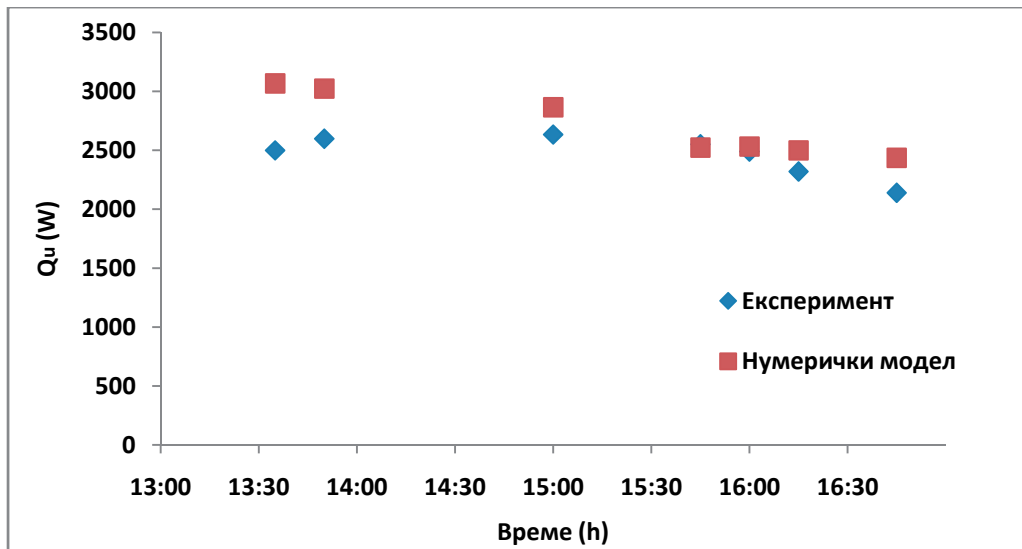
Слика 7.24. Поређење топлотне ефикасности експерименталног и нумеричког модела у функцији времена за 31. август 2016.

Испитивања првог дана су трајала нешто краће него уобичајено због временских услова (појаве облачности на небу). Првог дана 31. августа извршена експериментална мерења су почела у 13 часова и трајала су до 17 часова. Наравно првог дана, пуно времена је изгубљено на самом одваздушењу система, проверавању заптивености система, тражењу оптималног положаја спиралног топлотног апсорбера, подешавању центричности оптичке осе, постизања максималног протока у систему. итд.

Одступање средње топлотне ефикасности је око 4.97% (слика 7.32 и 7.33); што је прихваћена вредност за валидацију нумеричког модела. На основу слике 7.32, топлотна ефикасност концентришућег пријемника сунчевог зрачења је око 34%, ниска вредност топлотне ефикасности се објашњава ниским вредностима оптичких карактеристика (велики оптички губици- девијација површина рефлектујућих површина, грешке монтаже, грешке спекуларне рефлексије, итд.). Наравно, оптичке карактеристике соларног концентришућег система се могу побољшати прецизнијим начином монтаже, побољшањем облика рефлектујућих сегмената, подешавањем ивичног угла соларног концентратора. Ексергетске перформансе система приказане су на слици 7.25 и 7.33 за два испитивана дана. Ексергетска ефикасност (ексергетски степен корисности) експерименталног модела је нижа 2.5% од нумеричког модела услед ниских радних температура у концентришућем пријемнику сунчевог зрачења.

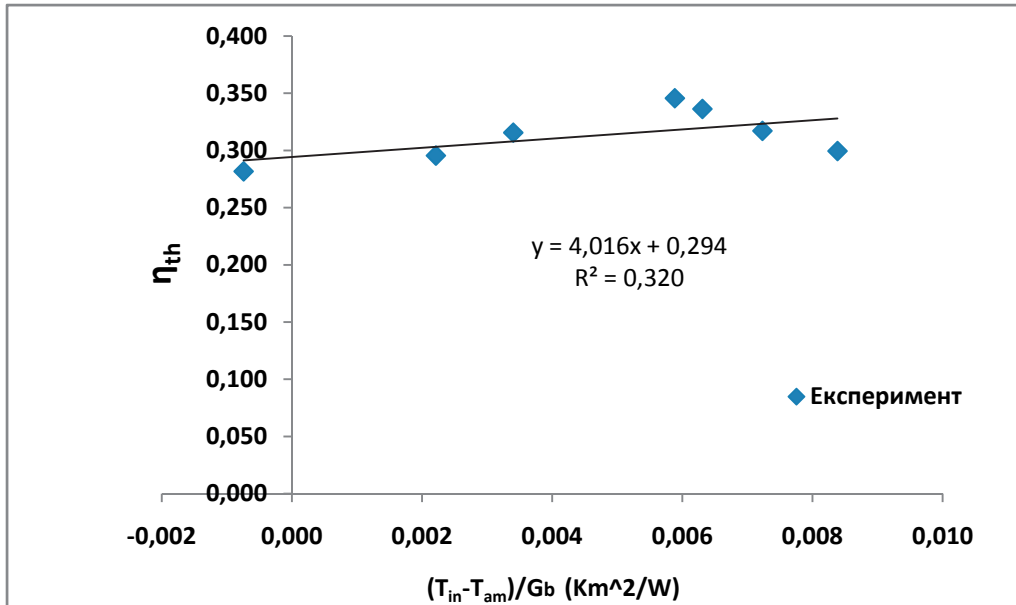


Слика 7.25. Ексергетски степен корисности соларног параболичног концентришућег система за 31. август 2016

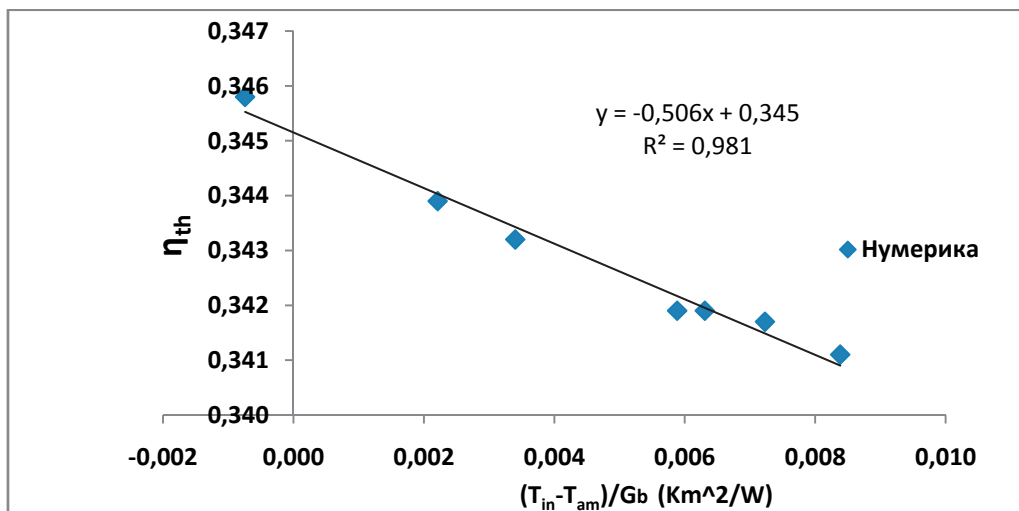


Слика 7.26. Експериментална и теоријска топлотна снага параболичног концентришућег пријемника система за 31. август 2016.

3. септембра 2016. год. извршена су експериментална мерења топлотних карактеристика параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења. Тог дана резултати су нешто бољи, јер је време било са више сунца, температура околине је нешто виша, мање ветра и мање облака. Наравно ово нису најбољи резултати које систем може да пружи. Да би се постигле најбоље могуће перформансе концентришућег параболичног система, потребно је да се задовоље неки од услова приликом тестирања: смање грешке позиционирања, побољшају конструкциона својства параболичног рефлектора, неидеална рефлексија соларног зрачења са параболичног рефлектора, неидеална паралелност апертуре рефлектора у односу на пријемник/апсорбер, итд.

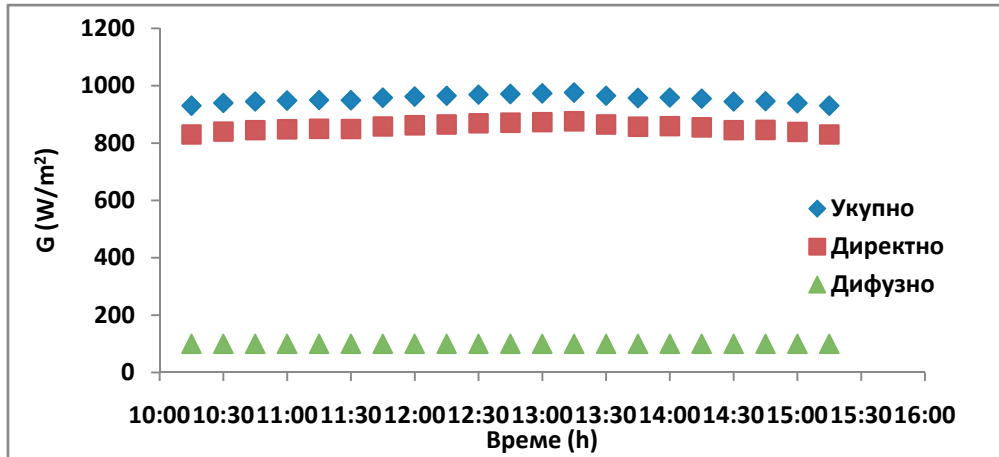


Слика 7.27. Крива тренутне топлотне ефикасности експерименталног модела за 31. август 2016.

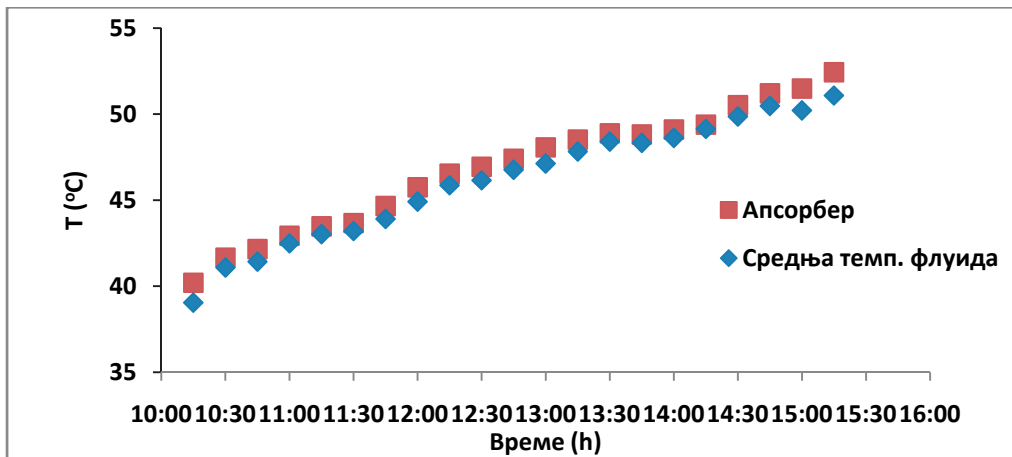


Слика 7.28. Крива тренутне топлотне ефикасности нумеричког модела за 31. август 2016

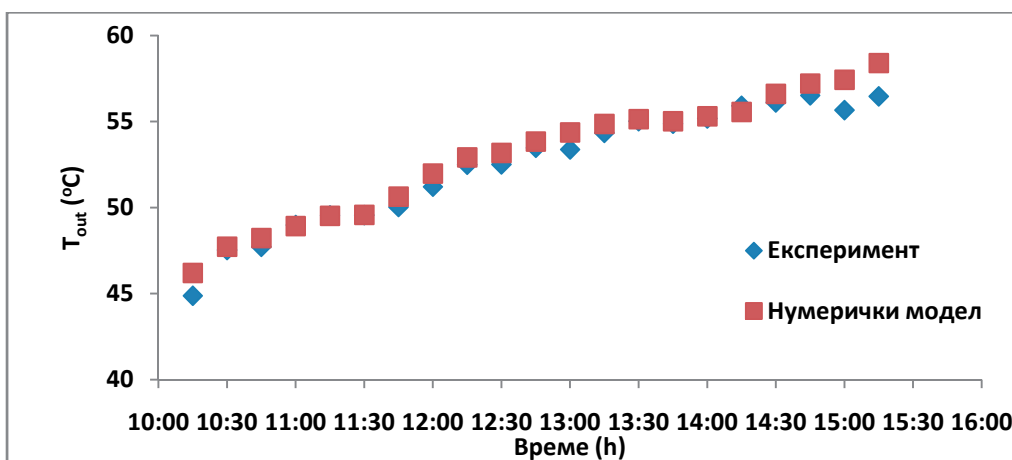
На наредним дијаграмима приказани су резултати експерименталног испитивања за 3. септембар 2016. године као и поређење резултата са нумеричким термичким моделом. Праве које најбоље апроксимирају наведене експерименталне и нумеричке податке добијене су методом најмањих квадрата.



Слика 7.29. Мерење глобалног (укупног) и дифузног сунчевог зрачења 3. септембар 2016

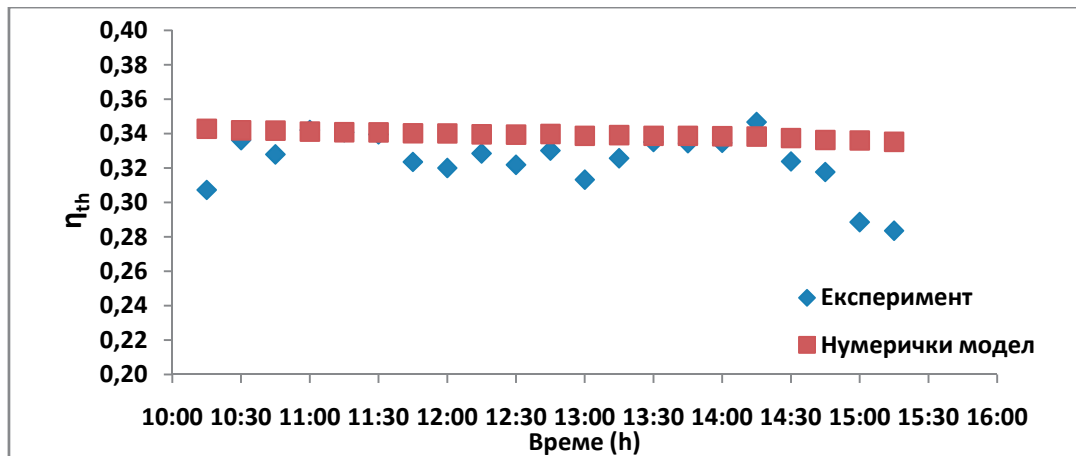


Слика 7.30. Зависност средње температуре флуида као и температуре апсорбера у функцији времена за 3. септембар 2016.

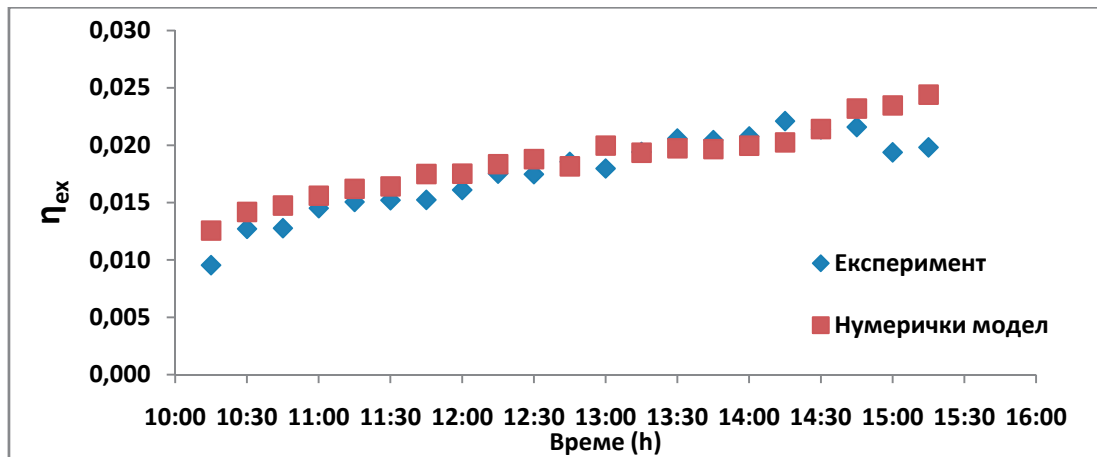


Слика 7.31. Поређење излазне температуре флуида експерименталног и нумеричког модела

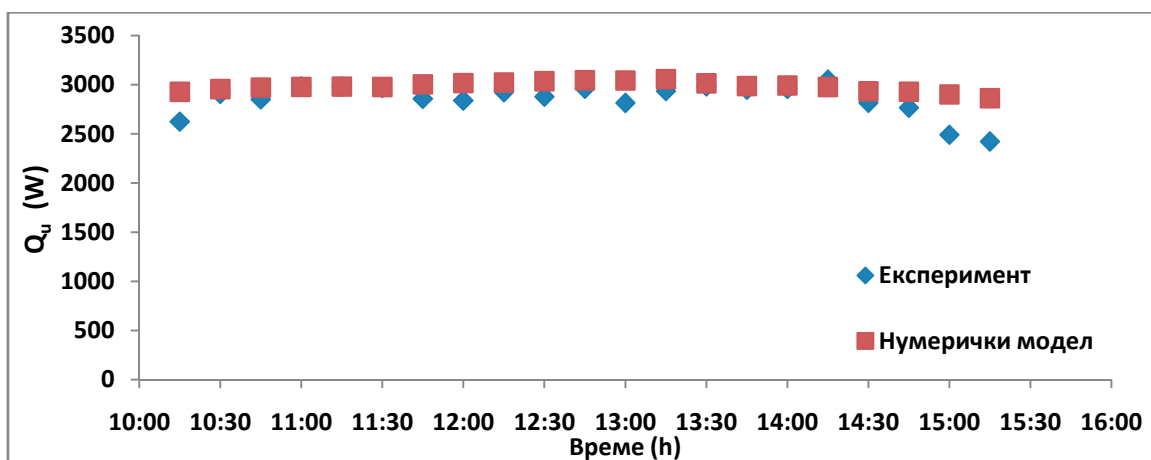




Слика 7.32. Поређење топлотне ефикасности експерименталног и нумеричког модела у функцији времена за 3. септембар 2016.

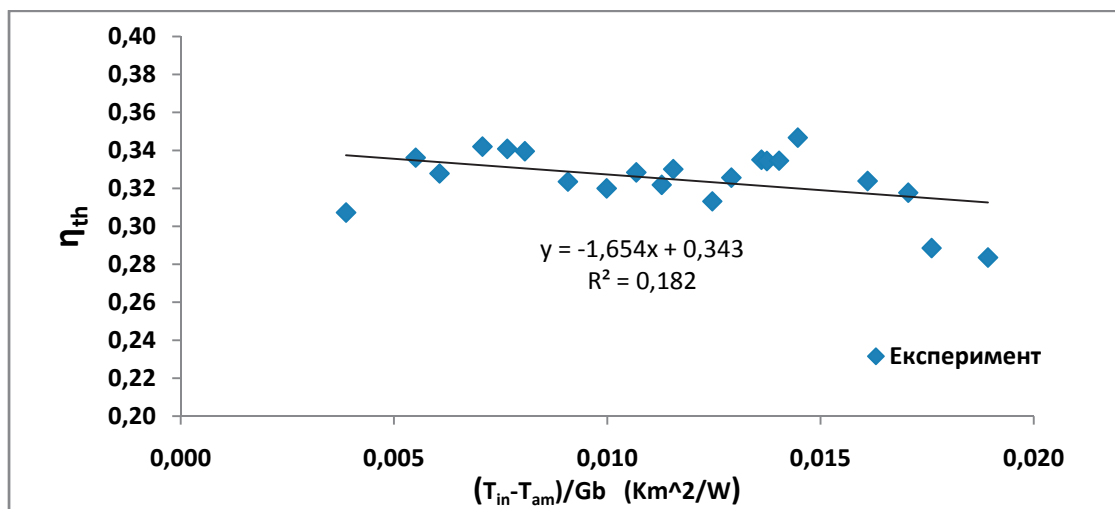


Слика 7.33. Ексергетски степен корисности соларног параболичног концентришућег система за 3. септембар 2016

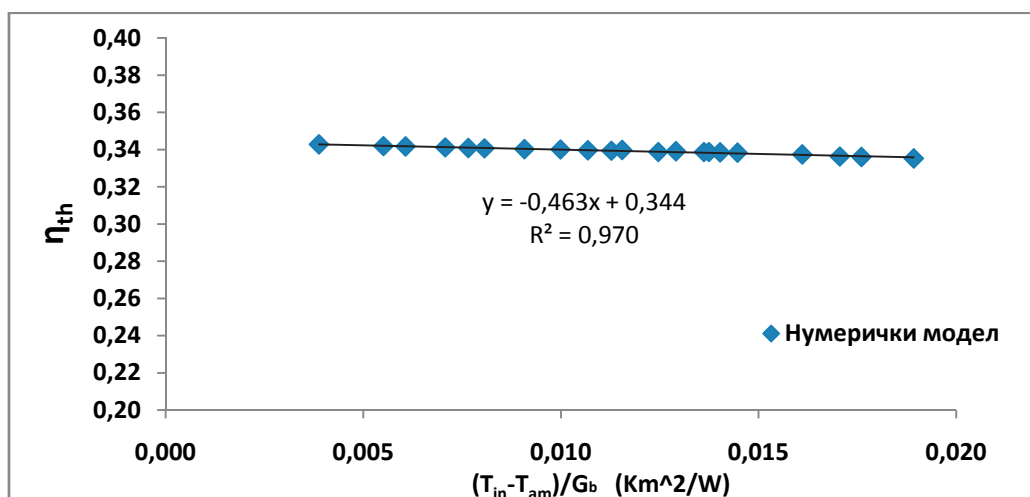


Слика 7.34. Експериментална и теоријска топлотна снага параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења за 3. септембар 2016.

На сликама 7.35 и 7.36 приказани су дијаграми експерименталних и нумеричких вредности термичке ефикасности параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења. У идеалном случају, када би озраченост спиралног топлотног апсорбера била максимално могућа најмања разлика топлотних енергија била би 59%, а највећа 82.23%. Према томе, највећа апсолутна разлика између експерименталне процентуалне разлике енергија, добијене у оквиру ове дисертације и оне добијене у [20], износи 29.55%. У случају максимално могуће озрачености доње половине спиралног набораног апсорбера она би имала вредност од 34.23%.



Слика 7.35. Крива тренутне топлотне ефикасности експерименталног модела за 3. септембар 2016.

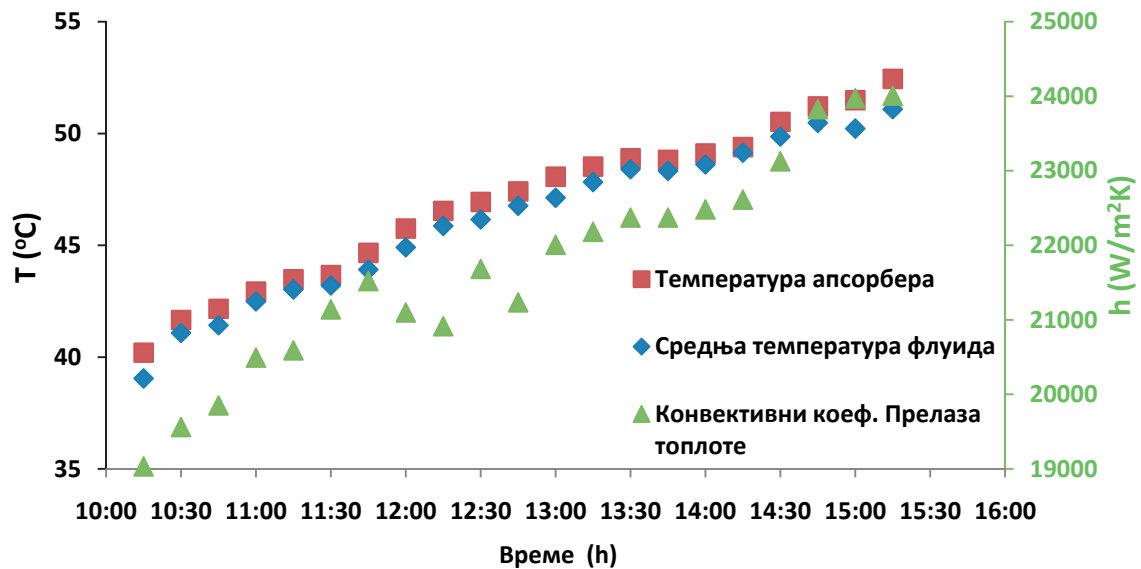


Слика 7.36. Крива тренутне топлотне ефикасности нумеричког модела параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења



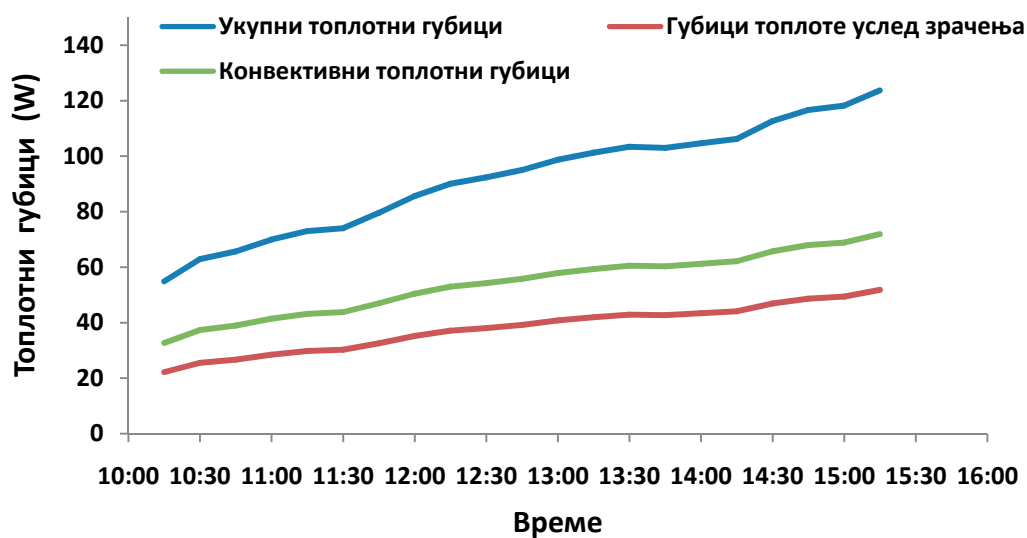
Табела 7.2. Поређење експерименталних и нумеричких резултата (3 септембар, 2016)

Измерене вредности				Експеримент		Нумерика		Одступање	
Време	V	T <sub>in</sub>	G <sub>b</sub>	T <sub>out</sub>	η <sub>th</sub>	T <sub>out</sub>	η <sub>th</sub>	T <sub>out</sub>	η <sub>th</sub>
(h)	(l/h)	(°C)	(Wm <sup>-2</sup> )	(°C)	-	(°C)	-	-	-
10:15	194	33.22	830	44.87	0.3073	46.20	0.34280	2.96%	11.57%
10:30	194	34.63	840	47.53	0.3362	47.73	0.34190	0.42%	1.70%
10:45	195	35.13	845	47.72	0.3278	48.23	0.34170	1.07%	4.23%
11:00	198	36.00	848	48.98	0.3420	48.93	0.34120	0.10%	0.23%
11:15	197	36.51	850	49.54	0.3408	49.52	0.34080	0.04%	0.01%
11:30	201	36.85	849	49.56	0.3395	49.58	0.34070	0.04%	0.34%
11:45	201	37.79	858	50.03	0.3236	50.64	0.34020	1.22%	5.14%
12:00	194	38.61	862	51.21	0.3200	51.98	0.34010	1.50%	6.29%
12:15	190	39.24	865	52.49	0.3284	52.92	0.33960	0.82%	3.41%
12:30	195	39.80	869	52.51	0.3218	53.18	0.33940	1.28%	5.46%
12:45	190	40.06	871	53.47	0.3301	53.84	0.33980	0.69%	2.94%
13:00	194	40.88	873	53.37	0.3132	54.37	0.33870	1.87%	8.15%
13:15	194	41.31	876	54.34	0.3256	54.86	0.33910	0.96%	4.14%
13:30	194	41.78	865	55.02	0.3351	55.14	0.33870	0.22%	1.08%
13:45	194	41.78	857	54.87	0.3344	55.02	0.33870	0.27%	1.30%
14:00	194	42.05	859	55.18	0.3346	55.31	0.33850	0.24%	1.16%
14:15	194	42.37	855	55.91	0.3467	55.56	0.33830	0.63%	2.41%
14:30	194	43.61	845	56.11	0.3238	56.61	0.33740	0.89%	4.19%
14:45	197	44.43	846	56.52	0.3177	57.21	0.33630	1.22%	5.86%
15:00	197	44.77	839	55.66	0.2885	57.43	0.33600	3.18%	16.45%
15:15	194	45.71	830	56.46	0.2835	58.40	0.33520	3.44%	18.23%



Слика 7.37. Средња температура апсорбера, температура флуида и конвективног коеф. прелаза топлоте применом нумеричког модела за испитивани дан

Високе вредности коефицијента конвективног прелаза топлоте се објашњавају употребом наборане геометрије спиралног топлотног апсорбера који се манифестује кроз турбулентно струјање флуида у цеви.



Слика 7.38. Топлотни губици параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења

### Енергетска и економска процена испитиваног параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења

У овом одељку приказана је енергетска и ексергетска процена (вредновање) експерименталног прототипа параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења. Излазна корисна количина топлоте концентришућег пријемника за различите вредности улазне температуре воде и интензитета директног сунчевог зрачења дата је на слици 7.39. Осим тога, експериментално добивена топлотна ефикасност параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења је дата према једначини 7.6:

$$\eta_{th} = 0.3446 - 0.4632 \cdot \left( \frac{T_{in} - T_{am}}{G_b} \right), \quad (7.6)$$

Параболични концентришући пријемник/колектор сунчевог зрачења је направљен од јефтиних композитних материјала у циљу смањења укупних инвестиционих трошкова, са циљем одржавања потребних и довољних перформанси концентришућег соларног система. Укупни трошкови израде концентришућег соларног система су око 7000 €. Цена израде система за праћење трајекторије сунца (tracking system) износи око 2000 € са свим пратећим механичким склоповима и компонентама сензорике и електронике, рефлектора око 2000 € и остали делови и компоненте система око 3000 €. Осим ниске цене, овај параболични концентришући соларни систем спада у групу веома лаких конструкција састављених од композитних материјала, веома једноставан за инсталирање на терену, лакши за монтажу и демонтажу у односу на остале сличне системе овог типа, што се и показало приликом реалног извођења прототипа.

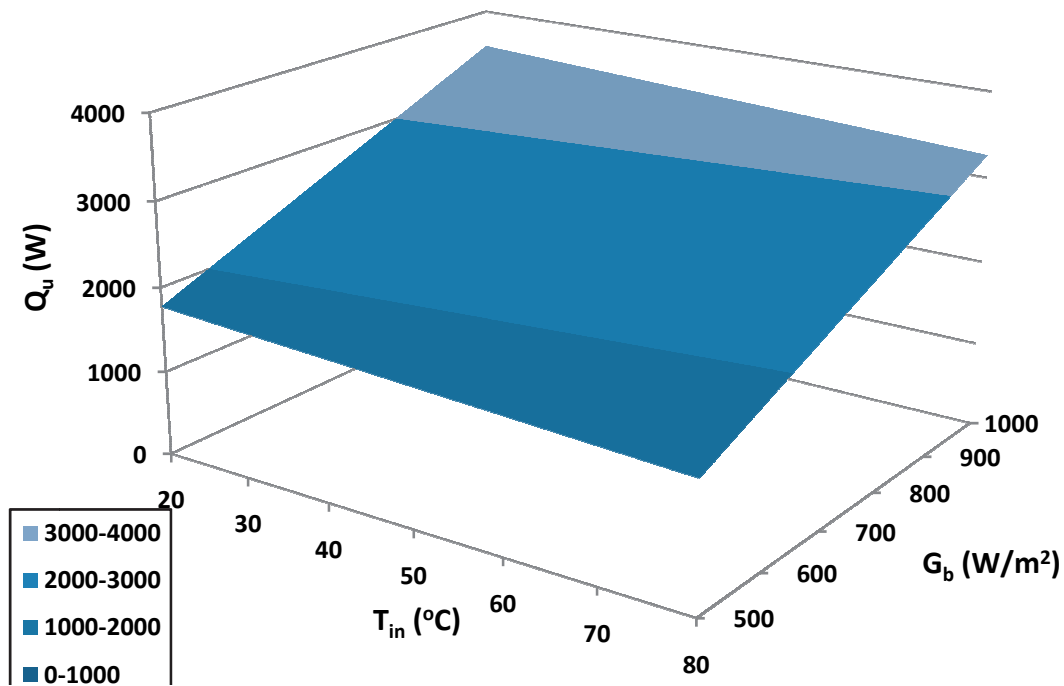
Као што је приказано на слици 7.39, корисна топлотна снага која се може постићи у овом соларном концентришућем пријемнику је око 3500 W. Са одређеном модификацијом и квалитетнијим и прецизнијим извођењем рефлектујућих сегмената систем може генерисати преко 6 kW топлотне снаге. Корисна топлотна снага се може значајно повећати елиминисањем грешака (оптичке грешке, геометријске грешке, грешке монтаже, грешке праћења привидне путање сунца, грешке поравнања огледаластих сегмената, итд.). У овој анализи, температура околине/амбијента је претпостављена на вредност од 20°C. Следећи корак у овом истраживању јесте

финансијска/економска процена/евалуација соларног концентришућег система. Прост "пејбек" период повраћаја инвестиција (Simple payback period SPP) представља економски индикатор који јасно указује на исплативост развоја и реализације концентришућег соларног система. Различити сценарији су испитивани применом дво-параметарске анализе. Прецизније, слика 7.40 представља прост "payback" период за различите комбинације цене грејања и годишњег потенијала директног сунчевог зрачења. Формула која срачунава прост "payback" период приказана је испод:

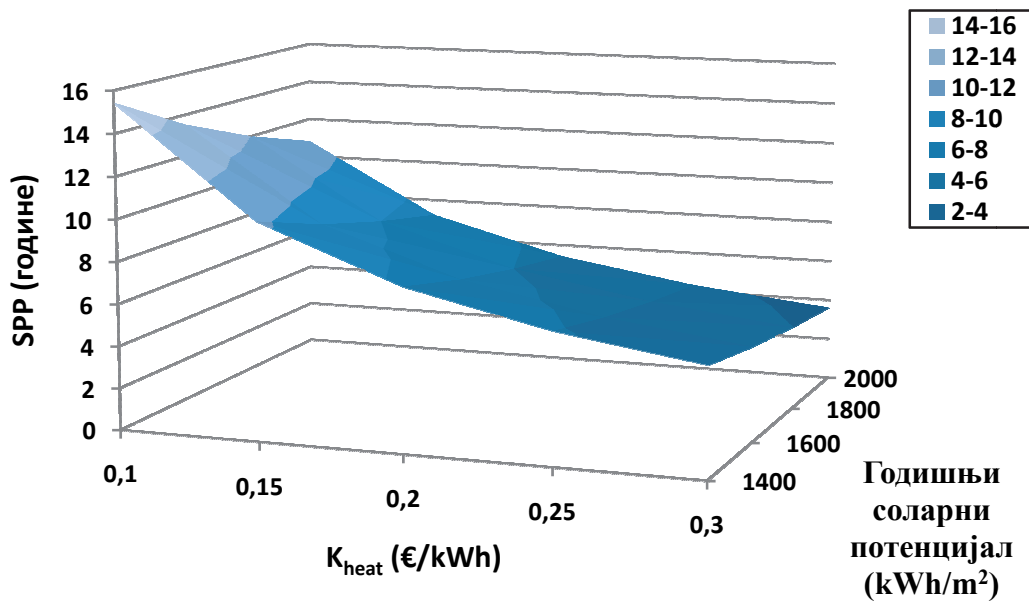
$$SPP = \frac{C_0}{A_a \cdot YSP \cdot \eta_{th,m} \cdot K_{heat}}, \quad (7.7)$$

У једначини 7.7 приказана је цена реализације соларног параболичног концентришућег пријемника ( $C_0$ ) које је једнака износу од око 7000 €, просечна вредност топлотне ефикасности са претпоставком улазне температуре флуида од 70°C је 31.5%. Слика 7.40 приказује да је период повраћаја инвестиције (payback period) у границама мање од 4 до око 15 година. Генерално, период повраћаја инвестиције око 10 година је прихватљив за системе који користе обновљиве изворе енергије што подразумева да овај систем може бити изводљив у областима где има пуно сунчаних сати у току године, са потенцијалом (интензитетом) глобалног сунчевог зрачења већим од 1600 kWh/m<sup>2</sup> и где је цена грејања већа од 0.15€/kWh.

Резултати дуготрајних метеоролошких мерења показали су да су природни потенцијали климатских ресурса у Србији веома добри. У Србији је енергетски потенцијал сунчевог зрачења и потенцијал производње биомасе приближно 30% већи него у Средњој Европи (просечан интензитет сунчевог зрачења у Европи износи 1096 kWh/m<sup>2</sup> годишње, а у Србији између 1500 -1700 kWh/m<sup>2</sup> годишње.



Слика 7.39. Производња топлотне енергије параболног концентришућег пријемника сунчевог зрачења за различите радне услове



Слика 7.40. Прост "payback" период соларног концентришућег пријемника сунчевог зрачења за различите комбинације цене грејања и годишњег потенцијала сунчевог зрачења

## Глава 8

### **8. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА И СМЕРНИЦЕ ЗА БУДУЋА ИСТРАЖИВАЊА**

---

Истраживања параболичних концентришућих пријемника сунчевог зрачења фокусирана су на анализи различитих концепата концентришућег пријемника (концентратора), различитих концепата соларних рисивера (апсорбера) као и оптимизацији геометријских, оптичких параметера различитих нивоа генерисаних снага (до 10kW). Опсег нивоа генерисаних снага је ограничен економским и финансијским средствима која треба уложити у развој и имплементацију овако сложеног параболичног концентришућег соларног система.

Развој соларног модула са параболичним концентратором је урађен на бази дугогодишњег прегледа литературе као и анализама великог броја различитих конструкционих решења. Циљ развоја оваквог типа соларног концентратора је повећање коефицијента концентрације (концентрационог односа), повећање ефикасности искоришћења енергије сунчевог зрачења и смањење цене добијене топлотне, расхладне или електричне енергије у систему полигенерације. Систем је пројектован са аспекта примене у системима полигенерације. Главне предности предложеног пријемно-концентришућег параболичног система, у односу на претходно



испитиване, су: оптимални прихват глобалног сунчевог зрачења на површини апертуре у току целог дана уз могућност континуалног праћења трајекторије сунца (dual axis sun tracking system), максимална искоришћеност директног сунчевог зрачења у току ведрих сунчаних дана, минимална грешка праћења трајекторије сунца уз веома брз одзив система (репозиционирање из фокуса) у случају настанка лоших временских услова, употребе веома лаких савремених композитних материјала за израду подконструкционих елемената, релативно мала маса система у односу на концентришуће соларне системе сличног дизајна.

У овом раду је, након уводних коментара о примени и доступности сунчеве енергије код нас и у свету и детаљног прегледа литературе, посебна пажња посвећена истраживању утицаја геометријско - оптичких параметара, термо-струјних процеса радних флуида (проток и температура грејаног флуида на улазу у апсорбер концентришућег система, експерименталним и нумеричким путем. Поред дугогодишњег истраживања поменутих параметара покренут је развој прототипа соларног концентришућег система. Анализа постојећих и развој нових математичких и нумеричких модела параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења, избор оптималних геометријских и оптичких параметара како самог концентратора сунчевог зрачења тако и величине, облика, конструкције топлотног апсорбера, дефинисање методологије испитивања енергетских карактеристика параболичних концентришућих пријемника сунчевог зрачења. Истраживања у оквиру предложене докторске дисертације ће бити фокусирана на спровођењу 3D симулација спрегнутог система (соларни параболични концентратор-топлотни апсорбер), где ће бити истраживани различити утицаји геометријских, оптичких параметара на перформансе соларног параболичног концентратора и топлотног апсорбера концентрисаног зрачења.

Најпре је обављена серија "пробних" експеримената у циљу "калибрисања" мерне инсталације и утврђивања опсега промене радних параметара на датој експерименталној инсталацији. Након тога је обављена серија експеримената. Варирани су протоци радног флуида (100, 150, 200, 250 и 300lit/h). У оквиру нумеричког термичког модела приказани су различити упоредни резултати примене различитих радних флуида (воде, термичког уља Therminol VP-1 и ваздуха). Промена радних флуида је спроведена са аспекта процене различитих флуида на топлотну

енергетску и ексергетску ефикасност концентришућег соларног система, излазне температуре из пријемника топлоте, као и коефицијент прелаза топлоте.

На основу свега наведеног може се закључити да резултати истраживања приказани у овом раду представљају знатан научни допринос који у великој мери доприноси повећању производње корисне топлотне енергије и ефикасности у односу на друге типове концентришућих пријемника. Очигледно је да глатке цеви имају боље апсорпционе к-ке у односу на наборане цеви синусоидалног профила са једнаким спољашњим пречницима. Са повећањем вредности специфичног флуksа упадног сунчевог зрачења апсорпциони капацитет и набораних и глатких цеви у почетку опада, да би достигао приближно константну вредност за веће вредности специфичног флуksа упадног сунчевог зрачења.

Соларни параболични концентратор са спиралним набораним топлотним апсорбером је експериментално и нумерички истраживан у овој дисертацији. Експериментални резултати су показали да је топлотна ефикасност овог типа пријемника око 34%, што је и потврђено развијеним нумеричким термичким моделом. Ниска вредност термичке ефикасности се објашњава ниском вредношћу оптичке ефикасности због постојања оптичких грешака у оквиру прототипа соларног концентришућег пријемника, што се наравно може кориговати у следећој итерацији модификације израде појединих компонената као и тачност појединих рефлексивних сегмената. Наравно теоријска вредност оптичке ефикасности је висока, али на реалном систему постоји доста несавршености параболичне рефлектујуће површине што је генерисало смањену ефикасност концентрације сунчевог зрачења и неуниформну расподелу флуksа сунчевог апсорбованог зрачења. Релативну ниску вредност рефлективности површине рефлектора је такође узроковано и запрљањем услед прашине и мрља које су настале приликом саме израде огледаласте параболичне површине, што је додатно допринело ниским вредностима термичке ефикасности.

Примењени нумерички термички модел је коришћен за процену енергетске и ексергетске ефикасности и перформанси параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења при различитим радним условима. Три изабрана радна флуида (вода, термичко уље Therminol VP-1 и ваздух) су примењени у нумеричком моделу, као и њихови упоредни резултати. За сваки радни флуид је срачунат оптимални запремински проток. На основу термичке анализе, вода је најпогоднији радни флуид за примену у

нискотемпературним системима, (мада то може бити и мешавина воде и пропилен гликола у циљу проширења експерименталног опсега), док термичко уље је најпогоднији радни флуид за средње и високотемпературне термичке системе. Ексергетска анализа, међутим показује да је ваздух најпогоднији радни медијум за нискотемпературне система, док је термичко уље повољније применити за системе са вишим температурама. Глобална максимална ексергетска ефикасност је око 7,57% са термичким уљем улазне температуре од 155 °С.

На крају, свакако треба константовати да су неопходна даља експериментална истраживања у циљу мерења, пре свега, одређивања карактеристика у току целе године. На тај начин могли бисмо да извршимо валидацију целогодишњих експерименталних мерења. тј. приказ термичке ефикасности и корисне топлотне снаге која се генерише применом приказаног соларног система. Ова врста истраживања захтева и експериментална мерења оптичких параметера (дефлектометријских и фотограметријских) мерења површинских микро и макро хрпавости (површинских оптичких грешака) рефлектујућих површина параболичних концентратора. Услед временских услова површина параболичног рефлектора губи на квалитету рефлексионог слоја и његовом тачном облику. Долази до малих деформација рефлектујућих сегмената. Такође, с обзиром на брзи развој перформанси рачунара, у нумеричком третману математичких модела било би погодно ићи на приступ у коме би се моделирали спрегнути оптички + термички модели, што би свакако допринело бољем сагледавању физикалности геометријско - оптичких и термо-струјних процеса соларних концентришућих система.

На основу резултата спроведених истраживања могу се идентификовати и правци даљих истраживања:

- развијена методологија се може додатним истраживањима проширити тако да обухвати и развој соларних концентришућих система у спрези са Стирлинговим мотором који ће бити део когенерационог система;
- развој концентришућег система се може проширити и у делу хибридног аутономног параболичног система (производња електричне и топлотне енергије)- применом пријемника са фото ћелијама и каналским спиралним апсорберима;

- дефинисану методологију развоја соларних концентришућих система је могуће даље унапредити аутоматизацијом процеса производње топлотне, расхладне или електричне енергије;
- примена материјала високе рефлективности као и начина обликовања параболичне геометрије;
- развој методологије техно економске оптимизације соларних концентришућих система са аспекта примене у системима полигенерације;
- даљи развој техничких решења соларних параболичних концентришућих пријемника са већим степеном корисности као и већом топлотном снагом;
- развој идејног решења апсорбера концентрисаног зрачења са применом високотемпературних радних флуида;
- развој савремених алгоритама за вишекритеријумску оптимизацију оптичких, термичких и економских параметара соларних концентришућих система;
- истраживања треба усмерити и на експерименталну верификацију нумеричких симулација и оптимизација преносивости у временском домену;
- развој аутоматизованог система заштите соларног концентришућег система и аквизиција свих параметара у реаланом времену;
- развој методологије интеграције соларног концентришућег система са осталим уређајима који користе обновљиве изворе енергије (топлотна пумпа, котло на биомасу, гасогенератор, итд.);
- развој софтвера за оптимизацију соларних концентришућих система;
- прављење *online* базе података за целогодишња мерења перформанси концентришућег пријемника топлоте и интеграција у постојеће библиотеке оптимизационог алгорита.
- експериментално истраживање концентришућег пријемника сунчевог зрачења за добијање високих температура применом термичког уља и ваздуха као радног флуида.
- експериментално мерење грешака праћења азимутног и елевационог угла параболичног концентратора сунчевог зрачења

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] <http://digis.edu.rs/mod/book/tool/print/index.php?id=2014,.20/08/2016>
- [2] <https://crcv.revues.org/11479>, 20/08/2016
- [3] <http://landartgenerator.org/blagi/archives/2004>. 20/08/2016
- [4] Yousef I. Joudeh N., Al Hamad R., Halawa H., Hassouneh, H., “Portable solar cooker and water heater”, *Energy Conversion and Management*, 51(8), (2010), pp.1605–1609
- [5] Mancini, T.R. Solar-Electric Dish Stirling System Development. Tech. Rep., Sandia National Laboratories. Available at: <http://mac6.ma.psu.edu/stirling/reports/DE98001305.pdf>. (1997).
- [6] Le Roux, W., Bello-Ochende, T. and Meyer, J. (2012). Solar Tracking for a Parabolic Dish Used in a Solar Thermal Brayton Cycle. CRSES Annual Student Symposium. Available at: <http://www.crses.sun.ac.za/files/services/conferences/>
- [7] <http://www.dakotafab.com/special-projects/solarcat/20/08/2016>
- [8] Smith, R. and Cohn, L. Solar Support, Products and Solutions in the Solar Technology and Machine & Plant Manufacturing, IMO Anlagenbau GmbH, Germany. (2010). pp. 131–133.
- [9] TitanTracker Titan Tracker, Solar Parabolic Dish Concentrator Stirling, Cabanillas Ingenieros, Castilla-La Mancha, Spain. Available at: [http://www.titantracker.es/v\\_portal/informacion/informacionver.asp?cod=1229&te=720&idage=1491&vap=0](http://www.titantracker.es/v_portal/informacion/informacionver.asp?cod=1229&te=720&idage=1491&vap=0), (2013).
- [10] Angel, R.P. and Davison, W.B. Solar Concentrator Apparatus with Large, Multiple, Co-axial Dish Reflectors, PCT patent WO2009140174. Available at: <http://www.google.com/patents/WO2009140174A3>, (2009).
- [11] Solartron SolarBeam 7M Parabolic Concentrator, Solartron Energy Systems Inc., Nova Scotia, Canada. Available at: [http://www.solartronenergy.com/solar-concentrator/specifications/\(2013\)](http://www.solartronenergy.com/solar-concentrator/specifications/(2013)).
- [12] <http://www.kier.re.kr/20/08/2016>
- [13] Reddy, K. and Veershetty, G. Viability Analysis of Solar Parabolic Dish Stand-alone Power Plant for Indian Conditions. *Applied Energy Elsevier*, (2013). pp. 908–922



- [14] Reddy, K.S., et al., Experimental Performance Investigation of Modified Cavity Receiver With Fuzzy Focal Solar Dish Concentrator, *Renewable Energy*, 74 (2015), pp. 148-157
- [15] Infinia Powerdish IV, Solar Energy Solution, The Infinia Corporation USA. Available at: <http://www.infiniacorp.dreamhosters.com/project/powerdish-iv/>(2012).
- [16] Shelef, B. and Erez, S. Solar Receiver on Lightweight Solar Reflector, US Patent US20110247679. Available at: <http://www.google.com/patents/US20110247679>, (2011).
- [17] Tsadka, S., Segev, R., Migalovich, P., Levin, O., Tarazi, E. and Whelan, R. Solar Electricity Generation System, PCT Patent WO2009034573 A3., (2008).
- [18] <http://en.renovalia.com/20/08/2016>
- [19] K. Lovegrove, G. Burgess, and J. Pye. A New 500 M<sup>2</sup> Paraboloidal Dish Solar Concentrator, *Solar Energy*, 85 (2011), pp. 620-626.
- [20] [http://mnre.gov.in/file-manager/UserFiles/CST-Manuals/ARUN\\_E.pdf](http://mnre.gov.in/file-manager/UserFiles/CST-Manuals/ARUN_E.pdf) 20.08.2016
- [21] <http://www.aedesign.eu/energy.html>, 20.08.2016
- [22] [http://www.therminol.com/pages/bulletins/therminol\\_VP1.pdf](http://www.therminol.com/pages/bulletins/therminol_VP1.pdf), 20/08/2016
- [23] <http://megawattsolutions.in/mws-solar-field-background.php>, 20/08/2016
- [24] Toygar, E.M., Bayram T., Oğuzhan D., Demir A., The Design and Development of Solar Flat Mirror (Solarux) System, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54 (2016), pp. 1278-1284
- [25] M. Eccher, S. Turrini, A. Salemi, M. Bettonte, A. Miotello, R.S. Brusa, Construction Method and Optical Characterization of Parabolic Solar Modules for Concentration Systems, *Solar Energy* 94 (2013) pp. 19–27.
- [26] [www.CSIRO.au](http://www.CSIRO.au), 20.08.2016
- [27] PolySMART, POLYgeneration with advanced Small and Medium scale thermally driven Air – Conditioning and Refrigeration Technology, [www.polysmart.org](http://www.polysmart.org)
- [28] Brian Elmgaard, Simulation of Boiler Dynamics – Development, Evaluation and Application of General energy Simulation Tool, PhD thesis, Technical university of Denmark, (1999).
- [29] <https://omsop.serverdata.net/Pages/News.aspx>, 20/08/2016

- [30] Pavlović S., Stefanović V., Suljković S., Optical Modeling of a Solar Dish Thermal Concentrator Based on Square Flat Facets, *Thermal Science*, Vol. 18, No. 3, (2014), pp. 989-998, <http://www.doiserbia.nb.rs/img/doi/0354-9836/2014/0354-98361403989P.pdf>
- [31] Pavlovic S., Stefanovic V., Mancic M., Spasic Z., Development of Mathematical Model of Offset Type Solar Parabolic Concentrating Collector, ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering Tome XIV [2016] – Fascicule 1 [February], ISSN: 1584-2673 [CD-Rom; online], <http://annals.fih.upt.ro/pdf-full/2016/ANNALS-2016-1-01.pdf>
- [32] Nikolic N., Lukic N., Taranovic D., Mean Fluid Temperature of the Double Exposure and the Conventional Flat-Plate Water Solar Collectors- Experimental Results, Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Quality Conference, May 23<sup>rd</sup>, Kragujevac, Serbia, (2014), pp. 881-886, ISBN 978-86-63 3 5-004-5
- [33] Pavlović S., Stefanović V., Suljković S.: A Review of Parabolic Solar Collectors in the World and their Potential Use in Serbia, 4<sup>th</sup> Regional Conference: Industrial Energy and Environmental Protection in South Eastern Europe, Divcibare, Serbia June 26-29, (2011) Proceedings on CD
- [34] Pavlović S, Stefanović V, Mančić M, Optical Analysis of a Solar Paraboloidal Dish Thermal Concentrator Using Monte Carlo Ray - Tracing Method, Energy (2014), 25 - 28.03. 2014, Zlatibor, Serbia, ISSN 956-89-6543-056-8.
- [35] Kovačević S., Mravik S., Rodić A., Despotović Ž., Stevanović I and Jovanović M., Patented Concentrator of Solar Energy in Production of Thermal Energy and Electricity, Conference: III International Conference on Electrical Power Renewable Sources, Belgrade, Serbia, Volume: 1 (2015).
- [36] K.S. Reddy, Sendhil Kumar Natarajan, G. Veershetty, Experimental Performance Investigation of Modified Cavity Receiver with Fuzzy Focal Solar Dish Concentrator, *Renewable Energy* ;74:(2015). pp.148-157
- [37] Rafeeu, M.Z.A.AbKadir, “Thermal Performance of Parabolic Concentrators Under Malaysian Environment,”: A case study, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, (2012), pp. 3826-3835
- [38] A.R.El. Ouederni, M. Ben Salah, F.Askri and F. Aloui, “Experimental Study of a Parabolic Solar Concentrator, *Revue des Renouvelables* ,Vol. 12, (2009), pp. 395-404.
- [39] Zhiqiang Liu, Justin Lapp, Wojciech Lipinski, “Optical design of a flat solar concentrator, *Solar Energy* 86, (2012), pp. 1962-1966

- [40] Eswaramoorthy, M., Shanmugam, S., The Thermal Performance of a Low Cost Solar Parabolic Dish Collector for Process Heat, *Energy Source, Part A*, 34 (2012), pp.1731–1736
- [41] Ouederni E., et al., Experimental study of a Parabolic Solar Concentrator, *Revue des Renouvelables*, 12 (2009), pp. 395-404
- [42] Dunn R., Lovegrove K., Burgess G., Pye J., An Experimental Study of Ammonia Receiver Geometries for Dish Concentrators, *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 13 (2012), Issue 4. pp. 265-275
- [43] Qianjun, M., Ming X., Yong S., Y Y., Study on Solar Photo-Thermal Conversion Efficiency of a Solar Parabolic Dish System, *Environmental progress & Sustainable energy*, 33 (2013), 4, pp. 1438-1444.
- [44] Eswaramoorthy, M., Shanmugam, S., The Thermal Performance of a Low Cost Solar Parabolic Dish Collector for Process Heat, *Energy Source, Part A*, 34 (2012), pp.1731–1736.
- [45] Jones, P.D., Wang, L., Concentration Distributions in Cylindrical Receiver/Paraboloidal Dish Concentrator Systems, *Solar Energy*, 54 (1995), pp. 115-123
- [46] Takkar, V., et al., Performance Analysis Methodology for Parabolic Dish Solar Concentrators for Process Heating Using Thermic Fluid, *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 12 (2015), 1, pp. 101-114
- [47] Blázquez, R., et al., Optical Test of the DS1 Prototype Concentrating Surface, *EnergyProcedia*, 69 (2015), pp. 41-49.
- [48] Li, Z., et al., Study on the Radiation Flux and Temperature Distributions of the Concentrator - Receiver System in a Solar Dish/Stirling Power Facility, *Applied Thermal Engineering*, 31 (2011), pp. 1780- 1789
- [49] Imhamed M., Ali S., Tadhg S., O'Donovan K.S., Reddy, Mallick K., “An Optical Analysis of a Static 3-D Solar Concentrator, *Solar Energy* 88, (2013), pp. 57-70]
- [50] Lia S., Xua G., Luoa X., Quana Y., Geb Y., Optical Performance of a Solar Dish Concentrator/Receiver System: Influence of Geometrical and Surface Properties of Cavity Receiver, *Energy*, Volume 113, (2016), pp. 95–107
- [51] Menga X., Xiaa X., Zhanga S., Sellamib N., Mallick T, Coupled Heat Transfer Performance of a High Temperature Cup Shaped Porous Absorber, *Energy Conversion and Management*, Volume 110, 15 (2016), pp. 327–337.



- [52] Sharma M., Vaghani J., Bihani N., Shinde N., Vijay C., Gunge H., Design, Fabrication and Analysis of Helical Coil Receiver with Varying Pitch for Solar Parabolic Dish Concentrator, *Energy*, 93, 10 (2015), pp. 95–107
- [53] Munir A., , Design, Development and Modeling of A Solar Distillation System for the Processing of Medicinal and Aromatic Plants, PhD Thesis, Universität Kassel/Witzenhausen, Germany (2010), 173 p.
- [54] Reinalter W., Ulmer S., Heller P., Rauch T., Gineste J., Ferriere A., Nepveu F., Detailed performance analysis of the 10 kW dish/Stirling system, (2008), *Journal of Solar Energy Engineering*.
- [55] Rapp J., Schwartz P., Construction and Improvement of a Scheffler Reflector and Thermal Storage Device, Cal Poly Physics Insitute, California Polytechnic State University, San Luis Obispo, California, USA, <http://www.physics.calpoly.edu>. (2010),
- [56] Macosko R., Colozza A., Castle C., Solar Concentrator Concept for Providing Direct Solar Energy for Oxygen Production at the Lunar South Pole, *Proceedings of 48<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, Orlando, Florida, USA, (2010),
- [57] Patil M., Jahagirdar R., Deore E., Experimental investigation of heat loss from hemispherical solar concentrator receiver, *Frontiers in Heat and Mass Transfer*, 3, (2012), DOI (10.5098/hmt.v3.3.3008).
- [58] Cabanillas E., Kopp J., Measuring energy efficiency from a 4 kW dish concentrator system using older parabolic antenna technology, *Proceedings of ISES, Solar World Congress*, Orlando, Florida. (Vol. I – Vol. V), (2007), pp. 726-730, <http://link.springer.com>
- [59] Stefanović V., GREJANJE, TOPLIFIKACIJA I SNABDEVANJE GASOM, UNIVERZITET U NIŠU, MAŠINSKI FAKULTET, ISBN 978-86-6055-001-1, (2011).
- [60] Groenhout, N. K., Behnia, M., Morrison, G. L., Experimental Measurement of Heat Loss in an Advanced Solar Collector, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 26, (2002), pp. 131-137.
- [61] Goetzberger, A., Dengler, J., Rommel, M., Wittwer, V., The Bifacial Absorber Collector: A New Highly Efficient Flat Plate Collector, *International Solar Energy Society*, USA, (1991), pp. 1212-1217.
- [62] Новак Николић, Истраживање двоструко-озраченог, равног, соларног пријемника са равном рефлектујућом површином, Докторска дисертација, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, (2014).

- [63] Stefanović V., Pavlović S., Apostolović N., Nikolić I., Djordjević Z., Ćatić D., A Prototype of Solar Receiver for Middle Temperature Conversion of Solar Radiation to Heat, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A, *Journal of Power and Energy* [PIA], 225, 8.(2011).
- [64] <http://www.ecvv.com/product/1028865.html/> 22/08/2016
- [65] <https://www.kcet.org/shows/socal-connected/suncatchers-a-solar-tech-rundown/22/08/2016>
- [66] [http://www.zis.gov.rs/upload/documents/ppt\\_sr/ZIS\\_seminari\\_2015/Solarni%20koncentrator.pdf/22/08/2016](http://www.zis.gov.rs/upload/documents/ppt_sr/ZIS_seminari_2015/Solarni%20koncentrator.pdf/22/08/2016)
- [67] [http://www.slate.com/blogs/atlas\\_obscura/2014/11/07/ps10\\_and\\_ps20\\_spain\\_s\\_solar\\_power\\_towers\\_near\\_seville.html/22/08/2016](http://www.slate.com/blogs/atlas_obscura/2014/11/07/ps10_and_ps20_spain_s_solar_power_towers_near_seville.html/22/08/2016)
- [68] <http://www.lambdare.com/tracepro/22/08/2016>
- [69] Modest, M. F. (2003), Radiative Heat Transfer, Academic Press.
- [70] Meller, Y. (2013), 'Tracer package: an open source, object oriented, ray-tracing library in python language. <https://github.com/yosefm/tracer>'/22/08/2016
- [71] Le Roux W., Thermodynamic optimisation and experimental collector of a dish-mounted small-scale solar thermal brayton cycle, *PhD Thesis*, Department of Mechanical and Aeronautical Engineering, Faculty of Engineering, Built Environment and Information Technology, University of Pretoria, South Africa, (2015).
- [72] Pavlovic S., Bellos E., Stefanovic V., Tsivanidis C., Stamenkovic Z., Design Simulation and Optimization of a Solar Dish Collector with Spiral- Coil Thermal Absorber, *Thermal Science*, (2016), <http://thermalscience.vinca.rs/2016/4/30>.
- [73] E. Bellos, C. Tzivanidis, K.A. Antonopoulos, Exergetic, Energetic and Financial Evaluation of a Solar Driven Absorption Cooling System with Various Collector Types, *Applied Thermal Engineering* 102, (2016), pp. 749-759.
- [74] M. Abid, T. A. H. Ratlamwala, U. Atikol, Performance Assessment of Parabolic Dish and Parabolic Trough Solar Thermal Power Plant Using Nanofluids and Molten Salts, *International Journal of Energy Research*, 40, (2016), pp. 550–563
- [75] A.Mohammadi, M.Mehrpooya, Exergy Analysis and Optimization of an Integrated Micro Gas Turbine, Compressed Air Energy Storage and Solar Dish Collector Process, *Journal of Cleaner Production*;139, (2016), pp. 372-383.

- [76] R. Loni, A.B. Kasaeian, E. AskariAsli-Ardeh, B. Ghobadian, Optimizing the efficiency of a solar receiver with tubular cylindrical cavity for a solar-powered organic Rankine cycle, *Energy* 112, (2016), pp.1259-1272
- [77] Z.M. Omara, Mohamed A. Eltawil, Hybrid of solar dish concentrator, new boiler and simple solar collector for brackish water desalination, *Desalination*, 326, (2013), pp. 62-68
- [78] Gustavo Otero Prado, Luiz Gustavo Martins Vieira, João Jorge Ribeiro Damasceno, Solar Dish Concentrator for Desalting Water, *Solar Energy* 136, (2016), pp. 659-667
- [79] Z. Li, D. Tang, J. Du, T. Li, Study on the Radiation Flux and Temperature Distributions of the Concentrator–Receiver System In A Solar Dish/Stirling Power Facility, *Applied Thermal Engineering*, 31(10), (2011), pp.1780-1789
- [80] S. Cohen, G. Grossman, Development of a Solar Collector with a Stationary Spherical Reflector/Tracking Absorber for Industrial Process Heat, *Solar Energy*, 128, (2016), pp. 31-40
- [81] Ho, C. K. *et al.*, Characterization of Pyromark 2500 for High-Temperature Solar Receivers, *Proceedings of the 6th International Conference on Energy Sustainability of ASME*, San Diego, USA, (2012), pp. 509-518.
- [82] Perez-Encisoa R., Gallob A., Riveros-Rosasc D., Fuentealba-Vidalb E., Perez-Rábagod C., A Simple Method To Achieve a Uniform Flux Distribution in a Multi-Faceted Point Focus Concentrator, *Renewable Energy*, Volume 93, (2016), pp. 115–124
- [83] A.M. Daabo, S. Mahmoud, R.K. Al-Dadah, The Effect of Receiver Geometry on the Optical Performance of a Small-Scale Solar Cavity Receiver for Parabolic Dish Applications, *Energy* 114, (2016), pp. 513-525
- [84] E. Bellos, C. Tzivanidis, K.A. Antonopoulos, Design and Simulation of a New Solar Paraboloid Dish Collector, *Journal of solar energy research updates* 2, (2015), pp. 40-46
- [85] Y.B. Tao, Y.L. He, F.Q. Cui, C.H. Lin, Numerical Study on Coupling Phase Change Heat Transfer Performance of Solar Dish Collector, *Solar Energy*, 90, (2013), pp. 84-93
- [86] J. Zhu, K. Wang, G. Li, H. Wu, Z. Jiang, F.Lin, Y. Li, Experimental Study of the Energy and Exergy Performance for a Pressurized Volumetric Solar Receiver, *Applied Thermal Engineering* 104, (2016); pp.212-221
- [87] E.Przenzak, M.Szubel, M.Filipowicz, The Numerical Model of the High Temperature Receiver for Concentrated Solar Radiation, *Energy Conversion and Management*, Volume 125, 1 (2016), pp. 97–106.



- [88] J.A. Duffie, W.A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, third ed., Wiley, Hoboken, NJ, USA, (2006)
- [89] J. Leinhard IV, J. Leinhard V, *A Heat Transfer Textbook*, 4<sup>th</sup> Edition, PhilogistonPress, USA, (2012), pp.354–360.
- [90] Djordevic M., Stefanovic V., Mancic M., Pressure Drop and Stability of Flow in Archimedean Spiral Tube with Transverse Corrugations, *Thermal Science*;20(2), (2016), pp.579-591.
- [91] E. Bellos, C. Tzivanidis, K.A. Antonopoulos, I. Daniil, The Use of Gas Working Fluids in Parabolic Trough Collectors – An Energetic And Exergetic Analysis, *Applied Thermal Engineering*, 109(A), (2016), pp.1-14.
- [92] E. Bellos, C. Tzivanidis, K.A. Antonopoulos, G. Gkinis, Thermal Enhancement of Solar Parabolic Trough Collectors by Using Nanofluids and Converging-Diverging Absorber Tube, *Renewable Energy* 94, (2016), pp.213-222
- [93] F-Chart Software, Engineering Equation Solver (EES); 2015. <http://www.fchart.com/ees./23/08/2016>
- [94] Electrical Research Association, 1967 Steam Tables, Thermodynamic Properties of Water and Steam; Viscosity of Water and Steam, Thermal Conductivity of Water and Steam, Edward Arnold Publishers, London, 1967
- [95] [http://www.therminol.com/pages/bulletins/therminol\\_VP1.pdf](http://www.therminol.com/pages/bulletins/therminol_VP1.pdf)/23/08/2016
- [96] E.W. Lemmon, R.T. Jacobsen, S.G. Penoncello, and Friend D., Thermodynamic Properties of Air and Mixtures of Nitrogen, Argon, and Oxygen from 60 to 2000 K at Pressures to 2000 MPa, *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 29 (3), 331, (2000);<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jpcrd/29/3/10.1063/1.1285884/23/08/2016>



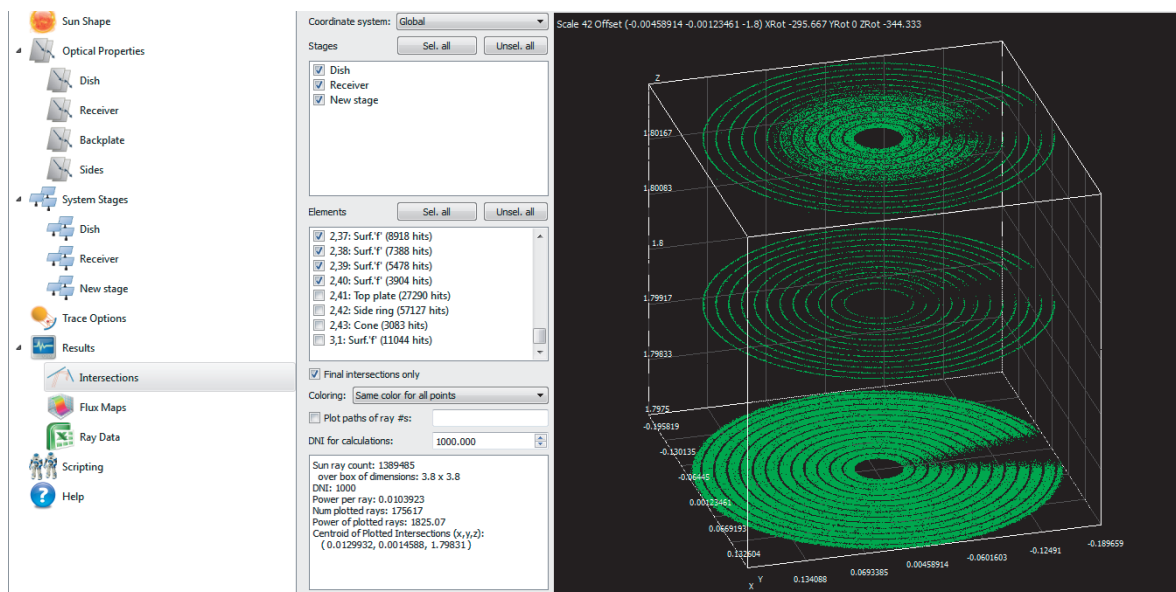
# Прилог

**ПРИЛОГ 1 - ВРЕДНОСТИ СПЕЦИФИЧНОГ ФЛУКСА АБСОРБОВАНОГ  
СУНЧЕВОГ ЗРАЧЕЊА****Табела П1.1** Вредности специфичног флукса концентрисаног апсорбованог зрачења појединих навојака спиралног глатког топлотног апсорбера.  $d_i = 11.7 \text{ mm}$ ,  $d_o = 12.2 \text{ mm}$ 

Ред. бр. навојка глатке спирале	Оптичка снага (укупни флукс) (W)	Вредност специфичног флукса апсорбованог зрачења ( $\text{Wm}^{-2}$ )
1	227.36	32944
2	317.33	31596
3	410.74	31237
4	495.7	30221
5	560.1	27982
6	632.88	27062
7	686.87	25242
8	732.14	23761
9	762.09	21862
10	781.6	12800
11	774.34	11776
12	599.84	8908.1
13	206.25	3173.8

**Табела П1.2** Вредности специфичног флукса концентрисаног апсорбованог зрачења појединих навојака спиралног глатког топлотног апсорбера:  $d_i = 14 \text{ mm}$ ,  $d_o = 15 \text{ mm}$

Ред. бр. навојка глатке спирале	Оптичка снага (укупни флукс) (W)	Вредност специфичног флукса апсорбованог зрачења ( $\text{Wm}^{-2}$ )
1	367.27	35542
2	460.4	34469
3	541.51	302804
4	611.09	31708
5	664.87	29911
6	710.44	28164
7	744.78	26431
8	765.61	24593
9	777.18	22782
10	782.49	21144
11	658.39	16813
12	302.47	7495.1
13	40.495	948.78

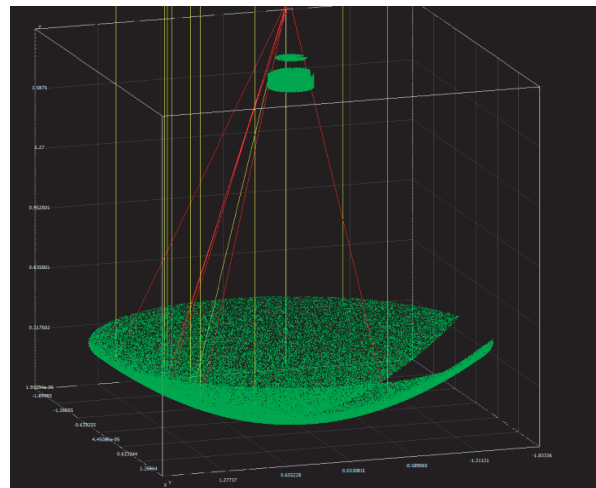
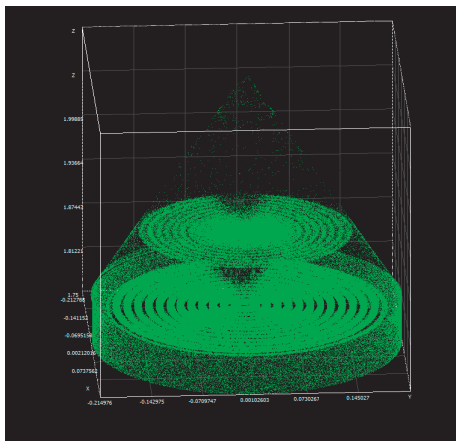


**Табела П1.3** Вредности специфичног флукса концентрисаног апсорбованог зрачења појединих навојака спиралног глатког топлотног апсорбера:  $d_0 = 12.2 \text{ mm}$ ,  $d_i = 9.3 \text{ mm}$ . Напомена: 1- навојак на периферији; 13- ти навојак у средишту апсорбера

Коефицијент рефлективности рефлектора 86.5%, коефицијент апсорпције апсорбера 90%, рефлективност задње стране кућишта пријемника, 90%, све остале рефлексивне површине су са 70% рефлективношћу.

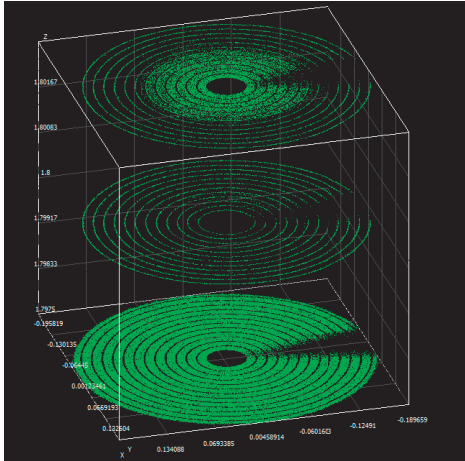
Број сценарија	H (mm)	h (mm)	Површинске грешка (mrad)	Грешке спекуларне рефлексије (mrad)	Грешка праћења (mrad)
I сценарио	1800	105	2, 4, 6	1, 2, 3	5, 20, 35, 50
II сценарио	2000	120	2, 4, 6	1, 2, 3	5, 20, 35, 50
III сценарио	2200	135	2, 4, 6	1, 2, 3	5, 20, 35, 50
IV сценарио	2400	150	2, 4, 6	1, 2, 3	5, 20, 35, 50
V сценарио	2600	165	2, 4, 6	1, 2, 3	5, 20, 35, 50

**Први сценарио: H = 1800 mm**

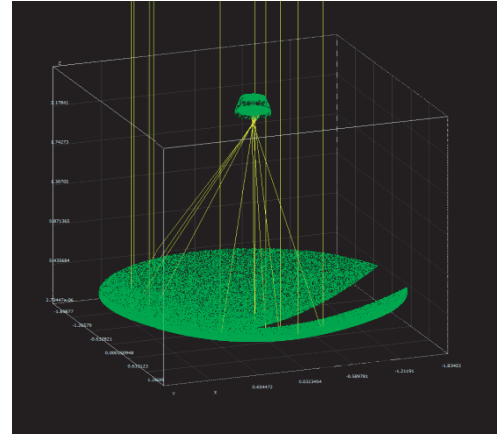
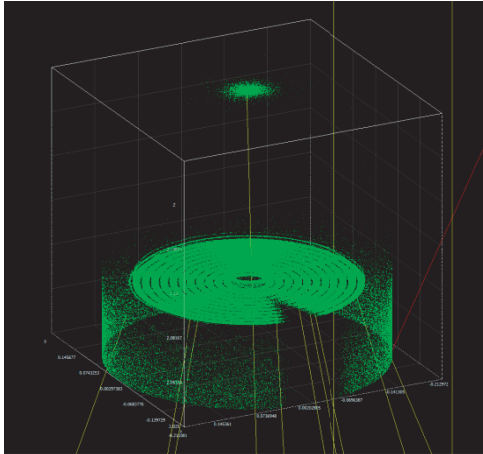




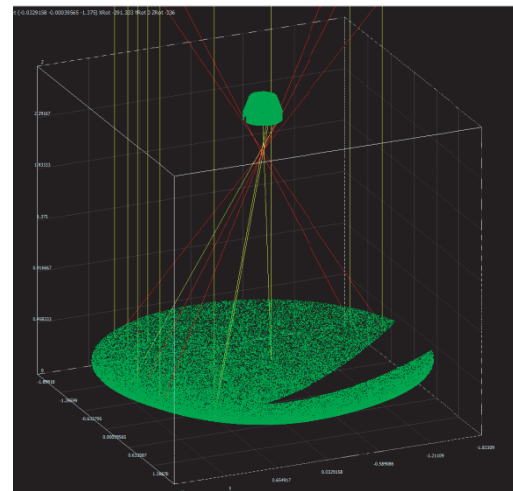
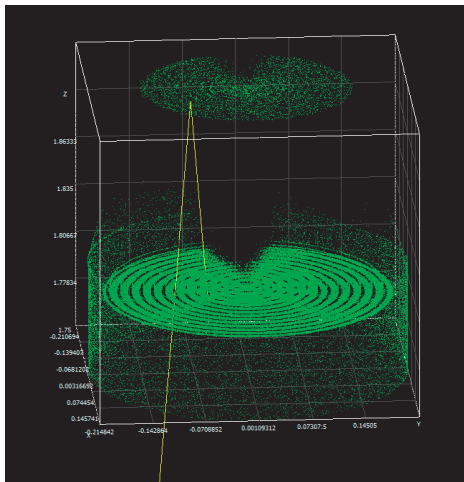
**Други сценарио:  $H = 2000 \text{ mm}$**

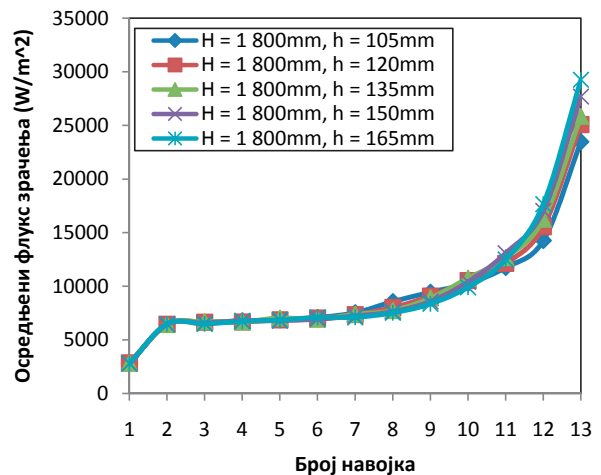
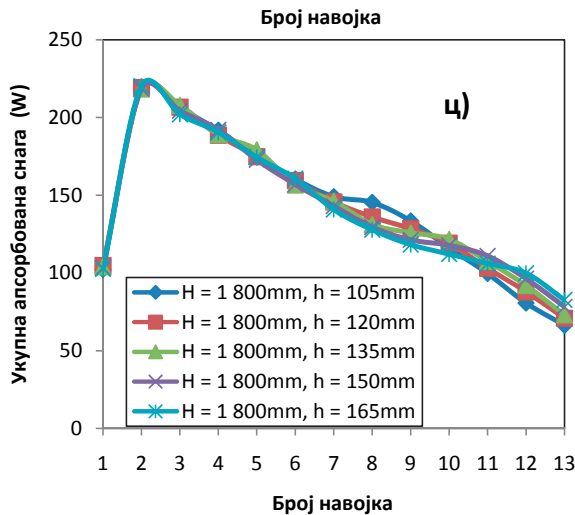
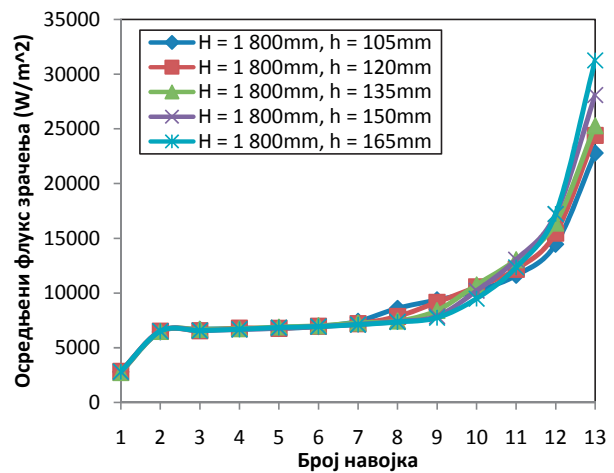
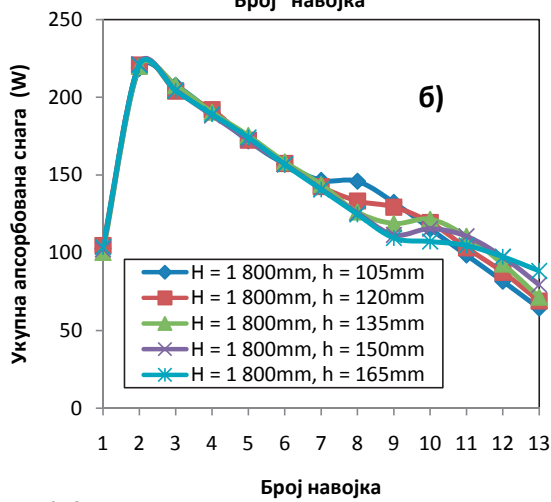
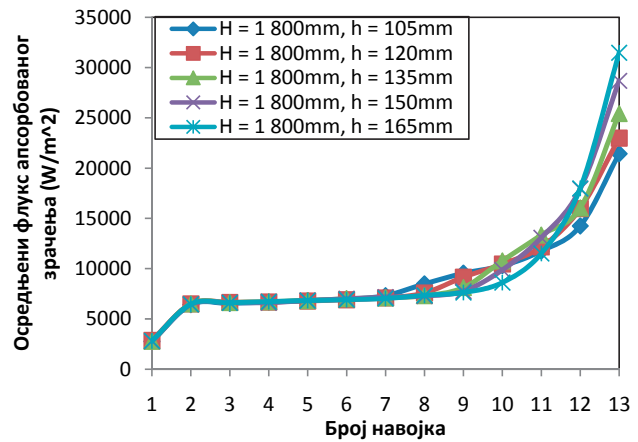
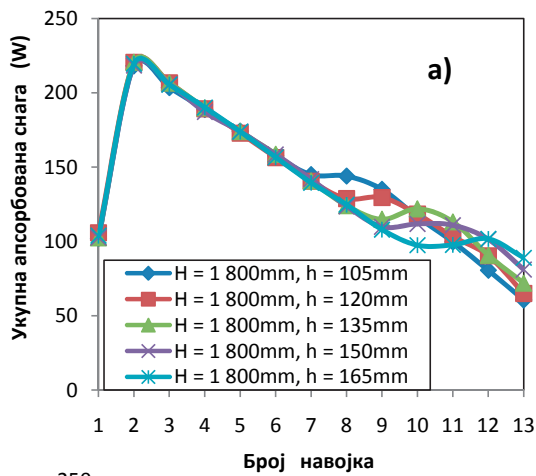


**Четврти сценарио:  $H = 2400 \text{ mm}$**



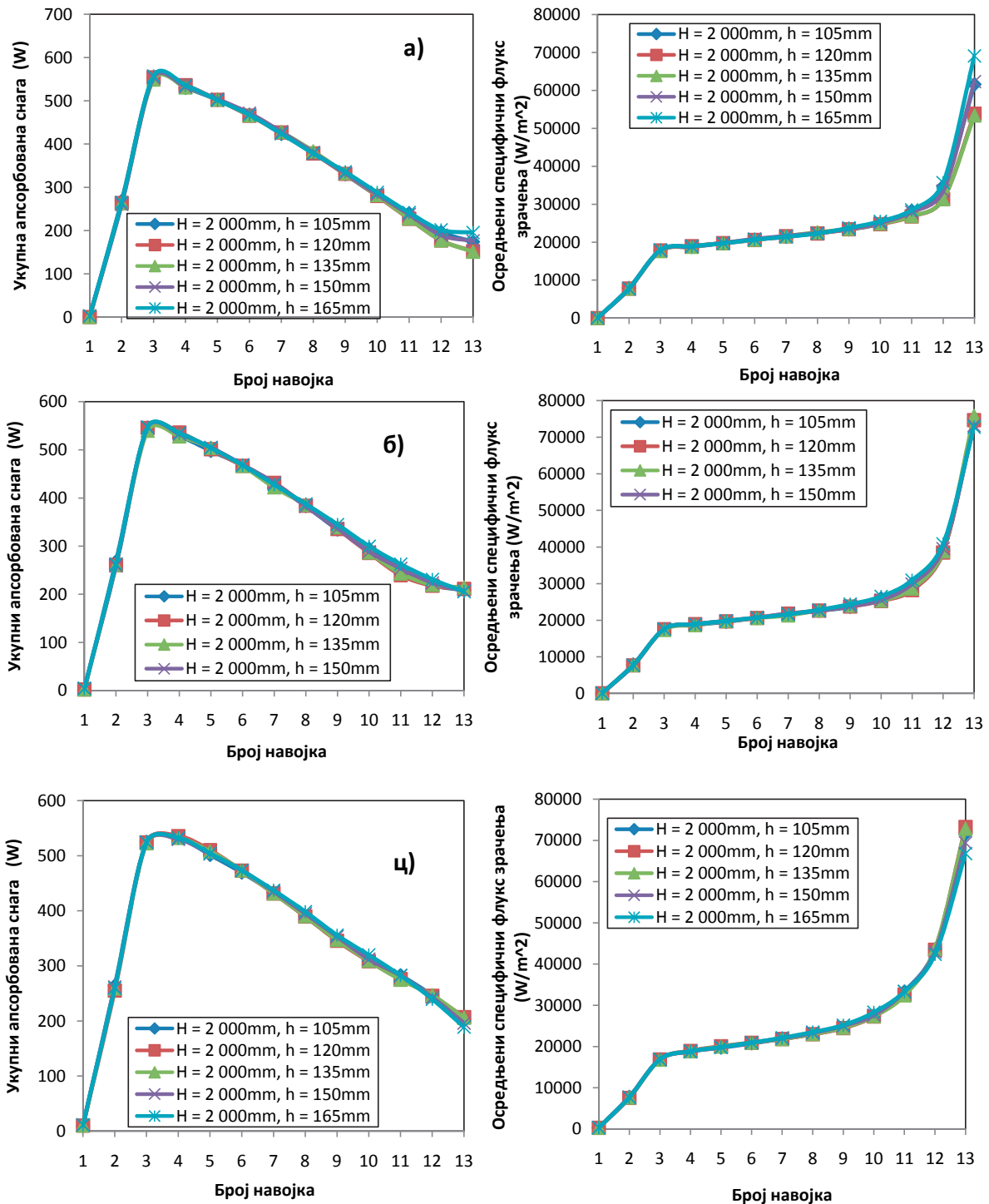
**Пети сценарио:  $H = 2600 \text{ mm}$**





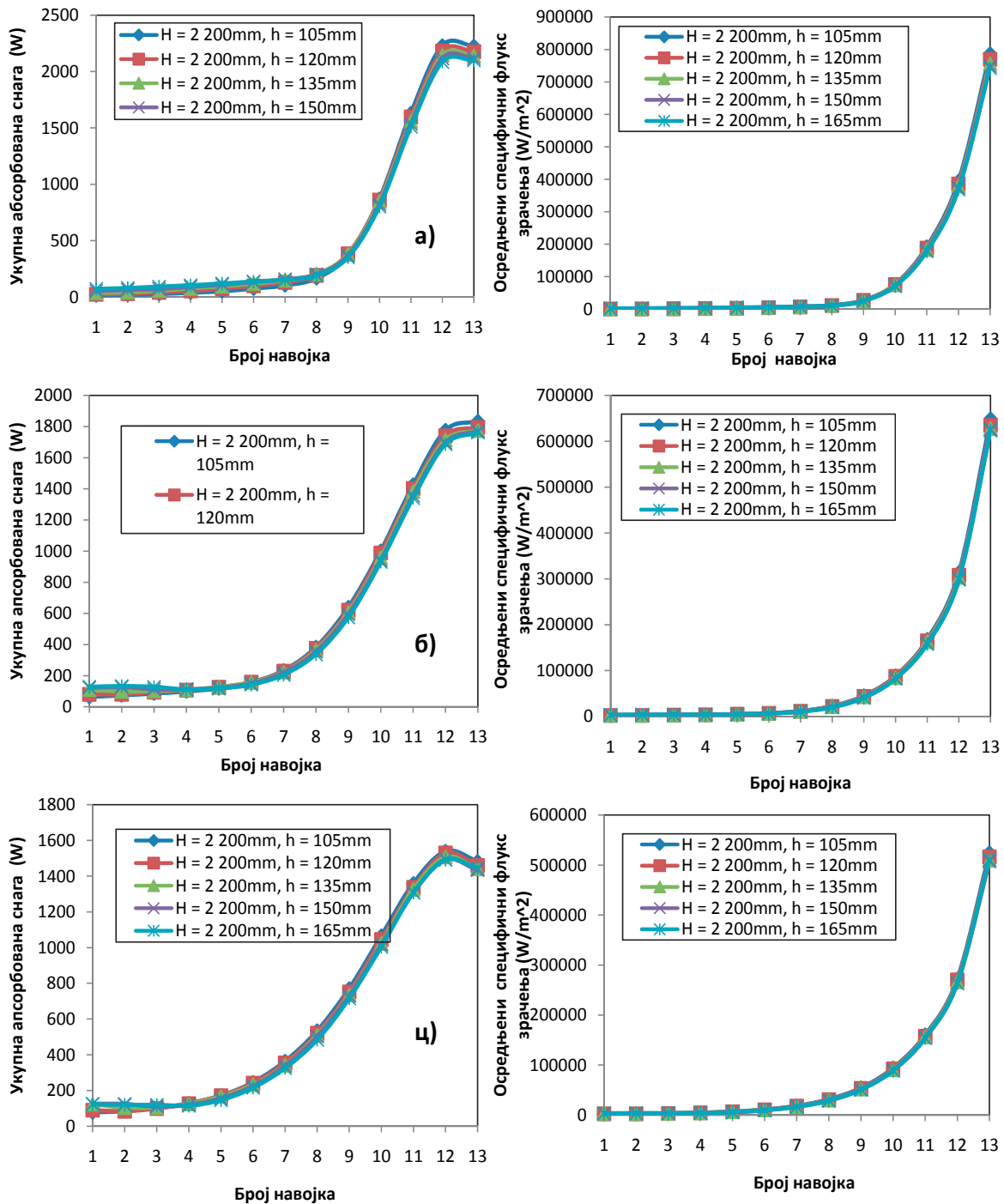
Површинске грешке: а) 2 mrad, 4 mrad; ц) 6 mrad  
Грешке спекуларне рефлексије: 1 mrad; б) 2 mrad ; ц) 3 mrad

**Први сценарио: H = 1800 mm**



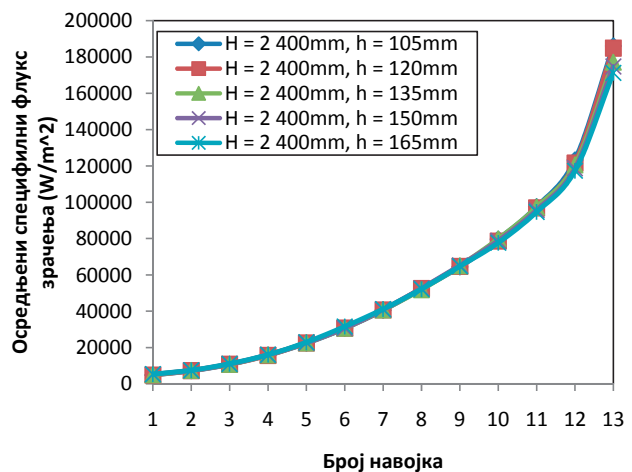
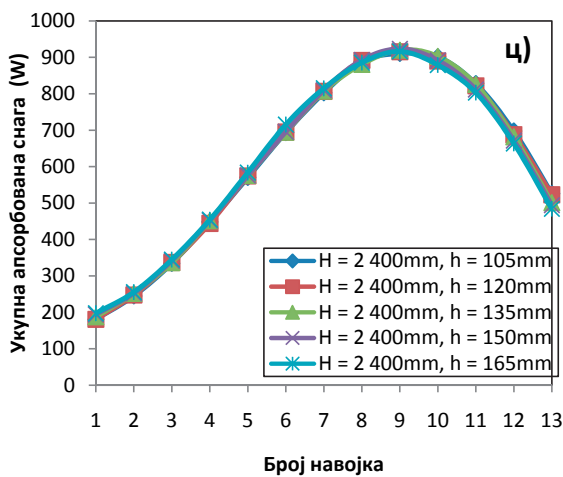
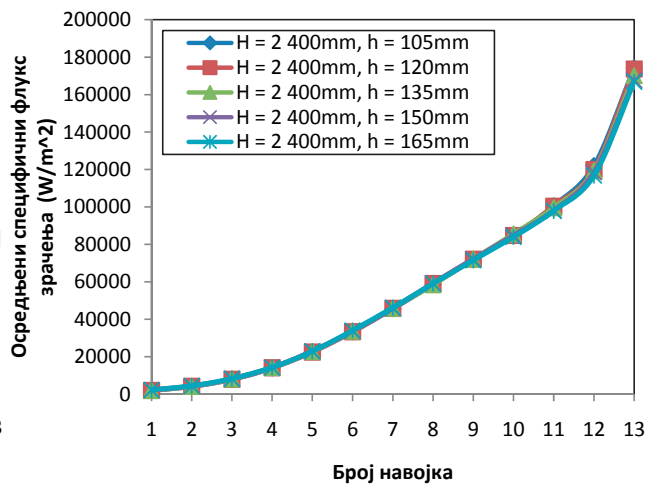
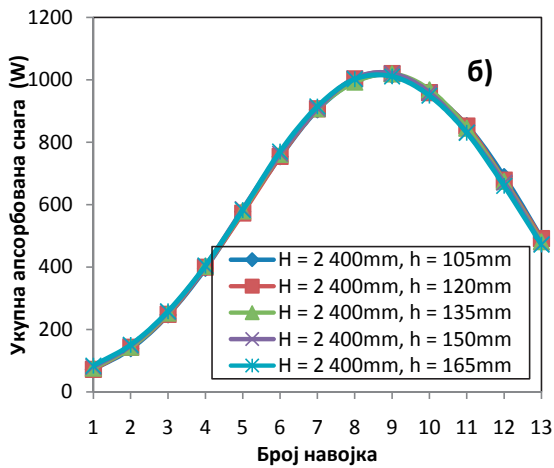
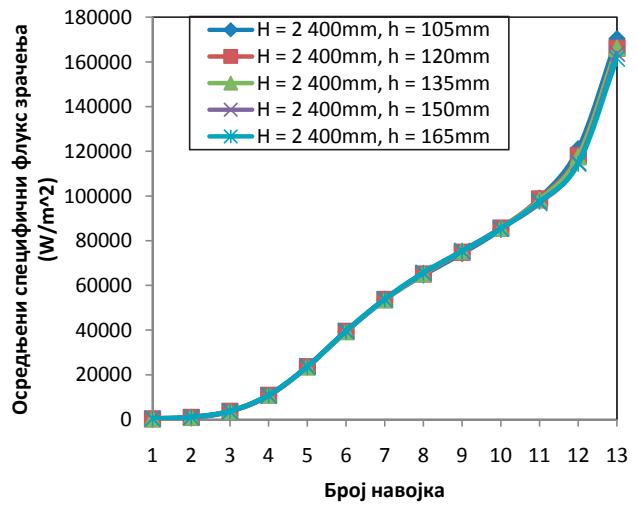
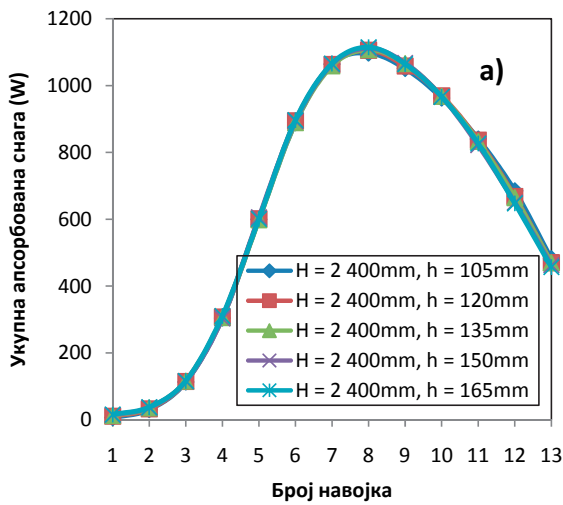
Површинске грешке: а) 2 mrad, 4 mrad; ц) 6 mrad  
 Грешке спекуларне рефлексије: 1 mrad; б) 2 mrad ; ц) 3 mrad

Други сценарио: H = 2000 mm



Површинске грешке: а) 2 mrad, б) 4 mrad; ц) 6 mrad  
Грешке спекуларне рефлексије: а) 1 mrad; б) 2 mrad ; ц) 3 mrad

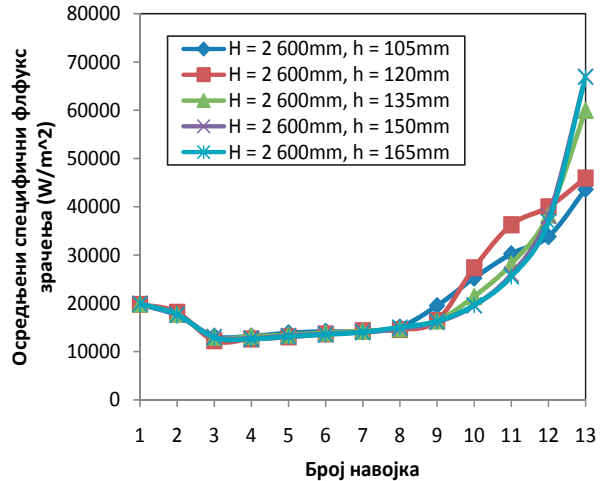
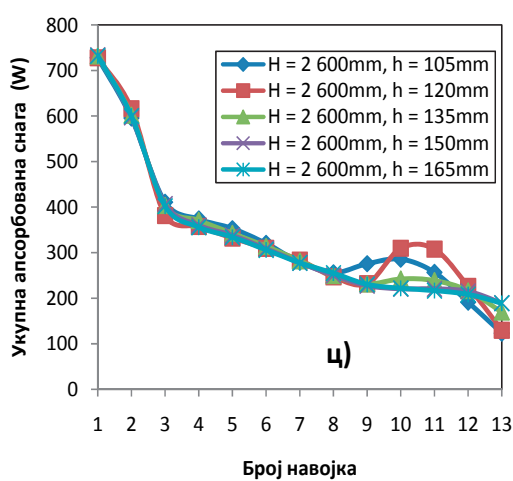
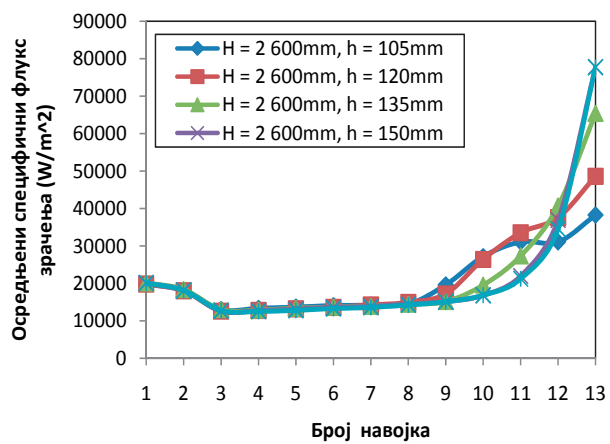
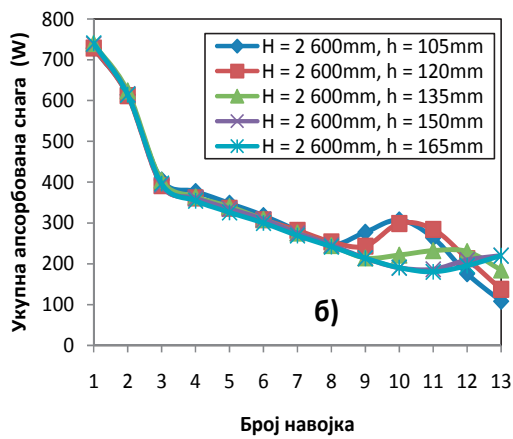
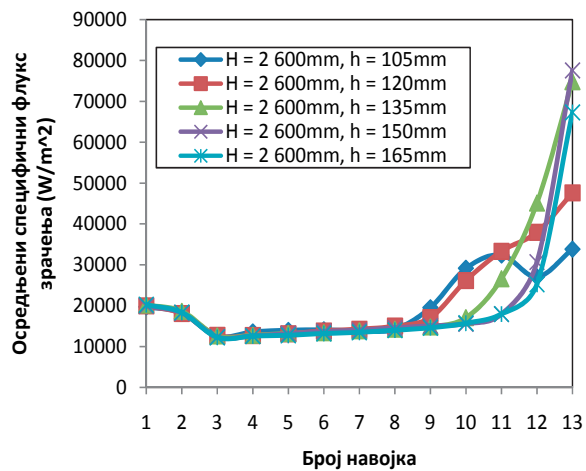
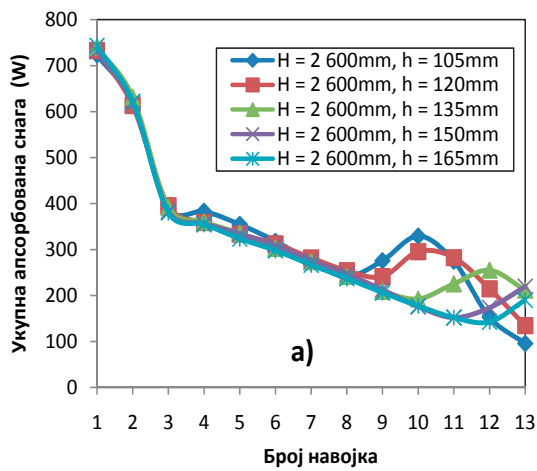
**Трећи сценарио: H = 2200 mm**



Површинске грешке: а) 2 mrad, б) 4 mrad; ц) 6 mrad

Грешке спекуларне рефлексије: а) 1 mrad; б) 2 mrad ; ц) 3 mrad

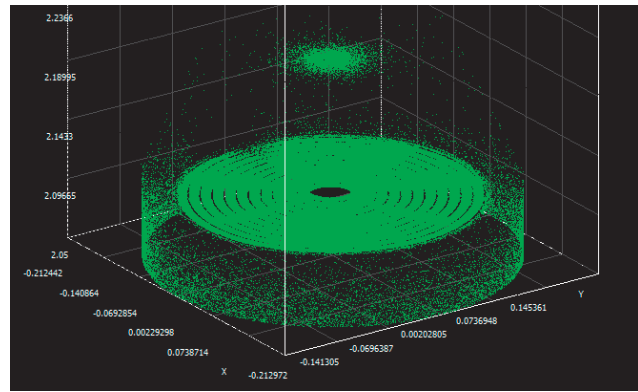
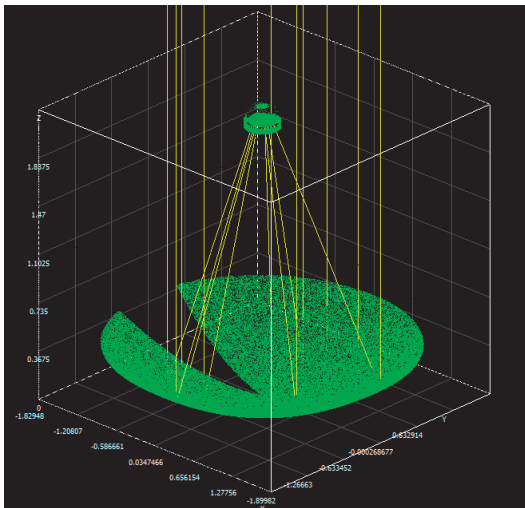
**Четврти сценарио: H = 2400 mm**



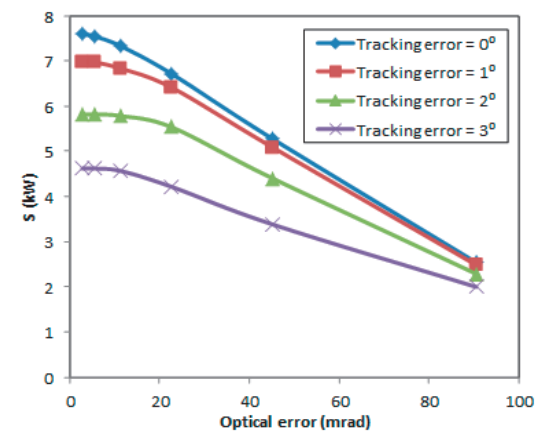
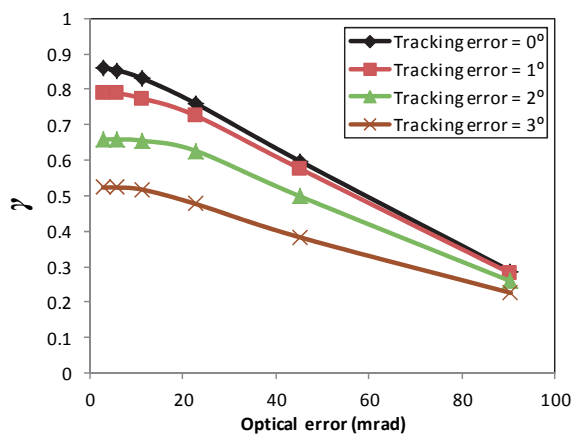
Површинске грешке: а) 2 mrad, б) 4 mrad; ц) 6 mrad  
Грешке спекуларне рефлексије: а) 1 mrad; б) 2 mrad ; ц) 3 mrad

**Пети сценарио: H = 2600 mm**

У наставку је приказан SolTrace model (Ray - tracing optical model). Површина спиралног глатког топлотног апсорбера је моделирана помоћу три слоја у облику концентричних прстенова, јер на тај начин је обезбеђено правилно моделирање апсорберске цеви у три различита пресека као што је приказано у другом сценарију. Изабрани број случајних стохастичких зрака је 1 000 000. Оптичка грешка соларног параболичног концентратора је процењена на око 60 mrad (3.4<sup>0</sup>) применом једначине ((5.31 и (\*\*)). Укупна оптичка грешка је функција површинске грешке нагиба рефлектујуће површине сегмената и грешке спекуларне рефлексије површине огледала. Грешка праћења параболичног концентратора услед праћења привидне путање Сунца (применом соларних фото сензора) је процењена на око 3<sup>0</sup>.



$$\omega_{optical} = (4\omega_{slope}^2 + \omega_{specularity}^2)^{1/2} \quad (**)$$



Фактор хватања и оптичка снага параболичног концентратора сунчевог зрачења у функцији оптичких грешака и грешака праћења применом SolTrace софтвера



**ПРИЛОГ 2 - ВРЕДНОСТИ СПЕЦИФИЧНОГ ФЛУКСА АБСОРБОВАНОГ  
 СУНЧЕВОГ ЗРАЧЕЊА СПИРАЛНОГ ПОПРЕЧНО НАБОРАНОГ  
 ТОПЛОТНОГ АПСОРБЕРА**

**Табела П2.1** Вредности специфичног флукса концентрисаног апсорбованог зрачења појединих исечкака спиралног попречно набораног топлотног апсорбера:  $d_i = 12.2 \text{ mm}$ ,  $d_o = 9.3 \text{ mm}$  (укупан број исечкака је 130)

Ред. бр. исечка наборане спирале	$\dot{Q}$ (W)	$Q_r$ (Wm <sup>-2</sup> )	N <sub>o</sub>	$\dot{Q}$ (W)	$Q_r$ (Wm <sup>-2</sup> )	N <sub>o</sub>	$\dot{Q}$ (W)	$Q_r$ (Wm <sup>-2</sup> )
1	1.22336	261.45	24	1.12243	286.175	47	84.9292	23284.7
2	1.13742	243.506	25	1.72798	482.774	48	90.2269	24493.8
3	1.17107	256.035	26	2.56603	743.427	49	90.6636	24885.3
4	1.14253	251.292	27	3.11872	920.652	50	91.051	24847.4
5	1.10757	241.514	28	5.46838	1650.79	51	18.3825	5021.58
6	1.09459	241.354	29	6.08314	1851.52	52	96.7131	26706.5
7	1.16923	264.228	30	9.78788	2956.17	53	96.8612	26580
8	1.09796	242.031	31	2.7995	826.703	54	98.0051	27311
9	1.13367	252.271	32	14.5652	4340.02	55	97.4923	27181.2
10	1.12301	254.888	33	21.3336	6192.67	56	97.6849	27512.8
11	1.06374	248.177	34	22.5502	6576.16	57	98.3897	28090.2
12	1.00052	227.851	35	29.8275	8439.42	58	96.7616	27836.1
13	1.08404	248.835	36	34.7721	9748.28	59	97.7529	28440.2
14	1.07645	249.732	37	37.2161	10445.4	60	94.714	27804.8
15	1.08489	254.78	38	46.1312	12668.8	61	18.6925	5631.69
16	1.0788	255.951	39	47.5715	13158.7	62	97.501	29173.9
17	1.07554	253.624	40	54.0318	14748.2	63	96.3975	29175.8
18	1.04172	249.831	41	11.4231	3152.1	64	97.0445	29681.7
19	1.01651	243.734	42	62.9394	17175.3	65	95.1332	29502
20	1.00153	247.792	43	71.4692	19489.4	66	95.1808	29804.1
21	1.01018	248.906	44	72.7552	19871.6	67	96.1292	30325.4
22	1.00658	246.928	45	78.61	21413.7	68	94.077	30136.2
23	1.08255	275.529	46	82.7407	22582.7	69	95.5537	30891.8
70	91.0156	29804.6	91	16.5876	7275.29	112	60.6459	40108.7
71	18.7622	6197.04	92	80.6864	36161	113	59.5341	40345.3



Ред. бр. исечка наборане спирале	$\dot{Q}$ (W)	$Q_r$ (Wm <sup>-2</sup> )	N <sub>o</sub>	$\dot{Q}$ (W)	$Q_r$ (Wm <sup>-2</sup> )	N <sub>o</sub>	$\dot{Q}$ (W)	$Q_r$ (Wm <sup>-2</sup> )
72	93.5225	31381.6	93	79.471	36246.7	114	58.5388	40508.1
73	92.5292	31509	94	79.0334	36650.5	115	56.6893	40197.8
74	93.353	32078.6	95	76.6699	36071.1	116	55.8314	40955.3
75	91.4547	31953.8	96	76.5773	36725.9	117	55.4358	41520.4
76	90.9346	32150.3	97	76.9486	37434.5	118	53.4915	40959.9
77	91.3114	32751.8	98	74.4799	37063	119	52.7547	41379.3
78	90.0821	32660	99	74.3904	37668.9	120	48.2529	39053
79	89.7809	33092.1	100	69.4061	35784.2	121	11.5964	9669.97
80	86.4856	32253.6	101	14.9824	7869.89	122	48.6872	41565.4
81	18.0147	6769.15	102	71.7404	38442.6	123	47.6356	41866.2
82	88.3252	33805.3	103	70.1471	38243.1	124	47.2329	42886.6
83	86.6418	33841.5	104	69.9718	38834.1	125	45.0738	42010.8
84	87.185	34395.1	105	67.5834	38368.1	126	43.5402	42298.3
85	85.3935	34223.6	106	66.8697	38962.6	127	43.4297	43168.6
86	84.6872	34465.6	107	66.9213	39800.4	128	41.2645	43213
87	84.5809	34918.1	108	65.0022	39338.7	129	40.7504	43289.2
88	82.8893	34612.4	109	64.2921	39602.7	130	36.3088	40377.9
89	83.296	35415.9	110	59.3349	37626.7			
90	78.2826	33954.5	111	13.4094	8783.44			

**ПРИЛОГ 3 - ЛИСТА ФАЈЛОВА МАКРОА КОРИШЋЕНИХ У НУМЕРИЧКИМ  
ОПТИЧКИМ СИМУЛАЦИЈАМА И ОПТИМИЗАЦИЈИ ПАРАБОЛИЧНОГ  
РЕФЛЕКТОРА СУНЧЕВОГ ЗРАЧЕЊА**

- **make-quasi-parabolic-segment-01.scn**

Изградња параболичног сегмента концентратора са радијусом кривине описаног параметарским формулама за површину сегмента

- **copy-and-rotate-segments.scn**

Копирање и ротирање сегмената концентратора  $n$ -пута приликом креирања коначног оптимизованог модела концентратора

- **tilt-segments-04.scn**

Нагиб сегмената концентратора у циљу попуњавања и униформизације флукса зрачења на површину апсорбера

- **make-complete-tilted-reflector.scn**

TracePro модел директоријум комплетног концентратора са закривљеним сегментима коришћењем три макроа

- **make-spiral-pipe-z.scn**

TracePro модел директоријум за креирање различитих геометријских модела спиралних глатких цевних и набораних апсорбера, равних, конусних и параболоидних.

- **QuasiParabolicReflector-2-1.oml**

TracePro модел директоријум коришћен у оптимизацији концентратора и спиралног апсорбера

- **Spanish slew drive 60 degree elevation in groups in reflector in x-y-plane-01.oml**

TracePro модел директоријум коришћен за симулацију засенчења код параболичног концентратора



**ПРИЛОГ 4 - НУМЕРИЧКИ КОД ТЕРМИЧКОГ МОДЕЛА ПАРАБОЛИЧНОГ  
КОНЦЕНТРИШУЋЕГ ПРИЈЕМНИКА СУНЧЕВОГ ЗРАЧЕЊА (EES -  
Engineering Equation Solver)**

$\eta_{opt}=0,35$  (оптичка ефикасност)

$v_v=200$  (запремински проток транспортног флуида-воде)

$t_{in}=35$  (улазна температура)

$g_b=800$  (интензитет директног сунчевог зрачења)

$t_{am}=30$  (температура околине)

$m=v_v/3600$  (масени проток транспортног флуида-воде)

$aa=10,29$  (апертура колектора-концентратора)

$a_{ro}=1 \cdot \pi \cdot d_{out}$  (спољни пречник цеви апсорбера)

$a_{ri}=1 \cdot \pi \cdot d_{in}$  (унутрашњи пречник цеви апсорбера)

$d_{in}=(d_{min}+d_{max})/2$  (средњи пречник цеви апсорбера)

$d_{out}=12,2/1000$  (спољни пречник апсорберске цеви)

$l=9,5$  (дужина спирала у развијеном облику)

$d_{min}=9,3/1000$  (минимални унутрашњи пречник апсорберске цеви)

$d_{max}=11,7/1000$  (максимални унутрашњи пречник апсорберске цеви)

$\epsilon_r=0,9$  (коефицијент емисивности површине апсорбера)

$h_{out}=2,8+3 \cdot v_{air}$  (конвективн коеф. прелаза топлоте између околине и апсорбера-пријемника)

$ss=5,67 \cdot 10^{-8}$  (Stefan-Boltzmann ова константа)

$v_{air}=2$  (брзина струјања ваздуха)

$t_{sun}=5770$  (температура Сунца К)

$q_u=m \cdot c_p \cdot (t_{out}-t_{in})$  (корисна количина топлоте- топлотна снага)



$q_s = a_a * g_b$  (енергија сунчевог зрачења са површине концентратора)

$n_{th} = q_u / q_s$  (топлотна ефикасност)

$q_{loss} = a_{ro} * h_{out} * (t_r - t_{am}) + a_{ro} * \epsilon_r * \sigma_s * ((t_r + 273)^4 - (t_{am} + 273)^4)$  (топлотни губици)

$q_{loss} + q_u = q_{abs}$  (thermal losses)

$q_{abs} = n_{opt} * q_s$  (абсорбована топлотна енергија у пријемнику сунчевог зрачења)

$q_u = h * a_{ri} * (t_r - t_{fm})$  (корисна количина топлоте - топлотна снага)

$nu = h * d_{in} / k_k$  (Нуселтов број)

$re = 4 * m / (\pi * d_{in} * \mu_m)$  (Рејнолдсов број)

$pr = \mu_m * c_p / k_k$  (Прандлов број)

$rr1 \$ = 'water'$

$k_k = \text{conductivity}(rr1 \$; t = t_{in}; p = 200)$  (топлотна проводљивост)

$\mu_m = \text{viscosity}(rr1 \$; t = t_{in}; p = 200)$  (вискозност)

$\rho_r = \text{density}(rr1 \$; t = t_{in}; p = 200)$  (густина)

$c_p = c_p(rr1 \$; t = t_{in}; p = 200) * 1000$  (специфични топлотни капацитет)

$t_{fm} = (t_{in} + t_{out}) / 2$  (средња температура флуида)

$f = 0,316 * re^{-0,25} + 0,41 * (d_{min} / d_{in})^{0,9}$  (коефицијент трења)

$dp = f * l / d_{in} * 0,5 * u^2 * \rho_r$  (пад притиска)

$m = \pi / 4 * u * \rho_r * d_{in}^2$  (масени проток транспортног флуида)

$nu = re * pr * f / 8 / (1 + 12,8 * \sqrt{f/8} * (pr^{0,68} - 1))$  (Нуселтов број)

$e_u = q_u - m * c_p * (273 + t_{am}) * \ln((273 + t_{out}) / (273 + t_{in})) - m * (273 + t_{am}) * dp / \rho_r / (273 + t_{fm})$  (корисна ексергија)

$e_s = q_s * (1 - 4/3 * (273 + t_{am}) / t_{sun} + 1/3 * ((273 + t_{am}) / t_{sun})^4)$  (ексергија сунчевог зрачења)

$\eta_{ex} = e_u / e_s$  (ексергетска ефикасност)

## Списак слика

Слика 2.1. Поређење енергије сунца са осталим изворима .....	9
Слика 2.2. Утицај атмосфере на упадно сунчево зрачење [1] .....	10
Слика 2.3. Соларна пећ конструисана од Лавозије из 1774. (Courtesy of Bibliotheque Nationale de Paris. Lavoisier, Oeuvres) [2] .....	11
Слика 2.4. Штампарија погоњена соларним параболичним системом 1878., Изложба у Паризу [3] .....	12
Слика 2.5. Дијаграм путање Сунца за 45° северне географске ширине .....	13
Слика 2.6. Приказ истраживања концентришућих соларних система у свету према години и врсти истраживања .....	15
Слика 2.7. Приказ истраживања према години и типу соларних параболичних концентришућих пријемника - концентратора .....	17
Слика 2.8. <b>Vanguard</b> соларни параболични концентратор - прва генерација [5] .....	18
Слика 2.9. <b>Vanguard</b> соларни параболични концентратор - друга генерација [5] .....	18
Слика 2.10. а) Соларни параболични концентришући систем; б) Озрачена апертура пријемника и апсорбер у фокусу концентратора у току експеримента [6] .....	19
Слика 2.11. Solar CAT концентришући параболични систем [7] (Southwest Solar Technologies, 2013). .....	20
Слика 2.12. HelioFocus концентришући соларни пријемник са равним квадратним огледалима [8] (Smith and Cohn, 2010). .....	21
Слика 2.13. Соларни парк састављен од соларних концентратора EURODISH- Немачка .....	22
Слика 2.14. (а) Eurodish параболични концентратор (Mancini, 1997) и (б) систем праћења " <i>Titansolar</i> " [9] .....	22
Слика 2.15. Телескопски концентришући пријемник са системом за праћење, Arizona Универзитет, [10] .....	22
Слика 2.16. Solatron концентришући систем - New Zealand (а) праћење елевације помоћу линераног актуатора и (б) редуктор за азимутно праћење [11] .....	23
Слика 2.17. KIER прототип соларног параболичног концентратора [12] .....	24
Слика 2.18. Концентришући соларни систем развијен на Технолошком Институту Мадрас [14] .....	25
Слика 2.19. Powerdish III - 3 генерација [15] .....	27
Слика 2.20. Powerdish IV - Концентратор 4- те генерације [16] .....	27

Слика 2.21 . Zenith соларни концентришући систем из Израела [17] .....	28
Слика 2.22. CPV 3000 Соларни параболични концентришући пријемник [18] .....	29
Слика 2.23. SG4” прототип површине 500m <sup>2</sup> Соларни параболични концентришући пријемник - лево и соларни цевни апсорбер у кавитету- десно [19] .....	30
Слика 2.24. ”ARUN” Соларни параболични концентришући пријемник [20] .....	31
Слика 2.25. ”AEDesign” Соларни параболични концентришући пријемник (лево), расподела флукса упадног топлотног зрачења на површини апсорбера - Стирлинг мотор (десно) [21].....	32
Слика 2.26. ”MWS” Соларни параболични концентришући пријемник [23] .....	34
Слика 2.27. ”Solarux” Соларни параболични концентришући пријемник [24] .....	35
Слика 2.28. Прототип соларног концентратора (лево); фокус концентратора - област максималне озрачености (горњи десни угао; 2D и 3D профил густине флукса зрачења на површини хибридног рисивера [25].....	36
Слика 2.29. Параболични концентратор сунчевог зрачења са апсорпционим чилером SASCS - испитна станица - CSIRO Energy Centre смештен у Њукастлу, NSW [26].....	37
Слика 2.30а. Опције за интеграцију полигенерационог постројења за производњу електричне, топлотне и расхладне енергије [28] .....	39
Слика 2.30б. Шема лабораторијског полигенерацијског постројења применом параболичног концентратора сунчевог зрачења .....	40
Слика 2.31. OMSoP - пројекат примене соларног концентратора у систему полигенерације [29] .....	40
Слика 3.1. Подела соларних концентришућих пријемника.....	52
Слика 3.2. Детаљ равног (плочастог) пријемника топлоте [59].....	55
Слика 3.3. Шема двоструко-озраченог соларног пријемника са равним рефлектором: 1 - ДОП и 2 - рефлектор [62].....	56
Слика 3.4. Концентратори са равним огледалима а) систем равних огледала (1) и (2) концентрише сунчеве зраке на тамну плочу (3) и загрева је до високе температуре; б) систем огледала (1) и (2) концентрише сунчеве зраке на цилиндричну површину (3) и загрева ову површину и њену унутрашњост до високе температуре; ц) више – или полиплочасти (Френелов) систем огледала (1) концентрише сунчеве зраке на цев (2).....	58
Слика 3.5. Огледала са закривљеним површинама .....	59
Слика 3.6. Приказ сферног и параболичног соларног концентратора .....	59
Слика 3.7. Шематски приказ P2CC пријемника .....	62
Слика 3.8. Прототип P2CC пријемника [63] .....	62
Слика 3.9. Попречни пресек једног модула P2CC колектора [63].....	63
Слика 3.10. Шематски приказ вакуумског цевног колектора [64].....	64

<b>Слика 3.11.</b> Шематски приказ параболоцилиндричног пријемника сунчевог зрачења .....	65
<b>Слика 3.12.</b> Линеарно Фреснелово колекторско поље [65] .....	66
<b>Слика 3.13.</b> Шематски приказ параболоидног концентратора.....	67
<b>Слика 3.14.</b> Соларни концентратор са фокусом на доле (Ring array solar parabolic concentrator) [66] .....	67
<b>Слика 3.15.</b> Хелиостатско поље колектора [67].....	69
<b>Слика 4.1.</b> Модели рефлексije идеалних и реалних површина .....	75
<b>Слика 4.2.</b> АВg модел BRDF у функцији угла упадних зрака (параболично огледало) .....	76
<b>Слика 4.3.</b> Методологија симулације оптичког модела параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења - <b>TracePro</b> модел.....	78
<b>Слика 4.4.</b> Реални систем (лево), 3D модел соларног параболичног пријемника са системом двоосног праћења сунца (десно).....	82
<b>Слика 4.5.</b> Оптички (Ray tracing) модел параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења.....	82
<b>Слика 4.6.</b> Расподела флуksа абсорбованог зрачења (профил ирадијансе) ефективне жижне равни на површини апсорбера .....	83
<b>Слика 4.7.</b> 3D модел параболичног концентришућег пријемника са равним шестоугаоним фасетама (лево); основа концентратора - параболоид (D=5m, f=1.6m).....	84
<b>Слика 4.8.</b> Оптички (Ray - Tracing) модел параболичног концентратора са шестоугаоним равним сегментима .....	84
<b>Слика 4.9.</b> Расподела флуksа абсорбованог сунчевог зрачења (профил ирадијансе) .....	85
<b>Слика 4.10.</b> Концентрација рефлектованог сунчевог зрачења (Ring array) на површину параболичног концентратора .....	86
<b>Слика 4.11.</b> Расподела флуksа абсорбованог сунчевог зрачења (лево); Приказ хода зрака (десно).....	87
<b>Слика 4.12.</b> Расподела флуksа абсорбованог сунчевог зрачења (лево); Приказ хода зрака (десно).....	87
<b>Слика 4.13.</b> Расподела флуksа абсорбованог сунчевог зрачења (лево); Приказ хода зрака (десно).....	88
<b>Слика 4.14.</b> 3D дистрибуција флуksа абсорбованог зрачења .....	89
<b>Слика 4.15.</b> Пречник концентратора и жижна даљина параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења (лево); 3D модел апсорбера.....	89
<b>Слика 4.16.</b> Дистрибуција флуksа абсорбованог сунчевог зрачења на површини апертуре апсорбера.....	90



<b>Слика 4.17.</b> Конструкција апсорбера у кавитету (лево); основне димензије апсорбера са конусним кавитетом и секундарним концентратором (десно).....	91
<b>Слика 4.18.</b> Дистрибуција флукса зрачења на површини апертуре рисивера (2D - лево); 3D профил (десно).....	91
<b>Слика 4.19.</b> 3D Профил флукса апсорбованог сунчевог зрачења на површини зида и хеликоидног цевног апсорбера .....	92
<b>Слика 4.20.</b> 2D Профил апсорбованог сунчевог зрачења на једној половини унутрашње стране кавитета (лево); 3D профил флукса апсорбованог зрачења	92
<b>Слика 4.21.</b> 2D Профил апсорбованог сунчевог зрачења на другој половини унутрашње стране кавитета (лево); 3D профил флукса апсорбованог зрачења	93
<b>Слика 4.22.</b> Предња и задња страна квадратно - параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења.....	93
<b>Слика 4.23.</b> Приказ хода зрака (лево); Концентрација упадног сунчевог зрачења на апсорберу.....	94
<b>Слика 4.24.</b> 2D (лево) и 3D (десно) профил апсорбованог сунчевог зрачења на површини апсорбера.....	94
<b>Слика 4.25.</b> Расподела флукса зрачења у теоријском фокусу цилиндричног апсорбера (десно); Расподела флукса сунчевог зрачења у хоризонталној и вертикалној равни површине апсорбера (десно) .....	95
<b>Слика 4.26.</b> 2D расподела апсорбованог флукса сунчевог зрачења конфигурација са $N_{total}=415$ сегмената постављених у $M=12$ редова; .....	96
<b>Слика 4.27.</b> Симулација хода зрака (лево); тродимензонални распоред апсорбованог флукса зрачења .....	96
<b>Слика 5.1.</b> Геометријски модел параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења .....	99
<b>Слика 5.2.</b> 3D виртуелни модел соларног параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења; (лево) - поглед са задње стране; (десно)- поглед с преда.....	99
<b>Слика 5.3.</b> Цртеж развоја формуле за закривљење сегмента кружног параболичног концентратора сунчевог зрачења .....	101
<b>Слика 5.4.</b> Промена ивичног угла у функцији жижне даљине.....	105
<b>Слика 5.5.</b> Шема рефлектовања сунчевог зрачења параболичног концентратора.....	106
<b>Слика 5.6.</b> Креирање сложене геометрије попречно набораног спиралног апсорбера параболичног концентратора сунчевог зрачења .....	109
<b>Слика 5.7.</b> Профил попречно наборане цеви праве деонице [81] .....	110
<b>Слика 5.8.</b> Геометријски модел топлотног апсорбера (лево); увећани приказ цевних исечака спиралног попречно набораног апсорбера (десно) .....	113
<b>Слика 5.9.</b> Шема мерења коефицијента рефлексије равног огледаластог узорка.....	115

<b>Слика 5.10.</b> Укупни и специфични флукс апсорбованог зрачења (ирадијанса) у ф-ји положаја кружног топлотног апсорбера .....	118
<b>Слика 5.11.</b> Максимална и просечна вредност специфичног флукса апсорбованог зрачења у ф-ји пречника кружног топлотног апсорбера .....	118
<b>Слика 5.12.</b> Оптички и геометријски концентрациони однос у ф-ји пречника кружног топлотног апсорбера .....	119
<b>Слика 5.13.</b> Укупни флукс зрачења и оптичка ефикасност у ф-ји пречника кружног апсорбера.....	120
<b>Слика 5.14.</b> Расподела флукса апсорбованог зрачења на кружном апсорберу пречника 400 mm .....	121
<b>Слика 5.15.</b> 3D модел спиралног глатког ТА (лево); А - улаз флуида; В - излаз флуида (десно) .....	124
<b>Слика 5.16.</b> Оптимизација положаја спиралног топлотног апсорбера.....	125
<b>Слика 5.17.</b> Расподела флукса апсорбованог сунчевог зрачења дуж осе спиралног топлотног апсорбера .....	126
<b>Слика 5.18.</b> Нумеричка симулација применом методе прорачуна хода зрака .....	127
<b>Слика 5.19.</b> Расподела флукса апсорбованог сунчевог зрачења спиралног глатког топлотног апсорбера.....	127
<b>Слика 5.20.</b> Пресек кућишта спиралног топлотног апсорбера са димензијама.....	129
<b>Слика 5.21.</b> Расподела специфичног флукса апсорбованог сунчевог зрачења [ $Wm^{-2}$ ] на 121-ом исечку - први навојак спиралног набораног апсорбера.....	131
<b>Слика 5.22.</b> Нормализација специфичног флукса апсорбованог зрачења према максималној вредности (Peak irradiance- (лево); Вокселизација домена једног исечка спиралног набораног апсорбера (десно) .....	131
<b>Слика 5.23.</b> Расподела снаге апсорбованог зрачења на површини спиралног набораног топлотног апсорбера .....	132
<b>Слика 5.24.</b> Просечни флукс апсорбованог сунчевог зрачења за равни кружни и спирални наборани топлотни апсорбер.....	133
<b>Слика 5.25.</b> Развој нумеричког термичког модела [35](EES code П4).....	138
<b>Слика 5.26.</b> а, б) Топлотна и ексергетска ефикасност са водом као медијумом при различитим запреминским протоцима; в,г ) за термичко уље Therminol VP-1; д, њ) за ваздух као радни медијум .....	140
<b>Слика 5.27.</b> Пад притиска за рад система са ваздухом као медијумом при различитим запреминским протоцима .....	141
<b>Слика 5.28.</b> а, њ) Упоређење топлотне и ексергетске ефикасности три радна флуида; б) Зависност излазне температуре од врсте радног флуида; в) Зависност температуре пријемника од врсте радног флуида; г) коефицијент прелаза топлоте за три симулирана радна флуида; д) пад притиска за три симулирана радна флуида.....	143

<b>Слика 5.29.</b> Расподела температуре: а) на доњем делу површине апсорбера; б) у флуиду у хоризонталном средњем пресеку спиралне цеви .....	144
<b>Слика 5.30.</b> Расподела температуре воде; а) вертикални пресек спиралног апсорбера; б) расподела температуре флуида на излазу у попречном пресеку- 1- навојак .....	144
<b>Слика 6.1а.</b> Моделирање осенчења на критичним деловима параболичног концентратора (нумерички модел) .....	147
<b>Слика 6.1б.</b> Моделирање осенчења на реалном експерименталном моделу од механичких компоненти .....	148
<b>Слика 6.2.</b> Пример примењене нумеричке мреже (1742416 елемената, 3227389 чворова (лево), Увећани приказ нумеричке мреже (десно).....	150
<b>Слика 6.3.</b> Еквивалентни Von- Mises-ови напони .....	150
<b>Слика 6.4.</b> Укупна деформација структуре концентратора - предња страна.....	150
<b>Слика 6.5.</b> FEA модел параболичног концентришућег система за двоосно позиционирање .....	151
<b>Слика 6.6.</b> Постоље параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења .....	153
<b>Слика 6.7.</b> Модел развоја соларног оптичког концентришућег система .....	154
<b>Слика 6.8.</b> Процес пројектовања соларног оптичког система.....	155
<b>Слика 6.9.</b> Соларни параболични концентратор (лево); Спирални глатки топлотни апсорбер окренут према концентратору (десно) .....	170
<b>Слика 6.10.</b> Приказ рефлектованих зрака на раван кружни апсорбер (лево); и параболоидни апсорбер (десно) .....	172
<b>Слика 6.11.</b> Дефинисање параметара параболичног апсорбера у оквиру TracePro Едитора.....	172
<b>Слика 6.12.</b> Расподела флукса апсорбованог сунчевог зрачења на површини кружног апсорбера .....	173
<b>Слика 6.13.</b> Расподела флукса апсорбованог сунчевог зрачења на површини параболоидног апсорбера .....	173
<b>Слика 6.14.</b> Осе ротације и углови нагиба рефлектора (лево); Поглед с преда параболичног концентратора са осам ротације, угловима нагиба појединих сегмената (десно).....	175
<b>Слика 6.15.</b> Расподела флукса концентрисаног апсорбованог зрачења на параболоидном апсорберу ( $f = 200 \text{ mm}$ ).....	175
<b>Слика 6.16.</b> Расподела флукса концентрисаног апсорбованог зрачења на равном кружном апсорберу озраченог параболичним рефлектором закренутих сегмената .....	176
<b>Слика 6.17.</b> Расподела флукса зрачења на параболичном апсорберу ( $f = 200 \text{ mm}$ ) озрачен концентратором са новим сегментима .....	177

<b>Слика 6.18.</b> Расподела флуksа зрачења на параболичном апсорберу ( $f = 200 \text{ mm}$ ) озрачен концентратором са проширеним пољем зрачења и нагнутим сегментима .....	177
<b>Слика 6.19.</b> Мапа флуksа зрачења (лево) и мапа флуksа са означеним кључним сегментима (Inkscape програм) (десно) .....	178
<b>Слика 6.20.</b> Спречавање максималних флуksева зрачења покривањем површине сегмената (лево), засенчење површине апсорбера од механичких компонената (десно) .....	179
<b>Слика 6.21.</b> Мапа флуksа на параболичном апсорберу (лево), недостатак 12- латице замењен танким слојем површинског покривача идеалне апсорптивности (десно) .....	179
<b>Слика 6.22.</b> Пролажење концентрисаних зрака кроз шупљине спиралног равног апсорбера (лево) и кроз параболоидни спирални апсорбер (десно) .....	181
<b>Слика 6.23.</b> Соларни параболични концентратор са параболоидним спиралним глатким топлотним апсорбером .....	183
<b>Слика 6.24.</b> Мапа флуksа параболоидног спиралног глатког апсорбера са подешеном жижном даљином $f=150$ , пречник цеви $d=13\text{mm}$ и корак спирале $p=11.6\text{mm}$ .....	183
<b>Слика 6.25.</b> Коначни 3D модел параболичног спиралног апсорбера (лево); 3D расподела флуksа апсорбованог зрачења .....	184
<b>Слика 6.26.</b> Развој математичког модела за нови радијус кривине сегмента концентратора за апсорбер постављен иза теоријског фокуса .....	186
<b>Слика 6.27.</b> Оптимални положај топлотног апсорбера ( $f=2445 \text{ mm}$ ) .....	187
<b>Слика 6.28.</b> Почетна конфигурација за спирални апсорбер постављен иза теоријског фокуса (2260) mm .....	187
<b>Слика 6.29.</b> Расподела флуksа на параболоидном апсорберу применом пуног параболичног концентратора, однос апсорбованог и емитованог флуksа је 0.93 .....	188
<b>Слика 6.30.</b> 3D-Расподела флуksа на параболичном спиралном апсорберу постављеног иза теоријског фокуса пуног параболичног концентратора .....	188
<b>Слика 7.1.</b> Пријемно рефлектујући систем - параболични концентришући пријемник сунчевог зрачења .....	191
<b>Слика 7.2.</b> Соларни концентришући систем у радном и сигурносном положају .....	192
<b>Слика 7.3.</b> Ортографска и Стереографска пројекција <i>сунчевог дијаграма</i> за координате $\varphi=43^{\circ}19'51'' \text{ N}$ и $\lambda=21^{\circ}53'30'' \text{ E}$ .....	194
<b>Слика 7.4.</b> Приказ соларних фотосензора као и контролно управљачка јединица система за позиционирање .....	195
<b>Слика 7.5.</b> Граничници са импулсним давачима система за позиционирање (лево); соларни параболични концентратор усмерен ка југу (десно) .....	197

<b>Слика 7.6.</b> Испитна инсталација за спољашње испитивање са затвореним циркулационим колом – елементи инсталације у унутрашњости лабораторије .....	198
<b>Слика 7.7.</b> Концентрисање рефлектованог сунчевог зрачења у спиралном набраном топлотном апсорберу .....	199
<b>Слика 7.8.</b> Испитна инсталација за спољашње испитивање са затвореним циркулационим колом, 1. пиранометар; 3. мерење температуре на улазу КПСЕ; 4. мерач протока; 5. провидна цев; 6. филтер; 7. регулатор температуре; 8. вентил; 9. пумпа; 10. експанзиона посуда; 11. сигурносни вентил; 12. вентил за одваздушење; 13. мерење температуре на излазу ПСЕ; 14. изолација; 15. проточни вентил; 16. анемометар; 17. температура околине.....	199
<b>Слика 7.9.</b> Изведена инсталација са акумулаторима топлотне енергије у оквиру експерименталног лабораторијског система и Pt 500 сонда за мерење температуре .....	200
<b>Слика 7.10.</b> TA-STAD мерни балансни вентил Tour & Andersson и калориметар Kamstrup Multical 66CDE .....	201
<b>Слика 7.11.</b> Аксијално позиционирање мерних крајева термопарова дуж истог радијалног правца спиралног апсорбера .....	202
<b>Слика 7.12.</b> Манипулатор двоосног подешавања фокуса параболичног концентратора .....	203
<b>Слика 7.13.</b> Подешавање апсорбера/рисивера у два управна правца .....	203
<b>Слика 7.14.</b> Приказ аквизиционог система мерења температуре (лево); National Instruments, типа NI 9213 са 16 канала (десно) .....	204
<b>Слика 7.15.</b> Носач пиранометра са могућношћу подешавања око две осе ротације .....	205
<b>Слика 7.16.</b> Пиранометар Kipp&Zonen CM11 и мерни систем ТЕСТО 454 са сондом за мерење брзине ветра, влажности и температуре .....	206
<b>Слика 7.17.</b> Прикупљање резултата мерења на рачунару.....	206
<b>Слика 7.18.</b> Термовизијски снимци на површини спиралног топлотног апсорбера и на шасији механичког склопа система за позиционирање.....	208
<b>Слика 7.19.</b> Мерење дифузног сунчевог зрачења (31.08.2016) .....	212
<b>Слика 7.20.</b> Мерење глобалног (укупног) и дифузног сунчевог зрачења за 31. август 2016. ....	212
<b>Слика 7.21.</b> Зависност глобалног сунчевог зрачења и температуре пријемника (апсорбера) у функцији времена 31. август 2016. ....	213
<b>Слика 7.22.</b> Зависност средње температуре флуида као и температуре апсорбера у функцији времена за 31. август 2016.....	213
<b>Слика 7.23.</b> Поређење излазне температуре флуида експерименталног и нумеричког модела .....	213



<b>Слика 7.24.</b> Поређење топлотне ефикасности експерименталног и нумеричког модела у функцији времена за 31. август 2016.....	214
<b>Слика 7.25.</b> Ексергетски степен корисности соларног параболичног концентришућег система за 31. август 2016 .....	215
<b>Слика 7.26.</b> Експериментална и теоријска топлотна снага параболичног концентришућег пријемника система за 31. август 2016. ....	216
<b>Слика 7.27.</b> Крива тренутне топлотне ефикасности експерименталног модела за 31. август 2016. ....	217
<b>Слика 7.28.</b> Крива тренутне топлотне ефикасности нумеричког модела за 31. август 2016.....	217
<b>Слика 7.29.</b> Мерење глобалног (укупног) и дифузног сунчевог зрачења 3. септембар 2016.....	218
<b>Слика 7.30.</b> Зависност средње температуре флуида као и температуре апсорбера у функцији времена за 3. септембар 2016. ....	218
<b>Слика 7.31.</b> Поређење излазне температуре флуида експерименталног и нумеричког модела .....	218
<b>Слика 7.32.</b> Поређење топлотне ефикасности експерименталног и нумеричког модела у функцији времена за 3. септембар 2016. ....	219
<b>Слика 7.33.</b> Ексергетски степен корисности соларног параболичног концентришућег система за 3. септембар 2016.....	219
<b>Слика 7.34.</b> Експериментална и теоријска топлотна снага параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења за 3. септембар 2016. ....	219
<b>Слика 7.35.</b> Крива тренутне топлотне ефикасности експерименталног модела за 3. септембар 2016.....	220
<b>Слика 7.36.</b> Крива тренутне топлотне ефикасности нумеричког модела параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења .....	220
<b>Слика 7.37.</b> Средња температура апсорбера, температура флуида и конвективног коеф. прелаза топлоте применом нумеричког модела за испитивани дан.....	222
<b>Слика 7.38.</b> Топлотни губици параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења .....	222
<b>Слика 7.39.</b> Производња топлотне енергије параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења за различите радне услове.....	225
<b>Слика 7.40.</b> Прост "payback" период соларног концентришућег пријемника сунчевог зрачења за различите комбинације цене грејања и годишњег потенцијала сунчевог зрачења .....	225

## Списак табела

<b>Табела 2.1.</b> Преглед комерцијалних соларних параболичних стирлинг система.....	16
<b>Табела 2.2.</b> Преглед параболичних концентратора у Европи и свету .....	16
<b>Табела 2.3.</b> К-ке параболичних концентратора са стакленим сегментима.....	18
<b>Табела 3.1.</b> Пријемници сунчевог зрачења[59] .....	54
<b>Табела 3.2.</b> Максималне температуре код различитих конструкција концентришућих пријемника сунчевог зрачења [59].....	60
<b>Табела 3.3.</b> Коефицијент рефлективности материјала за израду соларних рефлектора [59] .....	61
<b>Табела 4.1.</b> Преглед главних к-ка најчешће коришћених оптичких софтверских алата.....	71
<b>Табела 4.2.</b> Преглед к-ка анализираних типова параболичних концентришућих пријемника сунчевог зрачења.....	81
<b>Табела 4.3.</b> Резултати нумеричке симулације .....	85
<b>Табела 5.1.</b> Главни геометријски и оптички параметри параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења .....	103
<b>Табела 5.2.</b> Геометријски параметри спиралног набораног топлотног апсорбера.....	107
<b>Табела 5.3.</b> Мерење коефицијента рефлексије огледала параболичног концентратора .....	115
<b>Табела 5.4.</b> Геометријски параметри глатке Архимедове спирале апсорбера.....	123
<b>Табела 5.5.</b> Укупна апсорбована снага на површини спиралног апсорбера у ф-ји оптичких грешака .....	129
<b>Табела 5.6.</b> Резултати нумеричке симулације за равни кружни и спирални наборани топлотни апсорбер .....	133
<b>Табела 6.1.</b> Анализа сила и момената на систему за позиционирање (Solartechno - Италија .....	150
<b>Табела 6.2.</b> Анализа сила и момената на систему за позиционирање (TGB Group - Шпанија) .....	152
<b>Табела 6.3.</b> Кореспонденција појмова из термодинамике и комбинаторне оптимизације .....	167
<b>Табела 7.1.</b> Карактеристике ултразвучног мерача запреминског протока Kamstrup Multical 66CDE, тип 66C02F1124 .....	201
<b>Табела 7.2.</b> Поређење експерименталних и нумеричких резултата (3 септембар, 2016) .....	221



<b>Табела П1.1</b> Вредности специфичног флуksа концентрисаног апсорбованог зрачења појединих навојака спиралног глатког топлотног апсорбера. $d_i = 11.7 \text{ mm}, d_0 = 12.2 \text{ mm}$ .....	240
<b>Табела П1.2</b> Вредности специфичног флуksа концентрисаног апсорбованог зрачења појединих навојака спиралног глатког топлотног апсорбера: $d_i = 14 \text{ mm}, d_0 = 15 \text{ mm}$ .....	241
<b>Табела П1.3</b> Вредности специфичног флуksа концентрисаног апсорбованог зрачења појединих навојака спиралног глатког топлотног апсорбера: $d_0 = 12.2 \text{ mm}, d_i = 9.3 \text{ mm}$ . Напомена: 1- навојак на периферији; 13- ти навојак у средишту апсорбера.....	242
<b>Табела П2.1</b> Вредности специфичног флуksа концентрисаног апсорбованог зрачења појединих исечака спиралног попречно набораног топлотног апсорбера: $d_i = 12.2 \text{ mm}, d_0 = 9.3 \text{ mm}$ (укупан број исечака је 130) .....	251



## БИОГРАФИЈА АУТОРА



### О АУТОРУ

Саша Павловић је рођен 20.08.1983. године у Прокупљу. Основну школу завршио је у Житорађи. Средњу школу је завршио у Нишу. Машински факултет у Нишу је уписао школске 2002. године. Основне петогодишње студије је завршио 2007. године на катедри за Термотехнику, термоенергетику и процесну технику са просечном оценом 9.39. Докторске академске студије је уписао 2008. године на Машинском факултету Универзитета у Нишу на катедри за Термотехнику, термоенергетику и процесну технику. Од 2011. год. је запослен као истраживач сарадник на Машинском факултету у Нишу. Саша Павловић је истраживач сарадник на пројекту "Истраживање и развој енергетски и еколошки високоефективних система полигенерације заснованих на обновљивим изворима енергије, Ш 42006", (2011-2015), пројекат финансиран од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије. Учествовао је као сарадник на пројекту Центра за промоцију науке Републике Србије под називом "Полигенерација - фактор одрживог развоја", Пројекат подстицања активности научних и стручних друштава које су у функцији унапређења научно-истраживачког рада, промоције и популаризације науке и технике, Аутор је и коаутор више од 70 научних радова публикованих на домаћим и међународним научним конференцијама, има 7 радова са СЦИ листе, 20 радова у домаћим часописима, 3 техничка решења као и велики број студија, експертиза итд. Највећи део радова је из области соларне енергетике, соларне оптике, примене концентришућих пријемника сунчевог зрачења у системима полигенерације, преноса топлоте и масе, оптичког моделирања соларних концентришућих система, итд.

## ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

### ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

Презиме, име једног родитеља и име	Павловић Радосава Саша	<b>МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ У НИШУ</b> Прихваћено: 28.11.2016. Орг.јед. Број Факултет Вредности 012-085/16
Датум и место рођења	20.08.1983., Прокупље, Србија	
<b>Основне студије</b>		
Универзитет	Универзитет у Нишу	
Факултет	Машински факултет	
Студијски програм	Енергетика	
Звање	Машински инжењер	
Година уписа	2002	
Година завршетка	2007	
Просечна оцена	9.39	

### Мастер студије, магистарске студије

Универзитет	Универзитет у Нишу
Факултет	Машински факултет
Студијски програм	Енергетика
Звање	Дипломирани инжењер машинства
Година уписа	2002
Година завршетка	2007
Просечна оцена	9.39
Научна област	Машинско инжењерство Ужа научна област: Термотехника, термоенергетика и процесна техника
Наслов завршног рада	Систем аутоматске регулације грејања, хлађења и припреме санитарне топле воде породичног стамбеног објекта

### Докторске студије

Универзитет	Универзитет у Нишу
Факултет	Машински факултет
Студијски програм	Енергетика и процесна техника
Година уписа	2007
Остварен број ЕСПБ бодова	120
Просечна оцена	10.00

### НАСЛОВ ТЕМЕ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Наслов теме докторске дисертације	Истраживање оптималних параметара соларних параболичних концентришућих пријемника топлоте са аспекта примене у системима полигенерације
Име и презиме ментора, звање	др Велимир Стефановић, редовни професор
Број и датум добијања сагласности за тему докторске дисертације	8/20-01-009/13-013 у Нишу, 18.12.2013. године

### ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Број страна	267
Број поглавља	8
Број слика (шема, графика)	175
Број табела	24
Број прилога	4

**ПРИКАЗ НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КАНДИДАТА  
који садрже резултате истраживања у оквиру докторске дисертације**

Р. бр.	Аутор-и, наслов, часопис, година, број волумена, странице	Категорија
1	<p>Pavlović, S., Bellos, E., Stefanović, V., Tzivanidis, C., Stamenković, Z., Design, Simulation and Optimization of a Solar Dish Collector With Spiral-Coil Thermal Absorber, <i>Thermal Science</i>, 2016, Thermal Science, Vol.20.,No. 4. pp. 1387-1397.</p> <p>У раду је представљен физички, математички и нумерички модел параболичног концентратора сунчевог зрачења са спиралним глатким топлотним апсорбером. У раду је дат потпуно нов оптички модел концентратора сунчевог зрачења који се заснива на Monte Carlo прорачуну хода зрака. Спирални цевни апсорбер у облику Архимедове спирале изложен је концентрисаном сунчевом зрачењу и представља топлотни апсорбер параболичног концентратора сунчевог зрачења. Нумеричким методама разматрана је и анализирана расподела специфичног флукса апсорбованог зрачења произведеног од стране параболичног вишесегментног рефлектора одређене геометрије. Геометријски модел соларног параболичног концентратора је развијен са аспекта истраживања оптималног растојања између рефлектора и апсорбера. Спроведена оптичка анализа показује да је оптимално растојање апсорбера 2.1 m од темена параболичног рефлектора. Параболични концентришући систем има максималну оптичку ефикасност и униформну расподелу упадног рефлектованог флукса концентрисаног зрачења.</p>	M22
2	<p>Pavlović, S., Stefanović, V., Suljković, S., Optical Modeling of a Solar Dish Thermal Concentrator Based on Square Flat Facets, <i>Thermal Science</i>, 2014, Vol. 18, No. 3, pp. 989-998.</p> <p>Нумеричким путем је решаван математички модел вишесегментног концентратора чија је површина апертуре параболичног облика пречника 2500 mm и жижишне даљине 1500 mm. Димензије квадратних сегмената су 100×100 mm. Распоред сегмената истих димензија на унапред дефинисаној површини апертуре концентратора омогућен је применом Mesh-a - Autodesk Inventor софтверског пакета. Идеја приликом развоја овог модела јесте да се на одговарајућој параболичној основи постави одређени број равних сегмената истог облика и димензија. Овакав тип конструктивног решења је повољан са становишта прикупљања и концентрације сунчевог зрачења на површину топлотног апсорбера. Применом оптичке методе прорачуна хода зрака истраживан је облик и величина равних рефлектујућих сегмената као и начин њиховог постављања. Применом оптичке методе прорачуна хода зрака истраживан је облик и величина равних рефлектујућих сегмената као и начин њиховог постављања.</p>	M23
3	<p>Pavlović, S., Vasiljević, D., Stefanović, V., Petrović, E., Optical Design of a Solar Parabolic Concentrating Collector Based on Trapezoidal Reflective Petals, <i>Journal of Energy and Power Engineering</i>, Volume 9, Number 8, August 2015, ISSN1934-8983. pp. 714-720.</p> <p>У овом раду је дато детаљно оптичко моделирање соларног параболичног концентратора сунчевог зрачења састављеног од трапезоидних високорефлектујућих сегмената- латица. Представљен је параболоидни концентратор пречника 2800 mm и жижишне даљине 1400 mm. Геометријски модел се састоји од 12 идентичних рефлектујућих сегмената - Полиметилметакрилат са слојем сребра. У оквиру моделирања оптичких параметара коришћен је комерцијални софтверски пакет TracePro. Применом нумеричке симулације несеквенцијалном методом хода зрака предвиђена је расподела флукса апсорбованог зрачења на периферију кружног апсорбера и центру апсорбера. Приказани оптички модел параболичног концентратора сунчевог зрачења је добра основа за каснију оптимизацију геометријских и оптичких параметара соларног концентришућег система.</p>	M23
4	<p>Pavlović, S., Stefanović, V., Ray Tracing Study of Optical Characteristics of the Solar Image in the Receiver for a Thermal Solar Parabolic Dish Collector, <i>Journal of Solar Energy</i>, Article ID 326536, Vol. 6, 2015. Hindawi. pp. 1-11.</p> <p>У раду је представљено истраживање оптичких карактеристика у жижи топлотног апсорбера концентрисаног сунчевог зрачења добијеног помоћу параболичног концентратора сунчевог зрачења. Представљена је слика дистрибуције флукса апсорбованог зрачења применом методе хода зрака. Геометријски модел соларног параболичног концентратора је пречника 3800 mm и жижишне даљине 2260 mm. Параболични концентратор је моделиран применом једначине параболоида у софтверу Mathematica, где је касније параметарски аналитички модел импортован у 3D CAD геометријски модел. Топлотни апсорбер је наборана спирална цев синусоидног облика профила набора. Спирални наборани топлотни апсорбер састоји се од 13 навојака при чему сваки навојак апсорбује одређену количину сунчевог зрачења. На основу Monte Carlo методе прорачуна хода зрака урађена је предикција укупног флукса апсорбованог зрачења, специфичног флукса као и фактора прихватања рефлектованог зрачења.</p>	M23
5	<p>Pavlović, S., Vasiljević, D., Stefanović, V., Stamenković, Z., Ayed, S., Optical Model and Numerical Simulation of the New Offset Type Parabolic Concentrator With Two Types of Solar Receivers” FACTA UNIVERSITATIS, Series: Mechanical Engineering, Vol.13, No 2, 2015, pp. 169-180.UDC535.2</p> <p>У раду је дато идејно решење offset параболичног концентришућег пријемника за средњетемпературну конверзију сунчевог зрачења са равним кружним и спирално набораним топлотним апсорбером. Поред овога дати су резултати нумеричког прорачуна оптичких перформанси соларног offset пријемника са сукцесивно коришћена два различита типа топлотног апсорбера. Такође је развијен математички и нумерички модел за прорачун расподел флукса концентрисаног сунчевог зрачења. Приказана је упоредна оптичка анализа која показује предности и недостатке једног и другог типа апсорбера као и расподелу флукса зрачења, оптичке губитке и топлотне губитке у самом кавитету. У раду дата је расподела просечног флукса апсорбованог зрачења, укупне снаге зрачења као и оптичког концентрационог односа на површини оба типа апсорбера. У закључку је истакнуто да боље перформансе има концентришући пријемник сунчевог зрачења са равним апсорбером. У насатавку су дати резултати упоредне анализе резултатта испитивања перформанси концентришућег пријемника сунчевог зрачења са два различита типа апсорбера.</p>	M24

	Pavlović, S., Vasiljević, D., Stefanović, V., Đorđević, M., Mančić, M., Ray Tracing Study to Determine Optical Performance of Dish Solar Thermal Concentrator, <i>Proceedings of the 17<sup>th</sup> Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia</i> , Sokobanja, Serbia, October 20–23, 2015, ISBN 978-86-6055-076-9, pp. 364-373.	
6	У раду су дати резултати нумеричког одређивања пречника апсорбера и жижне даљине концентришућег параболочног пријемника сунчевог зрачења. На основу измерених вредности интензитета сунчевог зрачења које доспева на параболични концентратор извршена је нумеричка анализа флукса концентрисаног сунчевог зрачења на површину равнoг кружног апсорбера. На основу експерименталних мерења и нумеричког израчунавања дошло се до закључка да за испитивани концентришући параболични пријемник сунчевог зрачења има оптималне перформансе када је пречник апсорбера 400 mm и жижна даљина 2075 mm.	M33
7	Pavlović, S., Stefanović, V., Mijajlović, M., Suljković, S., Ilić, M.: Review of Software for Simulation and Optimization of Concentrating Solar Collectors, 29 <sup>th</sup> International Conference, "ENERGY 2013", ISBN 3554-8651, Zlatibor, 26-29 March, 2013, pp. 121-131 У овом раду је дат преглед софтвера који се могу користити за анализу различитих технологија које су базиране на концентришућим пријемницима сунчевог зрачења, који укључују соларне торњеве, линеарне концентришуће системе (параболочно – коритасте системи) затим параболочно - тањирасте пријемнике у спрези са Стирлинговим мотором итд. У овом раду су коришћени следећи симулациони и оптимизациони софтвери су: Circe, SolTrace, TracePro, Tonatiuh, Helios, Trnsys, Delsol, Mirval, Solergy, OptiCAD, OptisWorks, Asap итд. На крају рада дат је опис Monte Carlo методе за оптимизацију геометријских параметара концентришућих параболичних пријемника сунчевог зрачења применом.	M33
8	Pavlović, S., Stefanović, V., Stamenković, Z., The Effect of Optical Errors on the Absorbed Flux of a Paraboloidal Solar Dish Mounted Spiral Heat Absorber, 1 <sup>st</sup> Virtual International Conference on Science, Technology and Management in Energy, Proceedings, Serbia, Nis, 02-03 July, 2015, ISBN 978-86-80593-54-8, pp. 18-23. У раду су дати резултати испитивања утицаја оптичких грешака површине параболочног концентратора сунчевог зрачења на енергетску ефикасност концентришућег пријемника сунчевог зрачења са спиралним топлотним апсорбером. У раду је за предикцију дистрибуције флукса рефлектованог сунчевог зрачења и формирање математичког и нумеричког модела коришћен комерцијални Soltrace софтвер. У раду су дати резултати оригиналног математичког модела за испитивање оптичких грешака површине параболочног концентратора сунчевог зрачења. У даљем су дати резултати нумеричког израчунавања грешака које потичу од оптичких грешака параболочног концентратора сунчевог зрачења при његовим нагибима од 5,20,35 и 50 grad. На основу нумеричких израчунавања дошло се до закључка да се максималне вредности флукса апсорбованог зрачења на површини спиралног топлотног апсорбера на растојању између 2.26 m и 2.3 m крећу у границама између $80 \times 10^3$ и $5 \times 10^6$ W/m <sup>2</sup> .	M33

**НАПОМЕНА:** уколико је кандидат објавио више од 3 рада, додати нове редове у овај део документа

### ИСПУЊЕНОСТ УСЛОВА ЗА ОДБРАНУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Кандидат испуњава услове за оцену и одбрану докторске дисертације који су предвиђени Законом о високом образовању, Статутом Универзитета и Статутом Факултета.

ДА

Саша Павловић поднео је 18.06.2013. године Одсеку за наставна и студентска питања Машинског факултета у Нишу захтев (број 612-468/2013) за одобрење теме докторске дисертације под радним насловом "Истраживање оптималних параметара соларних параболичних концентришућих пријемника топлоте са аспекта примене у системима полигенерације".

Наставно-научно веће Машинског факултета у Нишу је на седници одржаној 01.07.2013. године одлуком број 612-484-5/2013 предложило Комисију за оцену научне заснованости наведене теме у саставу: др Велимир Стефановић, редовни професор Машинског факултета у Нишу, др Милорад Бојић, редовни професор Факултета инжењерских наука у Крагујевцу, др Томислав Павловић, редовни професор Природно-математичког факултета у Нишу, др Марко Серафимов, редовни професор у пензији, Универзитета "Свети Кирил и Методиј" Машинског факултета у Скопљу и др Градимир Илић, редовни професор Машинског факултета у Нишу

Научно-стручно веће за техничко-технолошке науке Универзитета у Нишу је на седници одржаној 18.12.2013. године одлуком (Одлука број 8/20-01-009/13-013) именовало Комисију за оцену научне заснованости докторске дисертације Саше Павловића у саставу: др Велимир Стефановић, редовни професор Машинског факултета у Нишу, др Милорад Бојић, редовни професор Факултета инжењерских наука у Крагујевцу, др Томислав Павловић, редовни професор Природно-математичког факултета у Нишу, др Марко Серафимов, редовни професор у пензији, Универзитета "Свети Кирил и Методиј" Машинског факултета у Скопљу и др Градимир Илић, редовни професор Машинског факултета у Нишу.

Наставно-научно веће Машинског факултета у Нишу је на седници одржаној 04.10.2013. године, на основу Извештаја (број 612-645-6/2013) Комисије о заснованости теме докторске дисертације

под насловом "Истраживање оптималних параметара соларних параболичних концентришућих пријемника топлоте са аспекта примене у системима полигенерације" одлуком број 612-645-6/2013 усвојило наведену тему докторске дисертације и предложило др Велимира Стефановића, редовног професора Машинског факултета у Нишу, за ментора.

Саша Павловић је положио све испите предвиђене наставним планом и програмом, објавио 8 научних радова и поднео радну верзију докторске дисертације одговарајуће садржине, обима и квалитета, у складу са одобреном темом докторске дисертације.

Саша Павловић је 19.09.2016. године поднео захтев (број 612-563/2016) Одсеку за наставна и студентска питања Машинског факултета у Нишу за одређивање Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације.

Наставно-научно веће Машинског факултета у Нишу је на седници одржаној 10.10.2016. године одлуком број 612-613-5/2016 именовало Комисију за оцену и одбрану докторске дисертације на Машинском факултету у Нишу Саше Павловића, под називом: "Истраживање оптималних параметара соларних параболичних концентришућих пријемника топлоте са аспекта примене у системима полигенерације" у саставу: др Велимир Стефановић, редовни професор Машинског факултета у Нишу, др Небојша Лукић, редовни професор Факултета инжењерских наука у Крагујевцу, др Томислав Павловић, редовни професор Природно-математичког факултета у Нишу у пензији, др Градимир Илић, редовни професор Машинског факултета у Нишу у пензији, др Новак Николић, доцент Факултета инжењерских наука у Крагујевцу.

Саша Павловић је првопотписани аутор четири рада објављених у часописима са SCI листе из уже области којој припада тема докторске дисертације, као и првопотписани аутор једног рада прихваћеног за објављивање у часопису који издаје Универзитет у Нишу из уже научне области којој припада тема докторске дисертације.

На основу свега наведеног, Саша Павловић испуњава све услове за оцену и одбрану докторске дисертације предвиђене Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Нишу и Статутом Машинског факултета у Нишу.

## **ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### **Кратак опис појединих делова дисертације**

Докторска дисертација има 267 стране, 175 слика, 24 табела, 96 референци и 4 прилога:.

Докторска дисертација се састоји из 8 поглавља и то:

1. Уводна разматрања
2. Преглед стања и идентификација подручја истраживања
3. Подела пријемника према геометрији и карактеристикама
4. Упоредна оптичка анализа различитих типова параболичних концентришућих пријемника сунчевог зрачења
5. Постављање физичког, математичког и нумеричког модела параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења
6. Компјутерске симулације и оптимизација параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења
7. Експериментално истраживање
8. Закључна разматрања и смернице за будућа истраживања

У *Првом поглављу* су дате основне информације о сунцу и његовом зрачењу и концентришућим параболичним пријемницима сунчевог зрачења. Такође су дате основне информације о примени параболичних пријемника сунчевог зрачења у системима полигенерације. У овом поглављу су дефинисани циљеви израде докторске дисертације.

У *Другом поглављу* су дате теоријске основе и детаљан преглед референтних актуелних истраживања из области развоја, анализе, оптимизације и експерименталних истраживања геометријских, термичких и оптичких параметара концентришућих параболичних пријемника сунчевог зрачења. Поред овога дат је и преглед релевантних референци из литературе које се односе на докторску дисертацију. На крају су дате информације о неким развојним техничким решењима соларних концентришућих система и начина њиховог пројектовања, анализе, оптимизацији и експерименталној валидацији резултата истраживања.

У *Трећем поглављу* је дат детаљан опис различитих геометријских конструктивних решења соларних концентришућих система који се користе у свету. У вези са тим извршена је подела концентришућих пријемника сунчевог зрачења према карактеристикама и типу коришћених радних

флуида, опсегу температура, оптималном концентрационом односу, итд. Поред тога дате су и основне информације о концентраторима сунчевог зрачења код већег броја геометријских различитих рефлексионих површина, као и начин апсорбовања сунчевог зрачења код појединих апсорбера.

У четвртој поглављу дат је преглед софтверских пакета који се најчешће користе за моделирање, симулацију и оптимизацију концентришућих соларних система. У овом поглављу су дати резултати тестирања неколико софтверских алата у симулирању и оптимизацији оптичких и геометријских параметара различитих типова геометријских решења параболичних концентришућих пријемника сунчевог зрачења. У докторској дисертацији је коришћен *TracePro* софтвер за израчунавање расејања сунчевог зрачења код концентришућег параболичног пријемника сунчевог зрачења. Приказано је неколико модела расејања зрачења у оквиру изабраног софтверског алата *TracePro*. Дати су резултати израчунавања хода зрака код параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења помоћу 8 оптичких модела применом Monte Carlo методе хода зрака и резултати нумеричких симулација моделираних параболичних концентришућих пријемника сунчевог зрачења. На крају овог поглавља су дати резултати нумеричких симулација моделираних параболичних концентришућих пријемника.

У петом поглављу је приказан развој физичког, математичког и нумеричког модела соларног параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења у циљу оптимизације флукса рефлектованог зрачења у области топлотног апсорбера. У првом делу петог поглавља дати су резултати развоја параметарског модела вишесегментног параболичног концентратора сунчевог зрачења. Такође је приказан и математички модел закривљења сегмената параболичног концентратора сунчевог зрачења. У другом делу приказан је развој параметарског 3D модела спирално попречног набораног апсорбера. Затим је креиран и реализован 3D оптички модел склопа соларни параболични концентратор - топлотни апсорбер. Оптички модел показује расподелу флукса апсорбованог зрачења на површини набораног топлотног апсорбера. Спроведена је и упоредна оптичка анализа примене спиралног и глатког апсорбера концентрисаног зрачења, и утицај површинских оптичких, грешака праћења и грешака спекуларне рефлексије на расподелу флукса апсорбованог зрачења у спиралном апсорберу у конусно-цилиндричном кавитету. У трећем делу представљен је термички модел соларног концентришућег пријемника сунчевог зрачења и процедура за нумеричко решавање термичког модела параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења. Такође је приказано и нумеричко истраживање различитих радних флуида на ефикасност параболичног концентришућег система.

У шестом поглављу дати су резултати компјутерске симулације и оптимизације соларног параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења. У овом делу су дати резултати нумеричког израчунавања напона и деформација структуре концентришућег пријемника сунчевог зрачења. На основу овога извршено је димензионисање електро-механичког система за двоосно позиционирање праћења трајекторије Сунца. Поред овога дати су резултати испитивања утицаја засенчења на апертуре параболичног вишесегментног рефлектора. У другом делу описане су савремене методе оптимизације, класичне и метахеуристичке методе. Спроведена је и оптимизација прототипа вишесегментног параболичног рефлектора и оптимизација облика и димензија соларног топлотног апсорбера. Развијен је 3D оптимизован модел соларног апсорбера са глатким цевима чији су облик и димензије оптимизовани са аспекта униформне расподеле флукса апсорбованог зрачења и максималне оптичке ефикасности концентришућег система.

У седмом поглављу је дата анализа експерименталних резултата и њихова дискусија. У овом поглављу приказан је експериментални систем концентришућег пријемника сунчевог зрачења са лабораторијском инсталацијом у оквиру Катедре за термотехнику, термоенергетику и процесну технику Машинског факултета у Нишу. Дат је детаљан опис експерименталне апаратуре која се састоји од соларног параболичног концентратора и спиралног набораног топлотног апсорбера са пратећим хидрауличним и термотехничким системом. Дат је детаљан опис експерименталне апаратуре, експерименталних поступака и аквизиције мерних података. На крају седмог поглавља спроведена је упоредна анализа експерименталних и нумеричких резултата.

У осмом поглављу су дати закључци до којих је аутор дошао у току истраживања, смернице за даља истраживања, за побољшање концентришућег система, побољшање разматраног топлотног апсорбера уз одређени редизајн, као и предлог за развој нових конструкционих решења параболичног концентратора сунчевог зрачења и топлотног апсорбера уз смањење оптичких и термичких губитака.

## ВРЕДНОВАЊЕ РЕЗУЛТАТА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

### Ниво остваривања постављених циљева из пријаве докторске дисертације

Циљ докторске дисертације се састојао у експерименталном и нумеричком испитивању геометријских, оптичких и термичких параметара концентришућег пријемника сунчевог зрачења. У експерименталном делу је формиран параболични концентришући пријемник сунчевог зрачења са спиралним набораним топлотним апсорбером. На овом концентришућем параболичном пријемнику сунчевог зрачења су извршена следећа мерења: температура радног флуида на улазу и излазу из топлотног апсорбера, интензитет глобалног и дифузног сунчевог зрачења, температура на површини набораног апсорбера применом термопарова, запремински проток радног флуида, температура околине, брзина ветра, мерење температуре површине апсорбера применом термовизијске камере.

У теоријском делу извршена су нумеричка израчунавања: расподеле флукса сунчевог зрачења на површину апсорбера концентратора сунчевог зрачења, оптичке ефикасности концентришућег пријемника сунчевог зрачења, прорачун оптичких губитака параболичног концентратора сунчевог зрачења, утицај површинских грешака површине параболичног концентратора сунчевог зрачења на униформност расподеле флукса апсорбованог сунчевог зрачења, утицај површинских грешака нагиба површине параболичног концентратора сунчевог зрачења на оптичку ефикасност параболичног концентратора сунчевог зрачења, прорачун напонских и деформационих стања структуре параболичног концентратора сунчевог зрачења.

Саша Павловић је у потпуности реализовао све појединачне циљеве експерименталног и нумеричког истраживања постављене пријавом теме. У наставку су дати резултати оптимизације вишесегментног параболичног рефлектора сунчевог зрачења са становишта добијања енергетски ефикасног концентришућег система. На основу резултата нумеричке оптимизације параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења, развијен је коначан 3D геометријски модел параболичног концентратора сунчевог зрачења. Такође је дат и термички модел параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења, нелинеарна динамичка анализа стабилности система на утицај сопствене тежине и оптерећења од динамичког притиска ветра. На основу термичког модела параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења добијени су следећи резултати: топлотна ефикасност концентришућег пријемника сунчевог зрачења, ексергетска ефикасност концентришућег пријемника сунчевог зрачења, пад притиска у апсорберу концентратора сунчевог зрачења, коефицијент прелаза топлоте у апсорберу концентратора сунчевог зрачења.

### Вредновање значаја и научног доприноса резултата дисертације

Поднета докторска дисертација представља оригиналан и вредан научни и стручни допринос кандидата.

Тема докторске дисертације је интересантна, због актуелности ефикаснијег коришћења сунчеве енергије, и могућности проширења употребе концентришућих пријемника сунчевог зрачења овакве конструкције, што представља оправдан разлог за додатна побољшања и истраживања у соларној концентришућој техници са аспекта примене у системима полигенерације. Научни допринос докторске дисертације се огледа у:

- дефинисању квалитетног физичког модела параболичног концентришућег пријемника сунчевог зрачења;
- постављању математичког и нумеричког модела који су верификовани упоређивањем са експериментално добијеним резултатима;
- дефинисању методологије испитивања енергетских карактеристика параболичних концентришућих пријемника сунчевог зрачења;
- дефинисању оптималних геометријских, оптичких и термичких параметара соларних параболичних концентришућих пријемника сунчевог зрачења за примену у системима полигенерације;
- развоју широко применљиве нумеричке методологије за детаљно симулирање оптичких и термичких параметара концентришућих пријемника сунчевог зрачења.

### Оцена самосталности научног рада кандидата

Саша Павловић је показао висок ниво самосталности, креативности и систематичности у истраживањима и испољио је способност анализе научних знања из задате области уз оригиналност у осмишљавању и креирању одређених научних и стручних решења. Поред овога показао је да има веома добар увид у литературу из области средњетемпературне конверзије сунчевог зрачења односно теме докторске дисертације. Такође је показао да има потребна мултидисциплинарна знања и способност њихове синтезе у изради дисертације. Познавање литературе и стечена знања из више области кандидат је искористио да на креативан начин осмисли, формулише и примени научни приступ процесу пројектовања, анализи, оптимизацији и тестирању соларног параболичног концентришућег система. Такође поседује и потребан ниво самосталности у реализацији експерименталних истраживања.

## ЗАКЉУЧАК

На основу прегледа поднете докторске дисертације и увидом у публиковане научне радове кандидата, чланови Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације су закључили да:

- Докторска дисертација и публиковани радови представљају значајне научне доприносе у области средњетемпературне конверзије сунчевог зрачења;
- Поднети рад у потпуности одговара теми докторске дисертације прихваћеној од стране Наставно - научног већа Машинског факултета у Нишу и Научно-стручног већа за техничко - технолошке науке Универзитета у Нишу;
- Докторска дисертација и објављени научни радови представљају значајан научни допринос у области соларне енергетике;
- Докторска дисертација је адекватно конципирана и технички квалитетно урађена;
- Кандидат је показао висок ниво самосталности и систематичности у бављењу научно-истраживачким радом, као и креативан приступ формулацији и решавању разматраних проблема;
- Кандидат је приказао потребну самосталност и иницијативност у научно-истраживачком раду и дошао до оригиналних резултата;
- Добијени научни резултати су конкретни и апликативни и омогућавају истраживање, моделирање и развој параболичних концентришућих пријемника сунчевог зрачења високе ефикасности и ефективности.
- Докторска дисертација је од великог научног и практичног значаја.

На основу претходног, Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације сматра да поднета докторска дисертација представља оригиналан и вредан научни допринос развоју соларне енергетике и са задовољством предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета Универзитета у Нишу и Наставно-стручном већу за техничко - технолошке науке Универзитета у Нишу да докторску дисертацију Саше Павловића, дипл. маш. инжењера под називом:

### **“ИСТРАЖИВАЊЕ ОПТИМАЛНИХ ПАРАМЕТАРА СОЛАРНИХ ПАРАБОЛИЧНИХ КОНЦЕНТРИШУЋИХ ПРИЈЕМНИКА ТОПЛОТЕ СА АСПЕКТА ПРИМЕНЕ У СИСТЕМИМА ПОЛИГЕНЕРАЦИЈЕ“**

прихвати и одобри њену одбрану.



## КОМИСИЈА

Број одлуке ННВ о именовану Комисије

612-613-5/2016

Датум именовања Комисије

10.10.2016.године

Р. бр.	Име и презиме, звање		Потпис
1.	Др Велимир Стефановић, редовни професор Термотехника, термоенергетика и процесна техника (Научна област)	Универзитет у Нишу, Машински факултет у Нишу (Установа у којој је запослен)	
		председник, ментор	
2.	Др Небојша Лукић, редовни професор Термодинамика и термотехника (Научна област)	Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука (Установа у којој је запослен)	
		члан	
3.	Др Томислав Павловић, редовни професор у пензији Експериментална физика (Научна област)	Универзитет у Нишу, Природно математички факултет (Установа у којој је запослен)	Томислав П. Павловић
		члан	
4.	Др Градимир Илић, редовни професор у пензији Термотехника, термоенергетика и процесна техника (Научна област)	Универзитет у Нишу, Машински факултет у Нишу (Установа у којој је запослен)	
		члан	
5.	Др Новак Николић, доцент Термодинамика и термотехника (Научна област)	Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука (Установа у којој је запослен)	Новак Николић
		члан	

Датум и место:

Новембар 2016. год.,

У Нишу и Крагујевцу



Универзитет у Нишу

Изјава 1.

## ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом

**Истраживање оптималних параметара соларних параболних  
концентришућих пријемника топлоте са аспекта примене у системима  
полигенерације**

која је одбрањена на Машинском факултету Универзитета у Нишу:

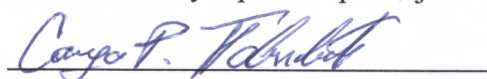
- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао/ла надругим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио/ла ауторска права, нити злоупотребио/ла интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и месторођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, \_\_\_\_\_

Аутор дисертације: Саша Р. Павловић

Потпис аутора дисертације:





Универзитет у Нишу

---

Изјава 2.

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНОГ И ЕЛЕКТРОНСКОГ ОБЛИКА  
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Име и презиме аутора: Саша Павловић

Наслов дисертације: Истраживање оптималних параметара соларних параболичних  
концентришућих пријемника топлоте са аспекта примене у системима полигенерације

Ментор: др Велимир Стефановић, ред. проф.

Изјављујем да је штампани облик моје докторске дисертације истоветан електронском облику, који сам предао/ла за уношење у **Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу**.

У Нишу, \_\_\_\_\_

Потпис аутора дисертације:

*Саша П. Павловић*



Универзитет у Нишу

Изјава3:

### ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да, у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

**Истраживање оптималних параметара соларних параболичних концентришућих пријемника топлоте са аспекта примене у системима полигенерације**

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство — некомерцијално (CC BY-NC)
3. **Ауторство — некомерцијално — без прераде (CC BY-NC-ND)**
4. Ауторство — некомерцијално — делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство — без прераде (CC BY-ND)
6. Ауторство — делити под истим условима (CC BY-SA)

У Нишу, \_\_\_\_\_

Аутор дисертације: Саша Павловић

Потпис аутора дисертације: