



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА
УНИВЕРЗИТЕТА У КРАГУЈЕВЦУ

Александар М. Нешовић

**Експериментално и теоријско
истраживање соларног пријемника са
ротационим апсорберима**

Докторска дисертација

Крагујевац, 2023.



UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC
FACULTY OF ENGINEERING
UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC

Aleksandar M. Nešović

**Experimental and theoretical investigation
of the solar collector with rotating
absorbers**

Doctoral Dissertation

Kragujevac, 2023

Аутор
Име и презиме: Александар Нешовић
Датум и место рођења: 21. 8. 1991. год., Крагујевац
Садашње запослење: Истраживач-сарадник, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу
Докторска дисертација
Наслов: Експериментално и теоријско истраживање соларног пријемника са ротационим апсорберима
Број страница: 188
Број слика: 170
Број библиографских података: 223
Установа и место где је рад израђен: Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу, Крагујевац
Научна област (УДК): 523.9 (Сунце. Соларна физика)
Ментор: др Небојша Лукић, редовни професор, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу
Оцена и одбрана
Датум пријаве теме: 2. 2. 2022. год.
Број одлуке и датум прихватања теме докторске дисертације: IV-04-275/13, од 15. 6. 2022. год.
Комисија за оцену научне заснованости теме и испуњености услова кандидата
<ol style="list-style-type: none"> 1. Др Велимир Стефановић, редовни професор, Машински факултет, Универзитет у Нишу 2. Др Новак Николић, ванредни професор, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу 3. Др Небојша Лукић, редовни професор, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу
Комисија за оцену и одбрану докторске/уметничке дисертације
<ol style="list-style-type: none"> 1. Др Душан Гордић, редовни професор, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу 2. Др Велимир Стефановић, редовни професор, Машински факултет, Универзитет у Нишу 3. Др Новак Николић, ванредни професор, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу 4. Др Данијела Николић, ванредни професор, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу 5. Др Саша Павловић, доцент, Машински факултет, Универзитет у Нишу
Датум одбране дисертације:

*„Господе Исусе Христе,
Сине Божији,
помилуј мене грешнога“*

*Деди Момчилу и баби Миленки
Деди Драгомиру и баби Миланки*

*оцу Милану и мајци Биљани
сестри Тијани*

Захвалница

Ова докторска дисертација настала је као резултат рада на пројекту „Истраживање и развој српске нето-нулте енергетске куће“ (шифра: TP33015), финансијски подржаном од стране Министарства науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије, а под руководством, проф. др Милорада Бојића и проф. др Небојше Лукића.

Огромну захвалност, на несебичној подршци, стручној помоћи, конструктивним сугестијама, уложеном труду и времену, дугујем мом уваженом ментору, проф. др Небојши Лукићу.

Велику захвалност дугујем Миливоју Јекићу, проф. др Драгану Тарановићу и др Драгану Цветковићу. Током наше вишегодишње сарадње на великом броју успешно реализованих пројеката, у великој мери, унапред сам био припремљен за хватање у коштац са свим изазовима током трајања докторских академских студија.

Захваљујем се особама које су, свака на свој начин, учествовале у формирању математичког модела понашања соларног пријемника у теоријском делу докторске дисертације: проф. др Емилији Нешовић и Наташи Станкић.

Захваљујем се особама које су, свака на свој начин, учествовале у физичкој реализацији соларног пријемника у експерименталном делу докторске дисертације: Милораду Костићу, Саши Васиљевићу, Милинку Јеремићу, Владимиру Лојаници, Радиши Спасојевићу, Душану Ђаловићу, Томиславу Стаматовићу, доц. др Мини Васковић, Владимиру Јекићу, Оливери Миленковић, Томиславу Васиљевићу, Бранку Панићу, Стевану Црвару, Србољубу Арсенијевићу, Зорану Петровићу, Градимиру Илићу, Жики Гавриловићу, проф. др Светлани Лукић-Петровић, др Невени Ђелић, проф. др Ради Петровић, др Славици Лазаревић, доц. др Драгану Џунићу, проф. др Богдану Недићу, Слободану Тимотијевићу, Милану Петковићу и Душану Секулићу.

На високом нивоу колегијалности и сарадњи захваљујем се следећим особама: др Небојши Јуришевићу, доц. др Младену Јосијевићу, ванр. проф. др Новаку Николићу, Давору Јовановићу, Ивани Терзић, Јелени Николић, Живани Јовановић Пешић, Марији Савковић, Марку Делићу, проф. др Душану Гордићу, проф. др Вањи Шуштершич и др Марку Топаловићу.

На крају, највећу захвалност дугујем својој породици: оцу Милану Нешовићу, мајци Биљани Нешовић и сестри Тијани Нешовић. Без њихове љубави, подршке и ослоња, охрабривања, разумевања, стрпљења, трпљења, одрицања и жртвовања, ничега не би било. Успели смо!

У Крагујевцу, 14 . 08 . 2023. год.

Аутор

Александар М. Нешовић



Резиме

У овој докторској дисертацији представљен је нови соларни дизајн. У питању је соларни пријемник настао комбиновањем равних апсорберских плоча (карактеристичне за равне соларне пријемнике) и стаклених цеви (карактеристичне за вакуумске соларне пријемнике) са потпуно аутоматизованим (временски контролисаним) механизмом за релативно једноосно праћење кретања положаја Сунца у правцу исток-запад око нагнуте север-југ осе ротације (РтАСП).

РтАСП соларна конструкција је током четворомесечног периода (од 15. јула до 15. октобра 2021. год.) експериментално и теоријски истражена на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, уз истовремено поређење са класичним равним соларним пријемником (РСП). РСП била је додељена улога контролног уређаја. Оба соларна пријемника поседовала су у свом склопу исти тип апсорбера.

Резултати експерименталних истраживања показали су да РтАСП има већу просечну дневну специфичну топлотну снагу (8,07-22,59%) и термичку ефикасност (8,48-22,83%) од РСП. РтАСП и РСП теоријски модели, представљени у овој докторској дисертацији, показали су слагање са експерименталним мерењима. То значи да су просечне дневне апсолутне грешке експерименталних мерења биле мање од 10% у односу на просечне дневне теоријске вредности.

Упркос делимичном смањењу топлотне снаге и термичке ефикасности (због присуства ефекта соларног сенчења и улагања електричне енергије), нови соларни концепт позитивно доприноси развоју соларне технике. Главна предност РтАСП у односу на друге (концентришуће и покретне) соларне пријемнике огледа се у његовој компактности, јер не захтева коришћење додатних рефлектујућих и концентришућих елемената, нити фиксних, нити покретних.

Кључне речи: соларни пријемник, равна апсорберска плоча, стаклена цев, релативни једноосни механизам за праћење кретања положаја Сунца, топлотна снага, термичка ефикасност, теоријско истраживање, експериментално истраживање.

Abstract

In this doctoral dissertation, a new solar design is presented. The solar collector was created by combining flat absorber plates (characteristic of flat-plate solar collectors) and glass tubes (characteristic of evacuated tube solar collectors) with a fully automated (time-controlled) mechanism for relative single-axis Sun tracking in the East-West direction around an inclined North-South rotation axis (SATFA).

The SATFA solar construction was experimentally and theoretically investigated for four months (from July 15 to October 15, 2021) at the Faculty of Engineering, University of Kragujevac, with a simultaneous comparison with a classic flat-plate solar collector (FPSC). The FPSC was assigned the role of the control device. Both solar collectors had the same type of absorber.

The results of the experimental investigation showed that the SATFA has a higher average daily specific heat power (8.07-22.59%) and thermal efficiency (8.48-22.83%) than the FPSC. The SATFA theoretical model and the FPSC theoretical model, presented in this doctoral dissertation, showed agreement with experimental measurements. This means that the average daily absolute errors of the experimental measurements were less than 10% compared to the average daily theoretical values.

Despite the partial reduction of heat power and thermal efficiency (due to the presence of the solar shading effect and investment of electricity), the new solar concept contributes positively to the development of solar technology. The main advantage of the SATFA compared to other (concentrating and tracking) solar collectors is reflected in its compactness because it does not require the use of additional reflecting and concentrating elements, neither fixed nor tracking.

Keywords: solar collector, flat absorber plate, glass tube, relative single-axis Sun tracking mechanism, heat power, thermal efficiency, theoretical investigation, experimental investigation.

ПОГЛАВЉЕ

Садржај

САДРЖАЈ ИЛУСТРАЦИЈА	A-1
САДРЖАЈ ТАБЕЛА	B-1
САДРЖАЈ ОЗНАКА	B-1
I УВОД	1
1.1 Потрошња енергије и ОИЕ.....	1
1.2 Соларна енергија	2
1.3 Предмет и циљ докторске дисертације	3
1.4 Полазне хипотезе.....	4
1.5 Структура докторске дисертације	4
II КОНВЕНЦИОНАЛНИ СОЛАРНИ ПРИЈЕМНИЦИ	6
III ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ	14
IV НАУЧНИ ДОПРИНОС	17
4.1 Нови идејни концепт соларног пријемника.....	17
4.2 Модификована класификација соларних пријемника	20
V СОЛАРНИ ДИЗАЈН	22
5.1 Апсорберски дизајн.....	22
5.1.1 Опште напомене	22
5.1.2 Раван $Sn-Al_2O_3$ селективни апсорбер.....	24
5.2 Дизајн РСП.....	26
5.2.1 Опис РСП конструкције	26
5.2.2 РСП експериментална инсталација	27
5.3 Дизајн РтАСП.....	29

5.3.1	Опис РтАСП конструкције.....	29
5.3.2	Електро-механичка трансмисија.....	30
5.3.3	РтАСП експериментална инсталација.....	32
VI МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛИ РСП И РтАСП.....		34
6.1	Соларно зрачење.....	34
6.1.1	Екстратерестријално и терестријално соларно зрачење.....	34
6.1.2	Директно и дифузно соларно зрачење	35
6.1.3	Апсорбовано соларно зрачење.....	36
6.1.3.1	Апсорбовано соларно зрачење за РСП.....	36
6.1.3.2	Апсорбовано соларно зрачење за РтАСП.....	37
6.2	Соларна векторска алгебра и аналитичка геометрија.....	42
6.2.1	Соларни углови.....	42
6.2.2	Сферни координатни системи.....	46
6.2.3	Соларни упадни угао.....	50
6.2.3.1	Соларни упадни угао за фиксне равне соларне пријемнике	50
6.2.3.2	Соларни упадни угао за фиксне цевасте соларне пријемнике.....	52
6.2.3.3	Соларни упадни угао за покретне равне соларне пријемнике.....	54
6.3	Топлотни губици	56
6.3.1	Топлотни губици за РСП.....	56
6.3.2	Топлотни губици за РтАСП	59
6.4	Топлотна снага.....	64
6.4.1	Топлотна снага за РСП	64
6.4.2	Топлотна снага за РтАСП.....	66
6.5	Ефикасност.....	69
6.5.1	Оптичка ефикасност.....	69
6.5.1.1	Оптичка ефикасност за РСП	69
6.5.1.2	Оптичка ефикасност за РтАСП.....	72
6.5.2	Коефицијент соларног сенчења	75
6.5.3	Термичка ефикасност.....	79
6.5.3.1	Термичка ефикасност за РСП	79
6.5.3.2	Термичка ефикасност за РтАСП.....	80
VII РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА РСП И РтАСП		81
7.1	Теоријско истраживање РСП и РтАСП.....	81
7.1.1	Теоријска поставка.....	81
7.1.1.1	Соларни прорачунски алгоритам за РСП.....	81
7.1.1.2	Соларни прорачунски алгоритам за РтАСП.....	82
7.1.2	Тест модел.....	83
7.1.2.1	Временски фајлови.....	83
7.1.2.2	Соларна геометрија	85
7.1.2.3	Теоријски термички индикатори	86

7.1.3 Резултати теоријског истраживања	90
7.1.3.1 Теоријска специфична топлотна снага.....	90
7.1.3.2 Мапирање соларног сенчења	93
7.2 <i>EnergyPlus</i> истраживање РСП и РтАСП	95
7.2.1 <i>EnergyPlus</i> софтвер	95
7.2.2 <i>EnergyPlus</i> нумеричка поставка.....	96
7.2.2.1 <i>EnergyPlus</i> сценарио симулација	96
7.2.2.2 <i>EnergyPlus</i> модел термичког понашања соларног пријемника.....	98
7.2.2.3 <i>EnergyPlus</i> локацијски и климатски параметри	100
7.2.3 Резултати <i>EnergyPlus</i> истраживања.....	100
7.3 <i>Ansys Fluent</i> истраживање РСП и РтАСП	105
7.3.1 <i>Ansys Fluent</i> софтвер	105
7.3.1.1 Рачунарска динамика флуида	105
7.3.1.2 Нумерички алгоритам.....	106
7.3.2 <i>Ansys Fluent</i> нумеричка поставка.....	106
7.3.2.1 <i>Ansys Fluent</i> сценарио симулација.....	106
7.3.2.2 <i>Ansys Fluent</i> модел термичког понашања соларног пријемника	111
7.3.2.2.1 Метода коначних запремина	111
7.3.2.2.2 Модел дискретног преноса соларног зрачења.....	112
7.3.3 Резултати <i>Ansys Fluent</i> истраживања	113
7.4 <i>SLR</i> истраживање РСП и РтАСП	120
7.4.1 <i>SLR</i> метода	120
7.4.2 <i>SLR</i> нумеричка поставка.....	120
7.4.3 Резултати <i>SLR</i> истраживања.....	120
7.5 Експериментално истраживање РСП и РтАСП.....	124
7.5.1 Експериментална поставка.....	124
7.5.1.1 Мерни ланац	124
7.5.1.2 Услови истраживања.....	125
7.5.2 Метеоролошки подаци.....	126
7.5.3 Резултати експерименталног истраживања	129
7.5.3.1 Експериментална специфична топлотна снага.....	129
7.5.3.2 Експерименталне вредности карактеристичних температура.....	132
7.5.3.3 Експериментална термичка ефикасност	135
7.6 Верификација резултата и геометријско-термичка оптимизација РтАСП.....	138
VIII ЗАКЉУЧАК	146
IX ЛИТЕРАТУРА	149

ПОГЛАВЉЕ

А

Садржај илустрација

Слика 1.1 – Процентуални удео ОИЕ у потрошњи финалне енергије	1
Слика 1.2 – Годишња производња електричне енергије из соларних електрана на територији Републике Србије	2
Слика 2.1 – Активни соларни систем.....	6
Слика 2.2 – Пасивни соларни систем.....	6
Слика 2.3 – Соларни пријемник.....	7
Слика 2.4 – Фотонапонски пријемник	7
Слика 2.5 – Хибридни соларни пријемник.....	7
Слика 2.6 – Основна класификација СП.....	7
Слика 2.7 – Класификација концентришућих СП	8
Слика 2.8 – Класификација покретних СП.....	8
Слика 2.9 – СП са ЈОП у правцу И-З око хоризонталне С-Ј осе	8
Слика 2.10 – СП са ЈОП у правцу С-Ј око хоризонталне И-З осе	8
Слика 2.11 – СП са нагнутом С-Ј осом и ЈОП у правцу И-З око вертикалне осе	9
Слика 2.12 – СП са ЈОП у правцу И-З око нагнуте С-Ј осе	9
Слика 2.13 – „Традиционална“ класификација СП	9
Слика 2.14 – Раван СП.....	10
Слика 2.15 – Вакуумски СП.....	10
Слика 2.16 – Вишеделни параболични СП.....	11
Слика 2.17 – Класични параболични СП.....	11
Слика 2.18 – СП са линеарним Френеловим рефлекторима.....	12
Слика 2.19 – Цилиндрични СП.....	12

Слика 2.20 – Тањирасти СП.....	12
Слика 2.21 – СП са пољем хелиостата.....	13
Слика 2.22 – СП са кружним Френеловим сочивима.....	13
Слика 4.1 – Неконвенционални примери равних СП.....	17
Слика 4.2 – Неконвенционални примери вакуумских СП.....	18
Слика 4.3 – Изометријски приказ конструкције РтАСП.....	18
Слика 4.4 – Главне позиције РтА у конструкцији РтАСП.....	19
Слика 4.5 – Модификована класификација концентришућих СП.....	20
Слика 4.6 – Модификована класификација покретних СП.....	21
Слика 4.7 – СП са арДОП (аЈОП+рЈОП) механизмом.....	21
Слика 5.1 – Најчешће коришћени типови равних апсорбера.....	22
Слика 5.2 – Најчешће коришћене технологије спајања равне апсорберске плоче и проточног канала.....	23
Слика 5.3 – Изометријски приказ равне $Sn-Al_2O_3$ селективне апсорберске плоче.....	24
Слика 5.4 – Попречни пресек равне $Sn-Al_2O_3$ селективне апсорберске плоче.....	24
Слика 5.5 – Хемијски састав $Sn-Al_2O_3$ селективног премаза (увећање $\times 1000$).....	25
Слика 5.6 – Главне позиције РСП.....	26
Слика 5.7 – Изометријски приказ РСП (лево) и његове ортогоналне пројекције (десно).....	26
Слика 5.8 – Експериментална инсталација са РСП.....	27
Слика 5.9 – Изометријски приказ РтАСП (лево) и његове ортогоналне пројекције (десно).....	29
Слика 5.10 – Главне позиције РтА у конструкцији РтАСП.....	29
Слика 5.11 – Детал рЈОП механизма за РтАСП.....	31
Слика 5.12 – Електро шема рЈОП механизма за РтАСП.....	32
Слика 5.13 – Шема управљачког блока рЈОП механизма за РтАСП.....	32
Слика 5.14 – Експериментална инсталација са РтАСП.....	33
Слика 6.1 – Директно и дифузно соларно зрачење.....	36
Слика 6.2 – Укупна апсорбована количина соларне енергије за РСП.....	37
Слика 6.3 – Укупна апсорбована количина соларне енергије за РтАСП.....	38
Слика 6.4 – Период потпуне соларне осунчаности за РтАСП.....	40
Слика 6.5 – Период делимичне соларне осунчаности за РтАСП.....	40
Слика 6.6 – Период потпуне соларне осенчености за РтАСП.....	41
Слика 6.7 – Деклинација.....	42
Слика 6.8 – Географска ширина.....	42
Слика 6.9 – Часовни угао и географска дужина.....	42
Слика 6.10 – Угао висине Сунца.....	42
Слика 6.11 – Соларни азимутни угао.....	43

Слика 6.12 – Угао нагиба СП у правцу С-Ј	43
Слика 6.13 – Азимутни угао СП	43
Слика 6.14 – Угао нагиба СП у правцу И-З.....	43
Слика 6.15 – Промена деклинације током године	44
Слика 6.16 – Једначина времена	45
Слика 6.17 – Екваторски $Tabc$ сферни координатни систем, хоризонтски $Oxuz$ сферни координатни систем и вектор положаја Сунца у простору.....	46
Слика 6.18 – Разлагање вектора положаја Сунца у екваторском $Tabc$ сферном координатном систему.....	47
Слика 6.19 – Разлагање вектора положаја Сунца у хоризонтском $Oxuz$ сферном координатном систему.....	47
Слика 6.20 – Ротирање почетног јединичног вектора нормале око $-x$ осе у хоризонтском $Oxuz$ сферном координатном систему.....	48
Слика 6.21 – Ротирање јединичног вектора нормале око нове $-y'$ осе у хоризонтском $Oxuz'$ сферном координатном систему	48
Слика 6.22 – Ротирање јединичног вектора нормале око нове $-z''$ осе у хоризонтском $Ox'uz''$ сферном координатном систему.....	49
Слика 6.23 – Соларни упадни угао.....	50
Слика 6.24 – Ротирање вектора положаја Сунца око $-b$ осе у екваторском $Tabc$ сферном координатном систему.....	51
Слика 6.25 – Фиксни цеваст СП	52
Слика 6.26 – Уздужна и попречна раван	52
Слика 6.27 – Разлагање јединичног соларног вектора у уздужној и попречној равни	53
Слика 6.28 – Вектор нормале и пројекција јединичног соларног вектора у попречној равни.....	54
Слика 6.29 – Мрежа отпора пролазу топлотних губитака за РСП.....	57
Слика 6.30 – Мрежа отпора пролазу топлотних губитака кроз стакло за РСП	58
Слика 6.31 – Мрежа отпора пролазу топлотних губитака кроз рам за РСП	58
Слика 6.32 – Мрежа отпора пролазу топлотних губитака кроз изолациони слој за РСП	58
Слика 6.33 – Спољашње димензије РСП.....	59
Слика 6.34 – Детаљ топлотног трансфера између разделника и околног ваздуха	60
Слика 6.35 – Мрежа отпора пролазу топлотних губитака за РтАСП	61
Слика 6.36 – Мрежа отпора пролазу топлотних губитака кроз стаклену цев за РтАСП	61
Слика 6.37 – Попречни пресек једне апсорберске плоче (ламеле)	65
Слика 6.38 – Соларни упадни углови директне компоненте соларног зрачења пре и након преламања за РСП	70
Слика 6.39 – Потпуна соларна осенченост за РтАСП у тренутку изласка Сунца	75
Слика 6.40 – Соларна осунчаност и осенченост за РтАСП при преподневним положајима Сунца	76

Слика 6.41 – Потпуна соларна осунчаност за РтАСП у тренутку соларног поднева	76
Слика 6.42 – Соларна осунчаност и осенченост за РтАСП при послеподневним положајима Сунца	76
Слика 6.43 – Потпуна соларна осенченост за РтАСП у тренутку заласка Сунца	77
Слика 6.44 – Тренутак потпуне соларне осунчаности за РтАСП	78
Слика 6.45 – Тренутак потпуне соларне осенчености за РтАСП	78
Слика 6.46 – Соларна осунчаност и осенченост за РтАСП	79
Слика 7.1 – РСП прорачунски алгоритам	82
Слика 7.2 – РтАСП прорачунски алгоритам	83
Слика 7.3 – Временски фајл за 29. јун 2021. год.	84
Слика 7.4 – Временски фајл за 30. јун 2021. год.	84
Слика 7.5 – РСП и РтАСП соларне геометријске перформансе за 29. јун 2021. год.	85
Слика 7.6 – РСП и РтАСП соларне геометријске перформансе за 30. јун 2021. год.	85
Слика 7.7 – РСП и РтАСП теоријске специфичне топлотне снаге за 29. јун 2021. год.	87
Слика 7.8 – РСП и РтАСП теоријске специфичне топлотне снаге за 30. јун 2021. год.	88
Слика 7.9 – Промена РСП теоријске специфичне топлотне снаге у зависности од улазне температуре воде за 30. јун 2021. год.	88
Слика 7.10 – Промена РтАСП теоријске специфичне топлотне снаге у зависности од улазне температуре воде за 30. јун 2021. год.	89
Слика 7.11 – РСП и РтАСП просечне дневне теоријске топлотне снаге у зависности од улазних температура воде за 29. јун 2021. год.	90
Слика 7.12 – РСП и РтАСП просечне дневне теоријске топлотне снаге у зависности од улазних температура воде за 30. јун 2021. год.	90
Слика 7.13 – РСП и РтАСП теоријске специфичне топлотне снаге за 15. јул 2021. год.	91
Слика 7.14 – РСП и РтАСП теоријске специфичне топлотне снаге за 29. јул 2021. год.	91
Слика 7.15 – РСП и РтАСП теоријске специфичне топлотне снаге за 16. август 2021. год.	92
Слика 7.16 – РСП и РтАСП теоријске специфичне топлотне снаге за 10. септембар 2021. год.	92
Слика 7.17 – РСП и РтАСП теоријске специфичне топлотне снаге за 4. октобар 2021. год.	93
Слика 7.18 – РтАСП мапа соларног сенчења	94
Слика 7.19 – <i>EnergyPlus</i> програмска шема	95
Слика 7.20 – <i>EnergyPlus</i> нумерички анализирани модели СП	97

Слика 7.21 – <i>EnergyPlus</i> модел укупног долазног соларног зрачења на површину СП	99
Слика 7.22 – <i>EnergyPlus</i> климатски параметри за град Крагујевац за четворомесечни период од 15. јуна до 15. октобра	100
Слика 7.23 – Просечне дневне нумеричке (<i>EnergyPlus</i>) топлотне снаге анализираних СП током четворомесечног периода од 15. јуна до 15. октобра	101
Слика 7.24 – <i>EnergyPlus</i> метеоролошки параметри за град Крагујевац за 26. јул.....	102
Слика 7.25 – Дневне промене нумеричких (<i>EnergyPlus</i>) топлотних снага анализираних СП за 26. јул.....	102
Слика 7.26 – Индикатори компактности нумерички (<i>EnergyPlus</i>) анализираних СП током четворомесечног истраживања од 15. јуна до 15. октобра	103
Слика 7.27 – Фазе нумеричког алгоритма	106
Слика 7.28 – <i>Ansys Fluent</i> нумерички модел ламеле.....	107
Слика 7.29 – <i>Ansys Fluent</i> сценарио нумеричког истраживања ламеле	107
Слика 7.30 – Поступак апроксимације <i>Ansys Fluent</i> физичког модела РтАСП	108
Слика 7.31 – Детаљ дискретизације <i>Ansys Fluent</i> физичког модела РтАСП.....	109
Слика 7.32 – <i>Ansys Fluent</i> сценарио нумеричког истраживања РтАСП	110
Слика 7.33 – Промена нумеричке (<i>Ansys Fluent</i>) топлотне снаге једне ламеле у зависности од зонског приноса долазног специфичног топлотног флукса.....	113
Слика 7.34 – Графички приказ нумерички (<i>Ansys Fluent</i>) одређеног температурног поља горње површине ламеле ($Z_2=25\%$)	114
Слика 7.35 – Графички приказ нумерички (<i>Ansys Fluent</i>) одређеног температурног поља горње површине ламеле ($Z_2=50\%$)	114
Слика 7.36 – Графички приказ нумерички (<i>Ansys Fluent</i>) одређеног температурног поља горње површине ламеле ($Z_2=75\%$)	115
Слика 7.37 – Графички приказ нумерички (<i>Ansys Fluent</i>) одређеног температурног поља горње површине ламеле ($Z_2=Z_1=100\%$)	115
Слика 7.38 – Промена температуре горње површине ламеле у почетној попречној равни која садржи улазни отвор кружног попречног пресека ($u_{LAM}^{AF}=0$ mm)	116
Слика 7.39 – Промена температуре горње површине ламеле у средишњој попречној равни на средини проточног канала кружног попречног пресека ($u_{LAM}^{AF}=400$ mm).....	116
Слика 7.40 – Промена температуре горње површине ламеле у крајњој попречној равни која садржи излазни отвор кружног попречног пресека ($u_{LAM}^{AF}=800$ mm)	117
Слика 7.41 – Резултати нумеричког (<i>Ansys Fluent</i>) истраживања РтАСП за 16. август у преподневним сатима (09:35 h).....	118
Слика 7.42 – Резултати нумеричког (<i>Ansys Fluent</i>) истраживања РтАСП за 16. август у тренутку соларног поднева (12:40 h).....	118
Слика 7.43 – Резултати нумеричког (<i>Ansys Fluent</i>) истраживања РтАСП за 16. август у послеподневним сатима (16:50 h).....	119
Слика 7.44 – Функционална зависност између РСП и РтАСП нумеричких (<i>SLR</i>) топлотних снага и соларног зрачења на хоризонталну површину за 15. јул 2021. год.	121

Слика 7.45 – Функционална зависност између РСП и РтАСП нумеричких (<i>SLR</i>) топлотних снага и соларног зрачења на хоризонталну површину за 29. јул 2021. год.	122
Слика 7.46 – Функционална зависност између РСП и РтАСП нумеричких (<i>SLR</i>) топлотних снага и соларног зрачења на хоризонталну површину за 16. август 2021. год.	122
Слика 7.47 – Функционална зависност између РСП и РтАСП нумеричких (<i>SLR</i>) топлотних снага и соларног зрачења на хоризонталну површину за 10. септембар 2021. год.	123
Слика 7.48 – Функционална зависност између РСП и РтАСП нумеричких (<i>SLR</i>) топлотних снага и соларног зрачења на хоризонталну површину за 4. октобар 2021. год.	123
Слика 7.49 – Мерни ланац са припадајућим подсистемима и мерном опремом.	124
Слика 7.50 – Привремена експериментална лабораторија.	126
Слика 7.51 – Локације метеоролошке станице и експерименталне инсталације.	127
Слика 7.52 – Метеоролошки подаци за 15. јул 2021. год.	127
Слика 7.53 – Метеоролошки подаци за 29. јул 2021. год.	128
Слика 7.54 – Метеоролошки подаци за 16. август 2021. год.	128
Слика 7.55 – Метеоролошки подаци за 10. септембар 2021. год.	129
Слика 7.56 – Метеоролошки подаци за 4. октобар 2021. год.	129
Слика 7.57 – РСП и РтАСП експерименталне специфичне топлотне снаге за 15. јул 2021. год.	130
Слика 7.58 – РСП и РтАСП експерименталне специфичне топлотне снаге за 29. јул 2021. год.	130
Слика 7.59 – РСП и РтАСП експерименталне специфичне топлотне снаге за 16. август 2021. год.	131
Слика 7.60 – РСП и РтАСП експерименталне специфичне топлотне снаге за 10. септембар 2021. год.	131
Слика 7.61 – РСП и РтАСП експерименталне специфичне топлотне снаге за 4. октобар 2021. год.	132
Слика 7.62 – РСП карактеристичне температурне криве радног флуида (воде) експериментално измерене за 29. јул 2021. год.	133
Слика 7.63 – РтАСП карактеристичне температурне криве радног флуида (воде) експериментално измерене за 29. јул 2021. год.	133
Слика 7.64 – РСП карактеристичне температурне криве радног флуида (воде) експериментално измерене за 16. август 2021. год.	134
Слика 7.65 – РтАСП карактеристичне температурне криве радног флуида (воде) експериментално измерене за 16. август 2021. год.	134
Слика 7.66 – РСП и РтАСП експерименталне вредности термичких ефикасности за 15. јул 2021. год.	135
Слика 7.67 – РСП и РтАСП експерименталне вредности термичких ефикасности за 29. јул 2021. год.	135
Слика 7.68 – РСП и РтАСП експерименталне вредности термичких ефикасности за 16. август 2021. год.	136

Слика 7.69 – РСП и РтАСП експерименталне вредности термичких ефикасности за 10. септембар 2021. год.....	136
Слика 7.70 – РСП и РтАСП експерименталне вредности термичких ефикасности за 4. октобар 2021. год.....	137
Слика 7.71 – Вредности теоријских и експерименталних РтАСП топлотних снага за 15. јул 2021. год.	138
Слика 7.72 – Вредности теоријских и експерименталних РтАСП топлотних снага за 29. јул 2021. год.	139
Слика 7.73 – Вредности теоријских и експерименталних РтАСП топлотних снага за 16. август 2021. год.	139
Слика 7.74 – Вредности теоријских и експерименталних РтАСП топлотних снага за 10. септембар 2021. год.....	140
Слика 7.75 – Вредности теоријских и експерименталних РтАСП топлотних снага за 4. октобар 2021. год.....	141
Слика 7.76 – Енергетски (потрошња финалне и примарне енергије) и еколошки (емисија CO ₂) бенефити коришћења конструкције РтАСП над конструкцијом РСП	142
Слика 7.77 – Геометријско-термичка оптимизација ширине ламеле	143
Слика 7.78 – Геометријско-термичка оптимизација међусобног осног растојања између ламела (стаклених цеви) РтА у конструкцији РтАСП.....	144
Слика 7.79 – Коefицијент соларног сенчења у зависности од међусобног осног растојања ламела (стаклених цеви) РтА у конструкцији РтАСП за 16. август 2021. год.	144

ПОГЛАВЉЕ

Б

Садржај табела

Табела 5.1 – Оптичке карактеристике алуминијумских селективних апсорбера	23
Табела 5.2 – Масени и атомски састав $Sn-Al_2O_3$ селективног премаза	25
Табела 5.3 – Геометријске и термичке карактеристике РСП	26
Табела 5.4 – Геометријске и термичке карактеристике РтАСП	30
Табела 5.5 – Техничке карактеристике рЈОП механизма за РтАСП	31
Табела 6.1 – Соларни углови	44
Табела 7.1 – Геометријске карактеристике <i>EnergyPlus</i> нумерички анализираних модела СП	97
Табела 7.2 – Почетни <i>Ansys Fluent</i> гранични услови нумеричког истраживања ламеле	108
Табела 7.3 – Термичке карактеристике материјала коришћених приликом дефинисања <i>Ansys Fluent</i> нумеричког модела РтАСП	109
Табела 7.4 – <i>Ansys Fluent</i> гранични услови нумеричког истраживања РтАСП током преподнева (када је $\psi=-45^\circ$)	110
Табела 7.5 – <i>Ansys Fluent</i> гранични услови нумеричког истраживања РтАСП током соларног поднева (када је $\psi=0^\circ$)	111
Табела 7.6 – <i>Ansys Fluent</i> гранични услови нумеричког истраживања РтАСП током послеподнева (када је $\psi=60^\circ$)	111
Табела 7.7 – Мерни уређаји и њихова прецизност	125
Табела 7.8 – Временски гранични услови	125

ПОГЛАВЉЕ

В

Садржај ознака

Променљиве:

- A – Површина, [m²];
 a – Коефицијент апсорпције, [-];
 alb – Албедо, [-];
 ASO – Активна површинска заузетост, [m²];
 AST – Локално соларно време, [min];
 B – Коефицијент дана, [°];
 b – Секундарни коефицијент, [-];
 C – Међусобно осно растојање СЦ за РТАСП, [m];
 c – Коефицијент квадратне корелације, [-];
 CE – Коефицијент ефикасности, [-];
 ce – Коефицијент екстинкције, [m⁻¹];
 c_p – Специфична топлота, [J/kgK];
 CT – Часовно време, [min];
 D – Пречник, [m];
 d – Дебљина, [m];
 day – Редни број дана у години, [-];
 DC – Коефицијент детерминације, [-];
 E – Једначина времена, [min];
 e – Коефицијент емисије дуготаласног зрачења, [-];
 el – Надморска висина жељене локације, [km];
 FG – Геометријски оптимизациони фактор, [kg/m];

F_L – Фактор ширине, [-];
 F_T – Термички оптимизациони фактор, [$^{\circ}\text{C}/\text{m}$];
 f – Фактор преноса топлотне енергије, [-];
 f^A – Специфична површинска сила, [N/m^2];
 f^V – Специфична запреминска сила, [N/m^3];
 G – Фактор ефикасности, [-];
 g – Убрзање Земљине теже, [m/s^2];
 H – Интензитет просечног (дневног) терестријалног соларног зрачења, [W/m^2];
 h – Коефицијент прелаза топлоте, [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$];
 I – Интензитет тренутног (часовног) терестријалног соларног зрачења, [W/m^2];
 K – Индекс прозачности неба, [-];
 k – Коефицијент топлотне проводљивости, [W/mK];
 K_E – Кинетичка енергија, [J];
 L – Ширина, [m];
 l – Висина, [m];
 \dot{m} – Масени проток, [kg/s];
 n – Број, [-];
 nsr – Коефицијент рефлексије, [-];
 Nu – *Nusselt*-ов број, [-];
 O – Обим, [m];
 p – Индекс преламања соларног зрачења, [-];
 Pr – *Prandtl*-ов број, [-];
 Q – Топлотни флуks, [W];
 q – Специфични топлотни флуks, [W/m^2];
 Q_E – Топлотна енергија, [J];
 R – Коефицијент отпора пролазу топлоте, [K/W];
 r – Полупречник, [m];
 Ra – *Rayleigh*-ов број, [-];
 Re – *Reynolds*-ов број, [-];
 S – Број јасних сунчаних сати током дана, [h];
 s – Коефицијент сенчења, [-];
 T – Апсолутна температура, [K];
 t – Температура, [$^{\circ}\text{C}$];
 T_{SO} – Тотална површинска заузетост, [m^2];
 t' – Време, [s];
 U – Коефицијент пролаза топлоте, [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$];
 u – Дужина, [m];
 U_E – Унутрашња енергија, [J];
 V – Запремина, [m^3];
 VF – Фактор облика, [-];

VO – Укупна површинска заузетост, [m^3];

W – Брзина ветра, [m/s];

W_E – Рад спољашњих сила, [J];

wl – Таласна дужина, [μm];

x – Примарни коефицијент, [-];

Z – Трајање обданице током дана, [h].

Грчка слова:

α – Угао висине Сунца, [$^\circ$];

β – Угао нагиба у правцу С-Ј, [$^\circ$];

γ – Азимутни угао, [$^\circ$];

γ_s – Соларни азимутни угао, [$^\circ$];

δ – Деклинација, [$^\circ$];

ε – Угао ротације, [$^\circ$];

η – Термичка ефикасност, [-];

θ – Соларни упадни угао, [$^\circ$];

κ – Коефицијент запреминског ширења, [K^{-1}];

λ – Географска дужина, [$^\circ$];

μ – Динамичка вискозност, [$Pa \cdot s$];

ν – Кинематска вискозност, [m^2/s];

π – Раван;

ρ – Густина, [kg/m^3];

σ – *Stefan-Boltzmann*-ова константа, [W/m^2K^4];

ς – Температурна проводљивост, [m^2/s];

τ – Коефицијент дијатермије, [-];

v – Брзина, [m/s];

Φ – Променљива (варијабла) у општем смислу;

φ – Географска ширина, [$^\circ$];

ψ – Угао нагиба у правцу И-З, [$^\circ$];

ω – Часовни угао, [$^\circ$].

Индекси:

a – Допунски модификатор апсорбованог соларног зрачења;

ABS – Апсорбер;

AIR – Ваздушни слој између апсорбера (ламеле) и стакла (стаклене цеви);

air – Околни ваздух;

avg – Просечна (средња) вредност;

B – Модификатор директног соларног зрачења;

b – Допунски модификатор директног соларног зрачења;
BB – Апсолутно црно тело;
BEAM – Директно;
bs – Задња страна;
CIR – Област око директног соларног зрачења;
con – Конвекција;
D – Модификатор дифузног соларног зрачења;
d – Допунски модификатор дифузног соларног зрачења;
DIFF – Дифузно;
EDG – Рам;
F – РСП;
fs – Предња страна;
GL – Стакло;
GLT – Стаклена цев;
GRO – Земља (земљиште);
HEAT – Корисна топлотна енергија;
HOR – Хоризонтална раван;
i – Унутрашња димензија;
in – Улаз;
INS – Изолација;
LAM – Ламела;
LOC – Локални меридијан;
LOSS – Топлотни губици;
max – Максимална вредност;
MX – Метода прорачуна термичких перформанси за РСП, тј. за РтАСП ($X = 1, 2, 3$);
NS – Соларни упадни угао за РтАСП;
O – Екстратерестријално соларно зрачење;
o – Спољашња димензија;
out – Излаз;
R – Модификатор рефлектованог соларног зрачења;
r – Допунски модификатор рефлектованог соларног зрачења;
rad – Зрачење;
REFL – Рефлектовано;
S – Соларна константа;
sc – Селективни премаз;
SD – Небеска купола;
SH – Небески свод;
spec – Специфични масени проток кроз соларни пријемник у зависности од његове активне површине;
spr – Ланчаник;

SS – Тренутак заласка Сунца;
ST – Стандардни меридијан;
start – Почетна вредност таласне дужине у мерном опсегу;
stop – Крајња вредност таласне дужине у мерном опсегу;
SUN – Уложена топлотна енергија;
T – R_{TACSP} ;
TOT – Укупно (тотално);
tot – Укупно (тотално);
up – Горња страна;
w – Вода;
z – Соларни упадни угао за соларни пријемник у хоризонталној равни;
O1 – Нулти коефицијент квадратне корелације;
I – Тренутак потпуне соларне осунчаности;
(I) – Димензија једне апсорберске плоче (ламеле);
O2 – Примарни коефицијент квадратне корелације;
2 – Тренутак потпуне соларне осунчаности;
O3 – Секундарни коефицијент квадратне корелације;
 \angle – Уздужно (подужно);
 \perp – Управно (попречно).

Експоненти:

AF – *Ansys Fluent*;
e+ – *EnergyPlus*;
SLR – *Simple Linear Regression*;
' – Дневно соларно зрачење;
" – Тренутно (часовно) соларно зрачење.

Скраћенице:

аП – Активно праћење кретања положаја Сунца;
АПС – Апсорбер;
В – Вакуумски соларни пријемник;
вКОН – Високотемпературни концентришући соларни пријемник;
ВПр – Вишеделни параболични соларни пријемник;
ГЗ – Гумена заптивка;
ДОП – Двоосно праћење кретања положаја Сунца;
ЕР – Екваторијална раван;
З – Запад;
З_т – Зенит;

З₁ – Зона приноса долазног специфичног топлотног флукса јачег интензитета;
З₂ – Зона приноса долазног специфичног топлотног флукса слабијег интензитета;
И – Исток;
Ј – Југ;
ЈОП – Једноосно праћење кретања положаја Сунца;
КОН – Концентришући соларни пријемник;
КФС – Соларни пријемник са кружним Френеловим сочивима;
ЛАМ – Ламела;
лКОН – Линијско концентришући соларни пријемник;
ЛФР – Соларни пријемник са линеарним Френеловим рефлекторима;
М – Меридијан;
НКОН – Неконцентришући соларни пријемник;
нКОН – Нискотемпературни концентришући соларни пријемник;
Нр – Надир;
ОИЕ – Обновљиви извори енергије;
П – Покретни соларни пријемник;
П_Ј – Јужни пол;
пКОН – Површинско концентришући соларни пријемник;
Пр – Параболични (класични) соларни пријемник;
Пс – Северни пол;
ПХ – Соларни пријемник са пољем хелиостата;
Р – Раван соларни пријемник;
рП – Релативно праћење кретања положаја Сунца;
РСП – Класични соларни пријемник;
РтА – Ротациони апсорбер;
РтАСП – Соларни пријемник са ротационим апсорберима;
С – Север;
сКОН – Средњетемпературни концентришући соларни пријемник;
СП – Соларни пријемник;
СХ – Симулациони сценарио (X = 0, 1, 2, 3);
СЦ – Стаклена цев;
Т – Тањирасти соларни пријемник;
тКОН – Тачкасто концентришући соларни пријемник;
Ф – Фиксни (непокретни) соларни пријемник;
ФНП – Фотонапонски пријемник;
ХСП – Хибридни соларни пријемник;
Ц – Цилиндрични соларни пријемник.

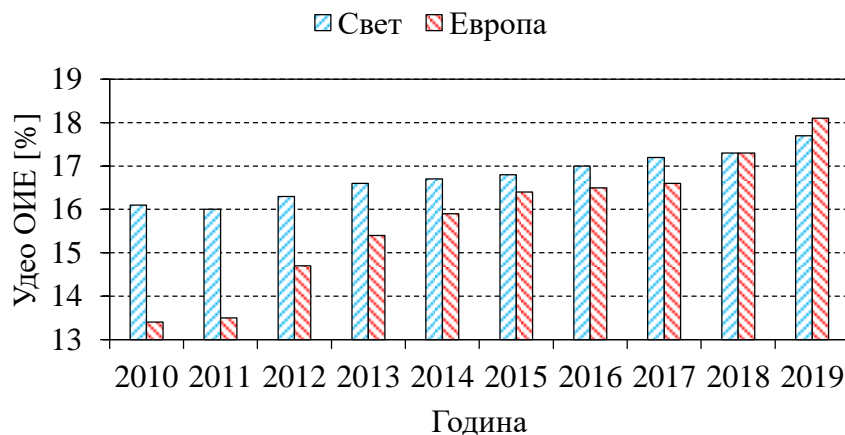
ПОГЛАВЉЕ

I

Увод

1.1 Потрошња енергије и ОИЕ

Према подацима *OWD*¹⁻¹⁾, светска потрошња примарне енергије у 2019. год. износила је рекордних 161755 TWh. Током 2020. год. забележен је пад (за 6566 TWh), који је био узрокован глобалном пандемијом вируса COVID-19. Исти извор (*OWD*) показује да Европа последњих година (30198 TWh у 2018. год., 29697 TWh у 2019. год. и 27760 TWh у 2020. год.) не доприноси глобалном растућем тренду. Потрошња финалне енергије, према наводима *IEA*¹⁻²⁾, прати потрошњу примарне енергије, како на светском (134696 TWh у 2019. год. и 111338 TWh у 2020. год.), тако и на европском нивоу (16363 TWh у 2018. год., 16244 TWh у 2019. год. и 15464 TWh у 2020. год.).



Слика 1.1 – Процентуални удео ОИЕ у потрошњи финалне енергије [3, 4]

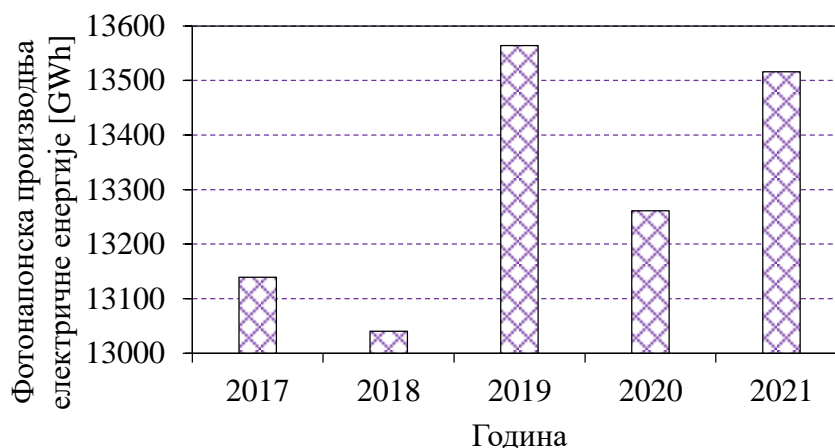
¹⁻¹⁾ Енгл. *Our World in Data* [1].

¹⁻²⁾ Енгл. *International Energy Agency* [2].

На сајтовима *IEA*, *WB*¹⁻³⁾ и *EEA*¹⁻⁴⁾, између осталог, доступни су подаци који показују да су у блиској прошлости уложени велики напори да се коришћење необновљивих извора енергије (угља, нафте и природног гаса) значајније редукује. И поред великог броја прописаних законских регулатива и норми, правилника и протокола, великих новчаних улагања и технолошког развоја, допринос ОИЕ је, и поред растућег тренда, у 2019. год. био мањи од 20% (17,7% на светском нивоу, односно 18,1% на европском нивоу, Сл. 1.1). То значи да се у будућности морају уложити додатни напори да би се глобална еколошка слика (барем) одржала на тренутном нивоу, што се не може постићи без интензивније употребе ОИЕ.

1.2 Соларна енергија

Шире посматрано, сви извори енергије на Земљи (обновљиви и необновљиви), осим нуклеарне, геотермалне енергије и енергије плиме и осеке, индиректно воде порекло од Сунца. Од свих ОИЕ, потенцијал соларне енергије је највећи [5], а притом најмање искоришћен [6]. Иако соларна луминисценција¹⁻⁵⁾ (исијавање) на горњој граници Земљине атмосфере износи¹⁻⁶⁾ $174,3 \cdot 10^9$ MW [5], удео соларне енергије¹⁻⁷⁾ у глобалној и европској производњи електричне енергије током 2020. год. био је 3,12%, односно 4,55% [2].



Слика 1.2 – Годишња производња електричне енергије из соларних електрана на територији Републике Србије [8]

Соларни потенцијал недовољно је искоришћен¹⁻⁸⁾ и на територији Републике Србије (производња електричне енергије из соларних електрана у 2021. год. била је 13516 GWh, Сл. 1.2), и поред тога што је годишња ирадијација соларног зрачења на отвореном

¹⁻³⁾ Енгл. *The World Bank* [3].

¹⁻⁴⁾ Енгл. *European Environment Agency* [4].

¹⁻⁵⁾ Енгл. *solar luminescence*.

¹⁻⁶⁾ Соларна луминисценција у космос износи $3,83 \cdot 10^{20}$ MW. На горњу границу Земљине атмосфере пристиже $4,55 \cdot 10^{10}$ део ове енергије.

¹⁻⁷⁾ Енгл. *solar thermal and solar PV*.

¹⁻⁸⁾ Удео соларне енергије у производњи електричне енергије током 2020. године на републичком нивоу био је <1% [2, 7].

терену за око 154-354 kWh/m² (од 1250 kWh/m² на северу до 1450 kWh/m² на југу) већа од европског просека (1096 kWh/m²) [5, 9-11].

Да би се удео коришћења соларне енергије у укупном износу ОИЕ променио у будућности (на свим нивоима), неопходно је да се области соларне технике и соларне физике непрестано развијају. Под овим се првенствено мисли на усавршавање постојећих, али и проналазак нових соларних уређаја и система [12], који би, са већим степеном корисности, и уз приступачну тржишну цену, трансформисали соларну енергију у топлотну и/или електричну енергију.

1.3 Предмет и циљ докторске дисертације

Узимајући у обзир све наведено, ова докторска дисертација посвећена је представљању нове соларне конструкције која соларну енергију трансформише у топлотну. У питању је соларни пријемник са ротационим апсорберима (РтАСП), експериментално и теоријски, истражен на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, у оквиру пројекта Министарства ТР33015.

Конструкција соларног пријемника (из радног наслова ове докторске дисертације) специфична је по томе што поседује пет стаклених цеви (Ø110×3 mm, $u=840$ mm). Унутар сваке стаклене цеви постављена је равна апсорберска плоча, тј. ламела (800×100 mm) са интегрисаним проточним каналом (са доње стране) унутрашњег попречног пресека Ø15 mm. Како би се спречило продирање ваздуха, влаге и других нежељених примеса из спољашње средине у унутрашњост соларног пријемника, коришћена су данца, тј. чепови (по једној стакленој цеви два комада) направљена од полиамида, гумене заптивке и силикон отпоран на временске прилике и високе температуре. Стаклене цеви заједно са ламелама прате кретање положаја Сунца током дана, док, са друге стране, то не важи и за носећи рам. Због тога се може рећи да је екстерно (апсолутно) кретање РтАСП једнако нули. Ротационо кретање (закретање) наведених позиција (стаклених цеви и ламела) омогућено је ланчаним преносом између погонског ланчаника на хибридном корачном серво мотору и гоњених ланчаника постављених на спољашњој страни горњих данаца (чепова). Конструкција поседује разделник (са горње стране) и сабирник (са доње стране). Обртне спојнице су коришћене приликом повезивања покретних (стаклених цеви и ламела) и непокретних (сабирник и разделник) елемената.

Нови соларни дизајн комбинује позитивне стране фиксних (равних и вакуумских – у смислу компактности) и покретних (максимизирање прикупљања долазног соларног зрачења), па се може сматрати оптималним соларним решењем.

Аутор се нада да ће соларни пријемник представљен у оквиру ове докторске дисертације, кроз вишефазно и свеобухватно (од почетне идеје, фазе пројектовања и фазе конструисања, преко физичке реализације, па све до мерења и прикупљања главних термичких параметара) истраживање, додатно допринети развоју соларне физике и соларне технике. Првенствено кроз постављање нових смерница за конструисање соларних пријемника у будућности, а потом и кроз евентуално обогаћивање тренутне тржишне понуде.

1.4 Полазне хипотезе

Мотиви експерименталног и теоријског истраживања РтАСП, налазе се у следећим питањима, тј. полазним научним претпоставкама (хипотезама):

1. Применом соларних пријемника у зградарству остварују се значајне уштеде у потрошњи финалне (примарне) енергије;
2. Покретни соларни пријемници имају већу термичку ефикасност од фиксних соларних пријемника;
3. Производни и експлоатациони трошкови покретних соларних пријемника виши су у односу на фиксне соларне пријемнике;
4. Покретни соларни пријемници захтевају већу просторну (запреминску) заузетост од фиксних соларних пријемника.

1.5 Структура докторске дисертације

У првом поглављу, најпре је (кратко и концизно) анализирана потрошња примарне и финалне енергије (у свету и у Европи). Потом је скренута пажња да је процентуални удео ОИЕ, и поред свих напора, и даље на ниском нивоу (<20%), а да је коришћење соларне енергије минорно (<5%). Централно место овог поглавља посвећено је предмету и циљу ове докторске дисертације, полазним хипотезама и њеној структури. Тиме је направљен темељ за сва остала поглавља у којима је представљен, развијен и истражен нови соларни концепт.

У другом поглављу представљена је и анализирана „традиционална“ класификација соларних пријемника. Такође су укратко дате основне информације (принцип рада, карактеристике, специфичности, области примене, итд.) у вези са соларним пријемницима из поменуте класификације.

Треће поглавље посвећено је верзијама равних и вакуумских соларних пријемника, чије су термичке перформансе побољшане употребом разних покретних и непокретних елемената (рефлекторима, концентраторима и огледалима). Циљ литературног прегледа је скретање пажње на оригиналност нове научне идеје (са једне стране), а потом и на превазилажење „традиционалне“ класификације соларних пријемника (са друге стране).

Четврто поглавље представља наставак трећег поглавља. У њему је детаљно описан научни допринос ове докторске дисертације, најпре кроз представљање нове соларне конструкције – соларног пријемника са ротационим апсорберима (РтАСП), а потом и кроз увођење новог критеријума за класификацију покретних соларних пријемника – све због специфичног дизајна РтАСП.

Досадашњи дизајн равних апсорберских плоча изложен је на почетку поглавља пет. Потом су детаљно описане конструкције и експерименталне инсталације РСП¹⁻⁹⁾ и РтАСП. Један део овог поглавља посвећен је детаљном опису електро-механичке трансмисије (за РтАСП).

¹⁻⁹⁾ Раван соларни пријемник (РСП) имао је контролну улогу. Другим речима, у оквиру ове докторске дисертације, РтАСП термичке перформансе (карактеристичне температуре, топлотна снага и термичка ефикасност) праћене су у односу на РСП термичке перформансе.

Математички модели термичког понашања РСП и РтАСП детаљно су изложени у поглављу шест. Између осталог, описани су модели екстратерестријалног и (директног и дифузног) терестријалног соларног зрачења. Употребом соларне векторске алгебре и аналитичке геометрије, разрађени су модели соларних упадних углова за различите случајеве постављања произвољно оријентисаних фиксних равних површина соларних пријемника. Применом једначина којима се описују механизми простирања топлоте, одређени су топлотни губици и топлотне снаге РСП и РтАСП. Оптичке ефикасности соларних пријемника узете су у обзир, као и ефекти соларног сенчења (за РтАСП). На крају су дефинисане једначине за одређивање њихових термичких ефикасности.

Резултати истраживања приказани су у поглављу седам. Теоријска истраживања РСП и РтАСП, базирана су на примени специјално развијеног алгоритма са тростепеном провером. Поред теоријске методе, у овој фази коришћене су и неке нумеричке методе: софтвери *EnergyPlus* и *Ansys Fluent*, као и једноставна линеарна регресија (*SLR*). Резултати експерименталних истраживања, уз одговарајућа мерења и употребу метеоролошких података, изложени су након поменутих теоријских и нумеричких истраживања. Свеобухватна верификација (уз геометријско-термичку оптимизацију) спроведена је на крају овог поглавља.

Закључна разматрања са будућим истраживачким правцима дата су у поглављу осам.

На крају, у поглављу девет направљен је списак коришћених референци приликом израде ове докторске дисертације.

ПОГЛАВЉЕ

II

Конвенционални соларни пријемници

Сви соларни системи (заокружене соларне инсталације) могу бити [5, 6, 13-15]: активни (примарно намењени за директно коришћење енергије Сунца, **Сл. 2.1**) и пасивни (најчешће интегрисани у оквиру других специфичних грађевинских елемената који нису превасходно намењени коришћењу енергије Сунца, **Сл. 2.2**).



Слика 2.1 – Активни соларни систем
[16]



Слика 2.2 – Пасивни соларни систем
[17]

Централно место у свим активним соларним системима заузимају следећи соларни уређаји [5, 6, 13-15]: соларни пријемници (трансформишу соларну енергију у топлотну, односно унутрашњу енергију радног флуида, **Сл. 2.3**), фотонапонски пријемници (трансформишу соларну енергију у електричну енергију, **Сл. 2.4**) и хибридни соларни пријемници (соларну енергију трансформишу истовремено у топлотну и електричну енергију, **Сл. 2.5**).



Слика 2.3 – Соларни пријемник [18]



Слика 2.4 – Фотонапонски пријемник [19]



Слика 2.5 – Хибридни соларни пријемник [20]

Са циљем да се соларни потенцијал што боље искористи, огромна пажња поклања се дизајну соларних пријемника (СП). Због настанка великог броја различитих соларних конструкција, научна (и стручна) пракса користи два основна критеријума за њихову класификацију (Сл. 2.6). Према првом класификационом критеријуму, СП могу бити: неконцентришући^{II-1)} (НКОН) и концентришући^{II-2)} (КОН). Према покретности, СП могу бити: непокретни, тј. фиксни^{II-3)} (Ф) и покретни^{II-4)} (П).



Слика 2.6 – Основна класификација СП

Коришћење првог критеријума за класификацију СП забележено је у радовима следећих аутора: *Ghaderian* и остали [21], *Bhalla* и *Tyagi* [22], *Sardeshpande* и *Pillai* [23], *Sahin* и остали [24], *Kumar* и остали [25], *Selvakumar* и *Barshilia* [26], *Ogunmodimu* и *Okoroigwe* [27], *Evangelisti* и остали [28], *Lazzarin* и *Noro* [29], итд.

Радови у којима је као основни критеријум за поделу СП коришћена њихова (не)покретност су: *Sabiha* и остали [30], *Ghritlahre* и *Prasad* [31], *Zayed* и остали [32], *Suman* и остали [33], *Gorjian* и остали [34], *Saxena* и *Gaur* [35], *Alam* и остали [36], *Kumar* и остали [37], *Jamil* и остали [38], итд.

Концентришући СП даље се могу поделити на (Сл. 2.7) [22, 39]: линијско^{II-5)} концентришуће (ЛКОН) СП и тачкасто^{II-6)} концентришуће (ТКОН) СП.

Покретни СП прате кретање положаја Сунца на следећа два начина (Сл. 2.8) [21, 24, 31-34]: по једној^{II-7)} оси (поседују један степен слободe, једноосно праћење кретања положаја Сунца, ЈОП) и по две^{II-8)} осе (поседују два степена слободe, двоосно праћење кретања положаја Сунца, ДОП).

II-1) ЕНГЛ. *non-concentrating solar collectors*.

II-2) ЕНГЛ. *concentrating solar collectors*.

II-3) ЕНГЛ. *fixed solar collectors*.

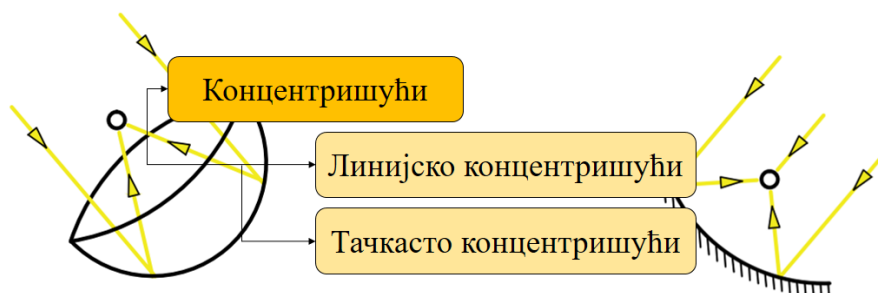
II-4) ЕНГЛ. *tracking solar collectors*.

II-5) ЕНГЛ. *line focusing solar collectors*.

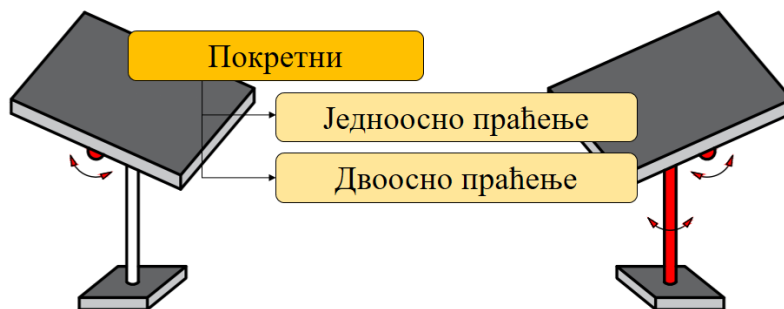
II-6) ЕНГЛ. *point focusing solar collectors*.

II-7) ЕНГЛ. *single-axis tracking solar collectors*.

II-8) ЕНГЛ. *dual-axis tracking solar collectors*.

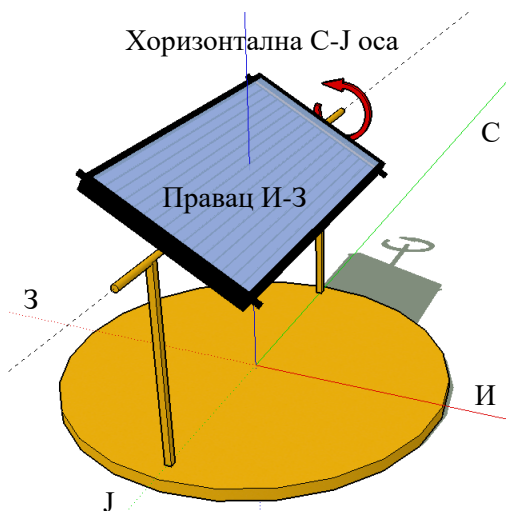


Слика 2.7 – Класификација концентришућих СП

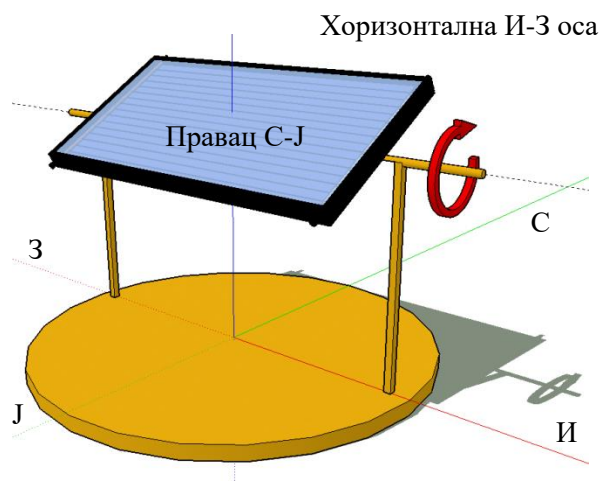


Слика 2.8 – Класификација покретних СП

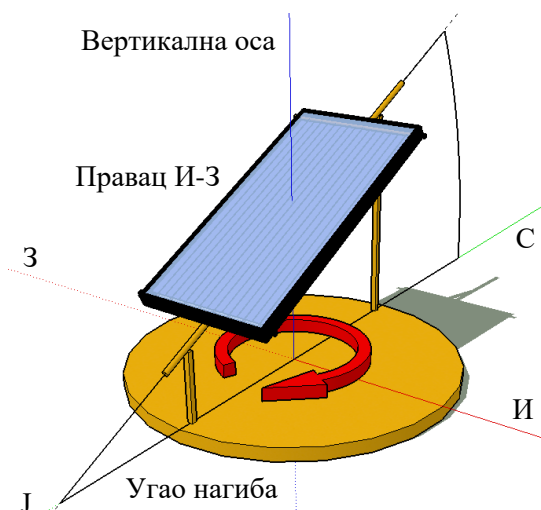
СП са ЈОП (у правцу исток-запад, тј. И-З, односно у правцу север-југ, тј. С-Ј) су занимљива група, јер њихова оса ротације [40-42] може бити: хоризонтална (Сл. 2.9, Сл. 2.10), вертикална (Сл. 2.11) и нагнута (Сл. 2.12) под неким углом у односу на хоризонталну површину.



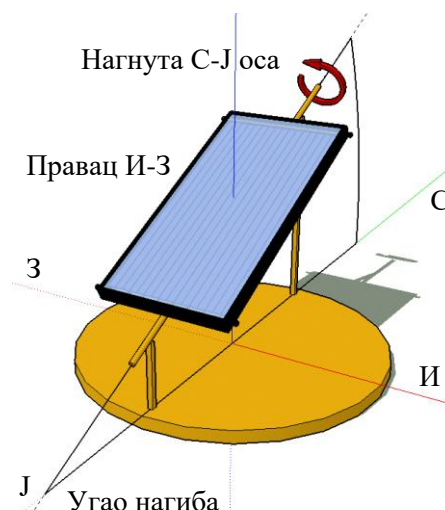
Слика 2.9 – СП са ЈОП у правцу И-З око хоризонталне С-Ј осе



Слика 2.10 – СП са ЈОП у правцу С-Ј око хоризонталне И-З осе



Слика 2.11 – СП са нагнутом С-Ј осом и ЈОП у правцу И-З око вертикалне^{II-9)} осе



Слика 2.12 – СП са ЈОП у правцу И-З око нагнуте С-Ј осе

Када се све наведено узме у обзир (Сл. 2.6-2.12), долази се до класификације СП која се временом усталила у литератури, па се може назвати и „традиционалном“ (Сл. 2.13).

I критеријум	Фиксни	Равни СП	Неконц.	II критеријум	
		Вакуумски СП			
		Вишеделни параболични СП			
	Покретни	Једноосно праћење	Класични параболични СП		Линијско концентришући
			СП са линеарним Френеловим рефлекторима		
			Цилиндрични СП		
		Двоосно праћење	Тањирасти СП		Тачкасто концентришући
			СП са пољем хелиостата		
			СП са кружним Френеловим сочивима		
			Концентришући		

Слика 2.13 – „Традиционална“ класификација СП

^{II-9)} Вертикална оса управна је хоризонталну раван.

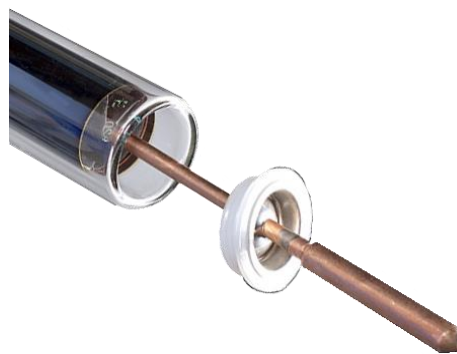
Према овој класификацији, равни^{II-10)} (Р) и вакуумски^{II-11)} (В) СП сматрају се фиксним и неконцентришућим соларним конструкцијама. Вишеделни параболични^{II-12)} (ВПр) СП су такође фиксни, али линијско концентришући. Класични параболични^{II-13)} (Пр) СП, СП са линеарним Френеловим рефлекторима^{II-14)} (ЛФР) и цилиндрични^{II-15)} (Ц) СП су линијско концентришући са једноосним системом за праћење кретања положаја Сунца. Тањирасти^{II-16)} (Т) СП, СП са пољем хелиостата^{II-17)} (ПХ) и СП са кружним Френеловим сочивима^{II-18)} (КФС) су тачкасто концентришући са двоосним механизмом за праћење кретања положаја Сунца.



Слика 2.14 – Раван СП
[43]

Равни СП (Сл. 2.14) користе се при нискотемпературној конверзији соларне енергије (до 100°C [5, 44]). Улогу радног флуида најчешће има вода (или друга течност) са додатком антифриза. Вода протиче кроз проточне канале разних облика^{II-19)}, најчешће интегрисаних са равном апсорберском плочом. Основни материјал апсорбера углавном је алуминијум [45]. У циљу максимизирања топлотне снаге, апсорбери се додатно премазују разним селективним премазима^{II-19)}. Могу бити застакљени (једноструко [5, 44, 45] или вишеструко [5, 44, 45]) или незастакљени [46], односно са [5, 44, 45] или без [44, 45] изолационог слоја. Приликом израде кутије (рама) равног СП, предност се даје елоксираним алуминијуму [45].

Вакуумске СП, за разлику од равних, одликују мањи топлотни губици и виши температурни режим рада (80-200°C [5, 44]), због чега су велику примену нашли у разним индустријским гранама [47-49]. Назив су добили на основу технолошког поступка израде, који подразумева постојање међупростора у коме влада апсолутни притисак мањи од 0,0133 Ра [50], и који се третира као безваздушна, тј. вакуумска средина. На (Сл. 2.15) приказана је конструкција вакуумског СП са топлотним цевима. Централно место у оваквој изведби заузима потпуно затворена бакарна цев претходно напуњена одређеном количином лако испарљиве материје (секундарни радни флуид). Бакарна цев потом се спушта у кућиште од двослојног (вакуумом испуњеног) стакла. Унутрашња стаклена цев је са спољашње стране премазана селективним премазом. У почетном временском тренутку, секундарни радни флуид (у течном агрегатном стању) заузима



Слика 2.15 – Вакуумски СП [43]

II-10) ЕНГЛ. *flat-plate solar collectors*.

II-11) ЕНГЛ. *evacuated tube solar collectors*.

II-12) ЕНГЛ. *compound parabolic solar collectors*.

II-13) ЕНГЛ. *parabolic trough solar collectors*.

II-14) ЕНГЛ. *linear Fresnel lens*.

II-15) ЕНГЛ. *cylindrical trough solar collectors*.

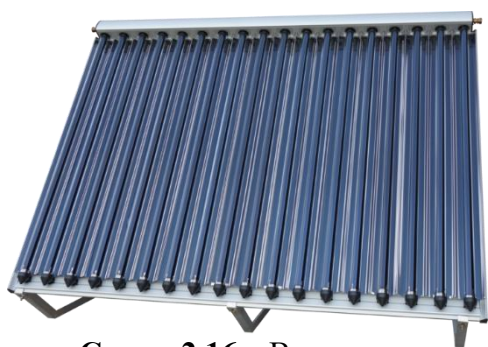
II-16) ЕНГЛ. *parabolic dish reflectors*.

II-17) ЕНГЛ. *heliostat fields*.

II-18) ЕНГЛ. *circular Fresnel lens*.

II-19) Поглавље 5.1.

доњи део бакарне цеви. Агрегатно стање секундарног радног флуида мења се његовим загревањем (излагањем долазном соларном топлотном флуксу), па у парној фази прелази у горњи део бакарне цеви (последича термосифонског ефекта). Поновно враћање секундарног радног флуида у течно агрегатно стање, омогућава примарни радни флуид (вода), који се, због преузимања топлотне енергије, загрева. Може се рећи да примарни радни флуид има улогу расхладног радног флуида. Загрејани примарни радни флуид даље се испоручује крајњем кориснику. За разлику од вакуумског СП (Сл. 2.15), у пракси постоје и варијанте када се вода загрева протицањем кроз бакарне цеви у вакуумом испуњеном кућишту, без коришћења секундарног радног флуида – вакуумски СП са директним током [5].



Слика 2.16 – Вишеделни параболични СП [51]

Фиксни СП састављен од цевастог апсорбера (кроз који протиче радни флуид) и вишеделних параболичних рефлектора, који су симетрично постављени у односу на уздужну осу цевастог апсорбера, осмислио је *Vinston* 1974. год. [44, 50]. То је био први пример вишеделног параболичног СП (Сл. 2.16). Пријемни угао између вишеделних параболичних рефлектора, дефинисан је тако, да се, у било ком временском тренутку током дана, омогући што интензивније прикупљање долазног директног соларног зрачења. Из овога се лако може закључити да поменутој конструкцији термичка ефикасност опада са повећањем удела долазног дифузног соларног зрачења у укупном соларном приносу. Овај негативни ефекат делимично се може редуковати повећањем пријемног угла. У циљу додатног повећања топлотне снаге и термичке ефикасности, постоје решења где се испод цевастог апсорбера поставља изолациони слој, а изнад рефлектујућих површина стаклена прекривка [44, 50]. Изолациони слој повећава отпор пролазу топлотних губитака, а стаклена прекривка спречава могућност таложења (и нагомилавања) прашине и других нежељених примеса на унутрашњој страни рефлектујућих површина [52]. Вишеделне параболичне рефлектујуће површине не морају увек бити симетричне [53], а апсорбери не морају бити цилиндрични [54]. Вишеделни параболични СП могу загрејати радни флуид до 250°C [50].

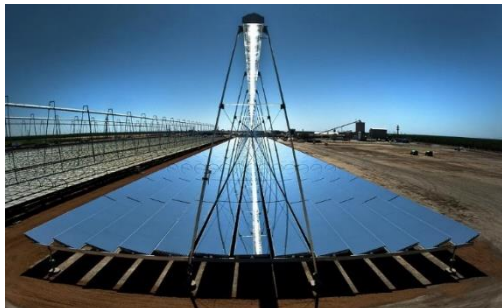
Класични параболични СП (Сл. 2.17), са вишеделним параболичним СП (Сл. 2.16), деле неке сличности, али и неке разлике. Као и вишеделни параболични, и класични параболични СП састављени су од цевастих апсорбера и параболичних рефлектујућих површина. Међутим, у овом случају користи се једноделна мобилна рефлектујућа сферна површина у чијој се фокалној^{II-20)} линији налази фиксни цеваста апсорбер. Мобилни рефлектори код класичних параболичних СП имају исту улогу као вишеделни фиксни рефлектори у конструкцијама вишеделних



Слика 2.17 – Класични параболични СП [55]

II-20) Жижна линија.

параболичних СП. Због мобилности својих једноделних рефлектујућих површина (једноосног праћења положаја Сунца), класични параболични СП остварују знатно више радне температуре од вишеделних параболичних (300-400°C [5]), због чега се користе и у енергетском сектору за производњу електричне енергије [56, 57].



Слика 2.18 – СП са линеарним Френеловим рефлекторима [58]

Када се улога рефлектујућих површина додели великом броју уздужних равних огледала постављених испод (на одређеном растојању) уздужног заједничког фиксног апсорбера, долази се до конструкције СП са линеарним Френеловим рефлекторима (Сл. 2.18). Ову конструкцију, између осталог, карактерише и једноосно уздужно праћење положаја Сунца у хоризонталној равни, при чему се свако уздужно равно огледало (због различите удаљености од уздужног заједничког фиксног апсорбера) индивидуално прилагођава тренутном положају Сунца на небеској сфери.

Због тога што се радни флуид може загрејати до 500°C [59], СП са линеарним Френеловим рефлекторима такође су погодни за производњу електричне енергије.

Цилиндрични СП (Сл. 2.19) у ствари су самостални цевасти апсорбери састављени од следећих позиција: стаклене цеви, селективног премаза, бакарне цеви, радног флуида и једноосног механизма за праћење положаја Сунца. Стаклена цев редукује настајање топлотних губитака, селективни премаз побољшава апсорпционе и емисионе карактеристике, док бакарна цев повећава коефицијент топлотне проводљивости. Због свега наведеног, радни флуид на излазу из цилиндричног СП може имати температуру до 300°C [61]. Уколико се приликом израде користи још једна стаклена цев, или вакуумска технологија, тада се ради о напреднијим решењима. Како стаклене цеви могу бити великих пречника, цилиндрични СП примену налазе и у ваздушним постројењима. Такође се могу комбиновати и са разним рефлектујућим површинама, како фиксним, тако и покретним.



Слика 2.19 – Цилиндрични СП [60]

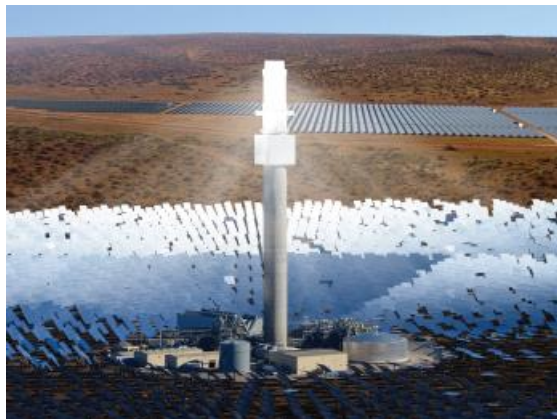


Слика 2.20 – Тањирасти СП [62]

Тањирасти СП (Сл. 2.20) спадају у групу СП са двоосним праћењем положаја Сунца, односно у групу тачкасто концентришућих СП (Сл. 2.13). Употреба 3D параболичног рефлектора захтева од апсорбера да буде жижног (тачкастог) типа, а да праћење кретања положаја Сунца буде по обе осе. Резултат свега наведеног је СП са јако високим радним температурама у апсорберу (до 1500°C [5, 44, 50]) и веома широким подручјем примене. То значи да се, уз употребу *Stirling*-овог мотора са

гасном турбином [63], ови соларни уређаји могу користити за директну конверзију топлотне енергије у електричну. Због високих радних температура, апсорбер мора бити израђен од топлотно издржљивих материјала. Тањирасти СП могу радити самостално, или у оквиру великих соларних система.

СП са пољем хелиостата (Сл. 2.21) у ствари је висока кула са апсорбером (на врху). Кула-апсорбер прикупља усмерено рефлектовано соларно зрачење од стране великог броја хелиостата [5, 44, 50]. Због високих радних температура, као и у случају тањирастих СП, акумулирана топлотна енергија може се директно конвертовати у електричну. Кула-апсорбер, у просторном смислу, налази се у централном делу хелиостатског поља, и заједничка је свим рефлектујућим елементима. Кула-апсорбер може бити, или делимично, или потпуно окружена хелиостатима. У првом случају, хелиостати се постављају на северној страни хелиостатског поља, како би централни СП био са јужне стране.



Слика 2.21 – СП са пољем хелиостата [64]



Слика 2.22 – СП са кружним Френеловим сочивима [65]

Главна особина кружних Френелових сочива (Сл. 2.22) је прстенаста закривљеност сегмената на равној или сферној површини. Прстенасти сегменти су закривљени под одређеним углом да би се долазни соларни зраци преламали у смеру ка жижи сочива. Сви сегменти имају исту закривљеност, а њихове димензије одређене су дебљином сочива. Иако је овај СП првенствено намењен прикупљању директног соларног зрачења, могу се достићи радне температуре у опсегу од 300 до 1000°C [5, 44, 50]. Пластични (акрилни) материјали су у употреби при изради Френелових сочива.

Технолошки поступци њихове израде базирају се на примени ливења и пресовања у специјално дизајнираним калупима [66, 67].

ПОГЛАВЉЕ

III

Преглед литературе

Од свих типова СП, највећу практичну примену имају равни, а потом и вакуумски. Разлози широке примене равних СП су: прилично једноставан технолошки поступак израде, сведени габарити (компактност), задовољавајуће термичке перформансе и релативно ниска цена. Све наведене предности, нешто мање изражене су код вакуумских СП, али уз већу топлотну снагу и термичку ефикасност.

Свакако да се велика пажња поклања побољшању њиховог дизајна, у енергетском, еколошком и економском смислу. Резултат тога је велики број модификованих модела равних и вакуумских СП.

У циљу већег прикупљања долазног Сунчевог зрачења, модификовање поменутих соларних конструкција огледа се у примени разних допунских елемената (огледала, концентратора и рефлектора), као и система за праћење (ЈОП и ДОП) кретања положаја Сунца, што према „традиционалној“ класификацији^{III-1)}, њима није својствено.

У наставку су дати неконвенционални примери равних и вакуумских СП, детаљно испитани у доступној литератури, применом различитих метода.

Теоријски модел једностране доградње равног СП, употребом фиксног равног рефлектора са његове доње стране, за подручје Италије, изложен је у [68, 69]. У раду су, између осталог, идентификовани оптимални нагиби СП и рефлектора за сваки месец на 39° северне географске ширине. Коришћењем два просечна дневна индекса учинка (однос површина и фактор побољшања), у [70] је теоријски испитана комбинација равног СП са једностраним горњим рефлектором (први случај), једностраним доњим рефлектором (други случај) и двостраним (горњим и доњим, односно десним и левим) рефлекторима (трећи случај). У свим анализираним сценаријима, рефлектори су били фиксни и равни. Резултати ове студије показали су да оптимални угао зависи од ширине рефлектора и ширине равног застакљења равног СП. Раван СП са четвоространим фиксним рефлекторима [71] теоријски је анализиран за географске ширине у опсегу од 35-45°, због његове евентуалне примене током зимске сезоне (први сценарио), односно

^{III-1)} Поглавље 2 (Сл. 2.13).

током целе године (други сценарио). У раду су изложене методе за одређивање оптималног положаја овакве соларне конструкције.

У [72] је математички истражен оптимални положај равног рефлектора (са мануелним праћењем кретања положаја Сунца) испод двоструко озраченог равног СП. Математички модел развијен у Бразилу [73] показао је да је раван СП са ДОП боље решење од равног СП са ЈОП. *Neville* је у [74] нумерички поредио термичке перформансе различитих концепција равних СП: класичних фиксних равних СП (први случај), равних СП са ЈОП у правцу И-3 (други случај), равних СП са ЈОП у правцу С-Ј (трећи случај) и равних СП са ДОП (четврти случај). Резултати су показали да равни СП са ДОП имају највећи соларни потенцијал. У поређењу са њима, равни СП са ЈОП у правцу И-3 дају лошије показатеље за 5-10%, а класични фиксни равни СП за 50%. Сличне нумеричке анализе термичког понашања равних СП са ДОП спроведене су у [75, 76].

Пример конструкције двоструко озраченог равног СП (фиксни равни алуминијумски рефлектор постављен испод равног СП) пажљиво имплементираног у постојећи грађевински концепт стамбене јединице може се наћи у [77]. Раван СП са једностраним фиксним равним рефлектором експериментално је анализиран у [78]. Експериментална истраживања равних СП са вишестраним фиксним равним рефлекторима (двостраним [79, 80], тространим [81] и четвоространим [82]) такође су доступна у литератури. У [83] је, паралелно испод равног СП, на одређеном растојању, постављено мануелно покретано равно огледало у сва три ортогонална правца. Експериментална (уз теоријска) истраживања наведене конструкције, која у ствари представља двоструко озрачен раван СП, показала су да се топлотне перформансе класичног равног СП допунским елементом могу побољшати за 29,55%. Занимљиво експериментално истраживање, на територији Ирака, извршено је у [84]. Наиме, испод равног СП постављен је вишеделни параболични рефлектор, чиме је формирана специфична соларна конструкција која може бити боља од класичног равног СП за 26,5%.

Употреба фиксног равног једностраног рефлектора са доње стране вакуумског СП са хоризонтално спакованим вакуумским цевима математички је истражена у [85]. Ефекат коришћења додатног параболичног селективног премаза (различитих димензија) са унутрашње стране спољашње стаклене цеви вакуумског СП испитан је у [86]. Резултати су показали да термичка ефикасност оваквог соларног дизајна може бити 65-72%, ако је интензитет соларног зрачења 950 W/m^2 , температура воде на улазу у СП 45-70°C, а температура околине 31,2°C. Генерално гледано, термичка ефикасност овог СП већа је за око 10% у односу на класичну конструкцију вакуумског СП. Комбинација вакуумског СП са спољашњим (фиксним) вишеделним параболичним концентратором [87] такође се може сматрати добрим решењем, јер термичка ефикасност на тај начин достиже 68,9%.

У [88] представљен је поједностављен нумерички модел вакуумског СП са „U“ топлотим цевима. Поменути модел је и експериментално верификован, јер је максимална апсолутна грешка мерења била 6,9-12,7%. У [89] је, између осталог, коришћен софтверски пакет *Solidworks* како би се испитала 4 комерцијална типа вакуумских СП са „U“ цевима и фиксним спољашњим вишеделним параболичним рефлекторима. Максимална експериментална апсолутна грешка мерења у овом случају износила је 3,7%. Нумеричко истраживање вакуумског СП са фиксним параболичним рефлектором и убаченим перајем (материјал са променом фазе^{III-2)}) у међупростор топлотне и стаклене цеви изложено је у [90]. На основу добијених резултата извучени су следећи закључци: мања дебљина пераја позитивно утиче на пренос топлоте, термичка снага вакуумског

^{III-2)} Енгл. *phase change material*.

СП са параболичним рефлектором већа је од класичног вакуумског СП (без рефлектора) и температура радног флуида на излазу из вакуумског СП виша је за 2°C ако се у материјал са променом фазе дода 1% бакра. Велики допринос развоју соларне вакуумске технологије, у којој се вакуумски СП комбинују са различитим типовима рефлектора, дао је прегледни рад [91], заснован на нумеричким оптимизационим истраживањима.

Аналогно теоријском истраживању [85], у [92] је извршено експериментално истраживање хоризонтално постављених вакуумских СП са једностраним (са доње стране) равним рефлекторима. Експериментално истраживање хоризонтално и вертикално постављених вакуумских СП са (и без) једностраним равним огледалима испод њих дато је у [93]. Термичке перформансе вертикалних вакуумских СП са двостраним (горњим и доњим) равним рефлекторима, истражени од стране *Abo-Elfadl* и осталих, могу се пронаћи у [94]. Комбинација вертикалних вакуумских СП и спољашњих фиксних вишеделних параболичних рефлектора изложена је у [95], а вакуумских СП (хоризонталних и вертикалних) и унутрашњих фиксних вишеделних параболичних рефлектора у [96, 97]. Развој соларне технике довео је и до занимљивог споја тањирастих (3D), тј. ДОП рефлектора и вакуумских СП. Овај физички модел (термичке ефикасности 47,3%) експериментално (и теоријски) истражио је *Yuan* са својим тимом [98]. У литератури су забележени случајеви када су на вакуумске СП постављани параболични рефлектори са механизмима за праћење (ЈОП) кретања положаја Сунца. Један такав модел развили су *Mori* и остали у [99]. Соларно постројење малих размера, у коме је централно место заузимао већи број вакуумских СП са покретним (ЈОП) параболичним рефлекторима, било је предмет истраживања у [100]. Дестилациони соларни уређај, састављен од топлотних цеви, двоструких стаклених цеви и покретних параболичних рефлектора, може имати термичку ефикасност преко 65%, ако је међупростор двоструког застакљења испуњен термалним уљем [101]. Експериментално (и нумеричко) истраживање топлотних губитака у вакуумском СП са покретним параболичним рефлектором изложено је у [102]. Интересантан модел хибридног СП, са покретним параболичним рефлекторима експериментално (и теоријски) је анализиран у [103]. Занимљиво је да аутори у тренутку спровођења истраживања нису били у могућности да сагледају економску одрживост наведене соларне конструкције.

Qiyuan и остали су у [104] представили нови соларни концепт, који је експериментално истражен у [105], али (за разлику од [103]) и техничко-економски у [106]. Наиме, у кућиште које је са горње стране поседовало застакљење (на једном делу) и сочива (на другом делу), постављене су вакуумске стаклене цеви са покретним вишеделним параболичним рефлекторима (покретани корачним^{III-3)} мотором) и топлотним цевима. Термичка ефикасност наведеног СП била је 54% (за случај да је радна температура 80°C) и 26% (за случај да је радна температура 200°C).

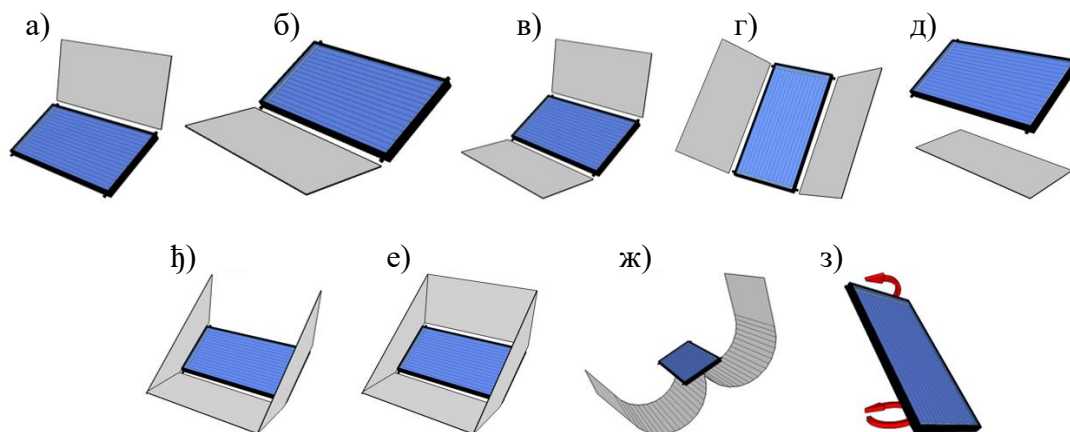
Спој фиксног тањирастог (3D) рефлектора и покретних апсорбера анализирана је у серији радова [107-110]. Идеја је изложена у [107]. Експериментално је истражена у [108]. Њена могућа примена на средњим радним температурама анализирана је у [109]. На крају, у [110] је разматрана примена наведеног СП у индустријским процесима, с обзиром да може имати термичку ефикасност 70-80% на 300°C.

^{III-3)} Енгл. *stepper motor*.

Научни допринос

4.1 Нови идејни концепт соларног пријемника

На основу спроведеног литературног прегледа^{IV-1)}, на наредним сликама, приказан је досадашњи развој неконвенционалних^{IV-2)} конструкција равних СП (Сл. 4.1) и вакуумских СП (Сл. 4.2).

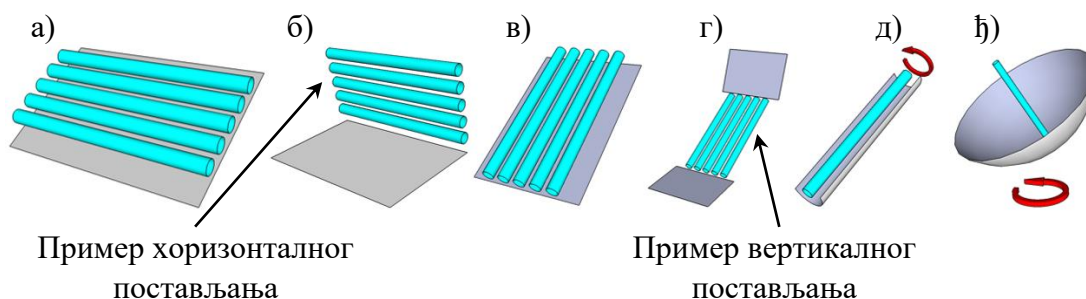


Слика 4.1 – Неконвенционални примери равних СП

а) Рефлектор са горње стране [70]; б) Рефлектор са доње стране [68-70];
в) Рефлектори са горње и доње стране [70]; г) Рефлектори са леве и десне стране [70]; д) Рефлектор испод [72, 83]; е) Тространи рефлектори [81]; е) Четворострани рефлектори [71, 82]; ж) Вишеделни параболични рефлектор [84]; з) Механизам за праћење кретања положаја Сунца (ЈОП или ДОП) [73, 74-76]

^{IV-1)} Поглавље 3.

^{IV-2)} Соларне конструкције које нису нашле ширу комерцијалну примену.



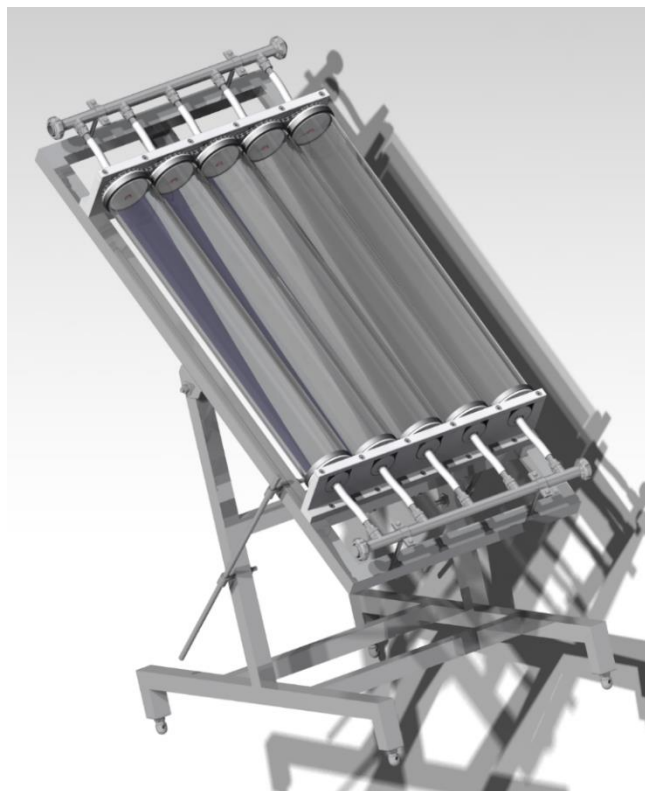
Слика 4.2 – Неконвенционални примери вакуумских СП

а) Рефлектор иза [93]; б) Рефлектор са доње стране [85, 92]; в) Рефлектор иза [93]; г) Рефлектори са горње и доње стране [94]; д) Параболични рефлектори (фиксни или покретни) [87, 90, 95, 99-102]; њ) Тањирасти рефлектори (фиксни или покретни) [98, 107-110]

Све приказане конструкције (Сл. 4.1, Сл. 4.2), модификоване и допуњене, или разним рефлекторима (фиксним или покретним), или механизмима за праћење кретања положаја Сунца, изразито су габаритне, што их чини неприкладним за ширу практичну (комерцијалну) примену.

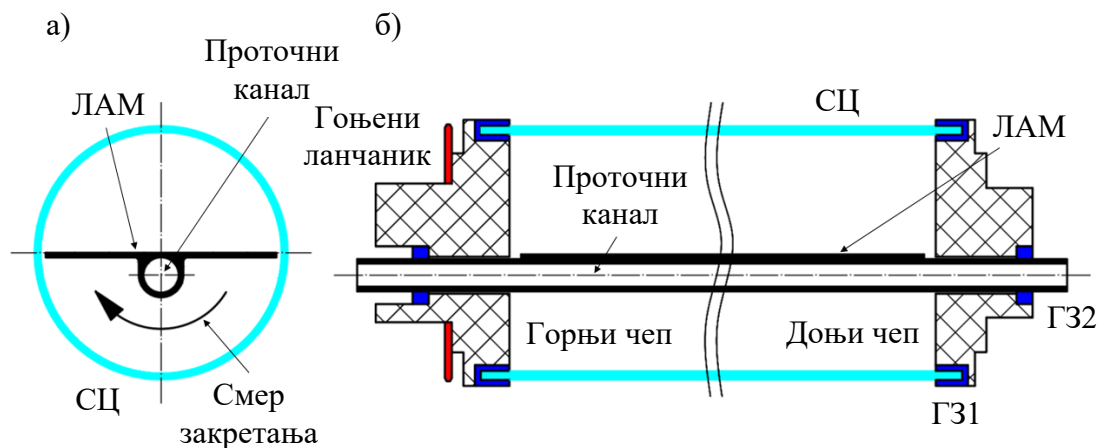
У оквиру ове докторске дисертације направљен је искорак у области соларне технике, представљањем новог соларног концепта – СП са ротационим апсорберима (РТА).

РТАСП (Сл. 4.3) је пример компактне соларне конструкције која поседује јединствени механизам за праћење кретања положаја Сунца, без коришћења допунских рефлектујућих површина, нити фиксних (стационарних), нити покретних (мобилних).



Слика 4.3 – Изометријски приказ конструкције РТАСП

Сваки од 5 коришћених РТА^{IV-3)} (Сл. 4.3) састављен је од следећих позиција (Сл. 4.4): стаклене цеви (СЦ), ламеле (ЛАМ) са интегрисаним проточним каналом (са доње стране) кружног попречног пресека, два чепа (горњег и доњег) и гумених заптивки (ГЗ1 и ГЗ2). На горњем чепу, са његове спољашње стране налази се гоњени ланчаник.



Слика 4.4 – Главне позиције РТА у конструкцији РТАСП
а) Попречни пресек; б) Уздужни пресек

Све гоњене ланчанике на горњим чеповима (путем ланчаног преноса) покреће (заједнички) погонски ланчаник на вратилу хибридног корачног серво мотора. Обртни момент даље се преноси са гоњених ланчаника на комплетне РТА. То значи да је примењено екстерно (и заједничко) ротирање СЦ и ЛАМ. Сви гоњени ланчаници истовремено се ротирају истим углом (корак) закретања, који је унапред временски дефинисан. Другим речима, у овој докторској дисертацији, ЈОП систем (у правцу И-3 око нагнуте С-Ј осе) примењен је на сваки РТА (ЛАМ и СЦ) појединачно у оквиру РТАСП.

Током фаза пројектовања, конструисања и израде новог типа СП, превазиђени су многи технички проблеми^{IV-4)}. Неки од њих су:

- Заптивање РТА;
- Повезивање разделника/сабирника (непокретних елемената) са РТА (покретним елементима);
- Ексцентричност оса проточних канала ЛАМ у односу на осе СЦ;
- Држачи (носачи) РТА;
- Екстерно (и заједничко) ротирање СЦ и ЛАМ, тј. РТА.

Због отклањања низа препрека (са једне стране), а због веће компактности (са друге стране) у односу на друге неконвенционалне примере СП (Сл. 4.1, Сл. 4.2), нова соларна конструкција поседује већи комерцијални потенцијал коришћења у будућности, и поред тога што је за њен рад неопходно (додатно) улагање електричне енергије.

^{IV-3)} РТА представља основну јединицу грађе и функције РТАСП.

^{IV-4)} Поглавље 5.3.

4.2 Модификована класификација соларних пријемника

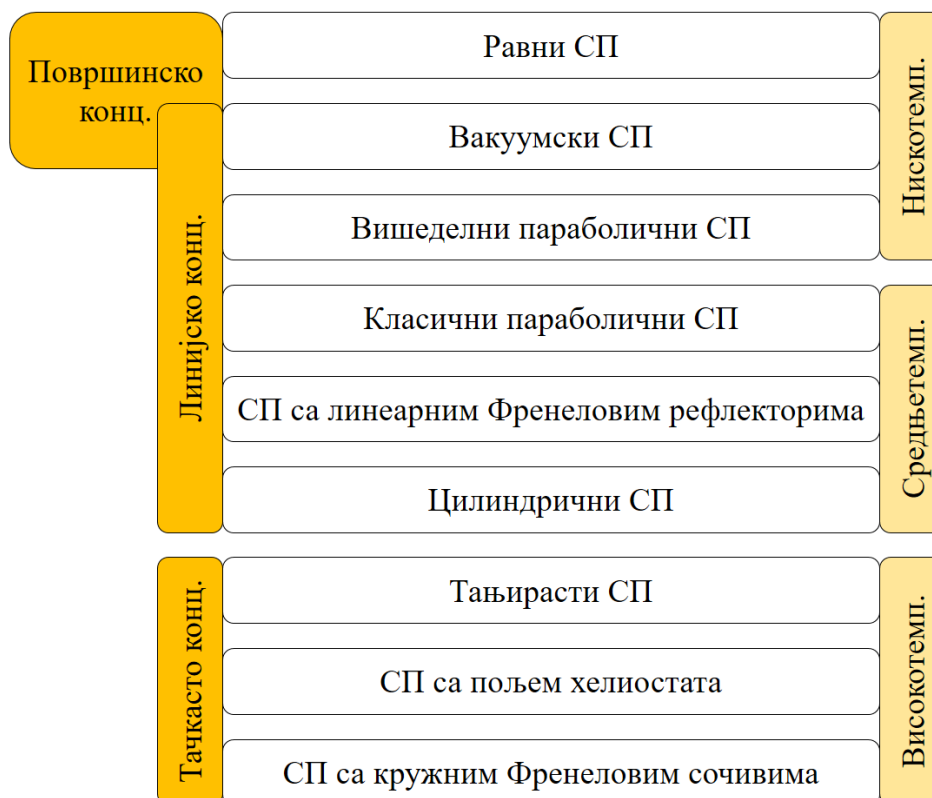
Један од циљева ове докторске дисертације (поред истраживања^{IV-5)} РТАСП) је да укаже на чињеницу да више нема јасних граница између концентришућих и неконцентришућих СП, односно фиксних и покретних СП.

Како се сваки СП данас може модификовати, од неконцентришућег до концентришућег, и од стационарног до мобилног, неопходно је извршити ревизију „традиционалне“ класификације^{IV-6)} СП.

Класификацију концентришућих СП, једним делом (Сл. 4.5), већ је ревидирао Павловић у својој докторској дисертацији [6], према којој се равни (Р), вакуумски (В) и вишеделни параболични (ВПр) СП сврставају у групу нискотемпературних концентришућих (нКОН) СП. Унутар ове групе, равни СП су површинско концентришући (пКОН), вишеделни параболични СП су линијско концентришући (лКОН), док вакуумски СП (у зависности од концепта) могу бити, како површинско, тако и линијско, концентришући СП.

Класични параболични (Пр) СП, СП са линеарним Френеловим рефлекторима (ЛФР) и цилиндрични (Ц) СП су средњетемпературни (сКОН) и линијско концентришући (лКОН) СП.

Тањирасти (Т) СП, СП са пољем хелиостата (ПХ) и СП са кружним Френеловим сочивима (КФС) су високотемпературни (вКОН) и тачкасто концентришући (тКОН) СП.



Слика 4.5 – Модификована класификација концентришућих СП

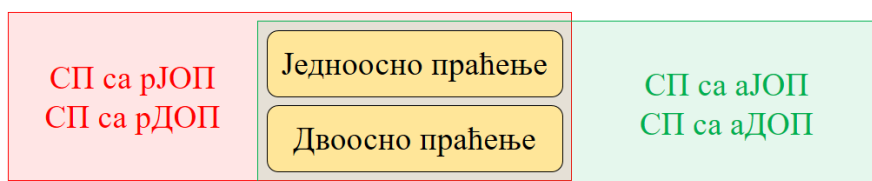
^{IV-5)} Поглавље 7.

^{IV-6)} Поглавље 2 (Сл. 2.13).

Када се за критеријум поделе усвоји (не)покретност СП, представљена соларна конструкција у оквиру ове докторске дисертације показала је да и међу покретним (мобилним) СП има разлика [111].

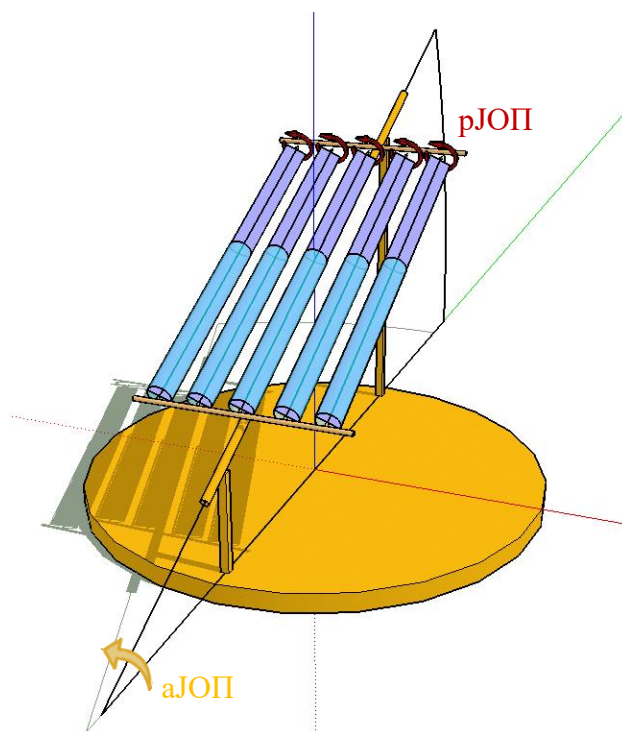
Наиме, до сада су се механизми за праћење кретања положаја Сунца примењивали на нивоу читаве конструкције (први случај), док се код РтАСП он користи за покретање појединачних подсклопова (РтА) унутар комплетне конструкције (други случај). У првом случају долази до промене апсолутног (екстерног) положаја СП током времена. У другом случају долази до промене релативног (интерног) положаја СП током времена, док екстерног померања нема (може бити занемарено) [111].

Узимајући наведено у обзир, све покретне СП (без обзира на број оса ротације и њихов положај у простору) убудуће треба поделити на (Сл. 4.6): СП са апсолутним праћењем (аП) кретања положаја Сунца и СП са релативним праћењем (рП) кретања положаја Сунца [111].



Слика 4.6 – Модификована класификација покретних СП [111]

На основу (Сл. 4.6) лако се може закључити да СП са ДОП нуде још једну занимљиву могућност – комбиновање апсолутног (по једној оси) и релативног (по другој оси) праћења кретања положаја Сунца (са арДОП механизмом, тј. рЈОП+аЈОП). Пример оваквог соларног дизајна дат је на (Сл. 4.7).



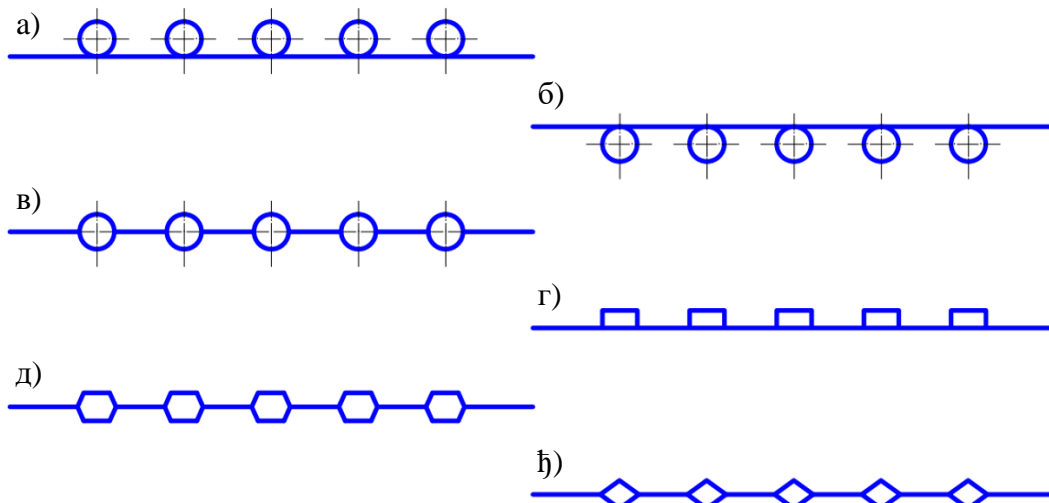
Слика 4.7 – СП са арДОП (аЈОП+рЈОП) механизмом

Соларни дизајн

5.1 Апсорберски дизајн

5.1.1 Опште напомене

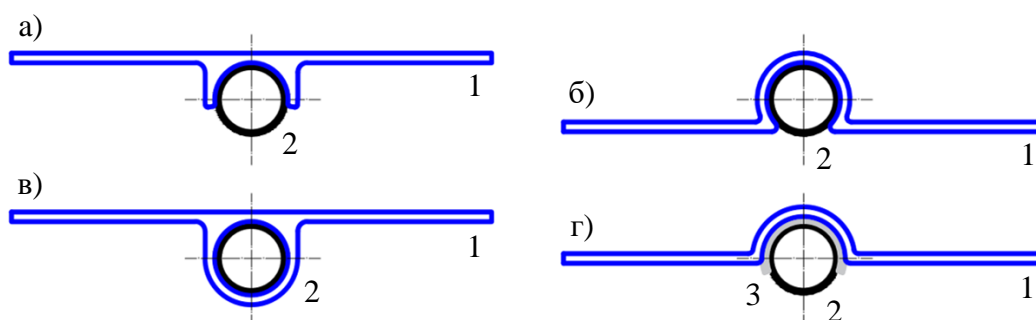
Од свих типова апсорбера доступних на тржишту, највећу практичну примену имају равни апсорбери (Сл. 5.1) [5, 50, 112-116].



Слика 5.1 – Најчешће коришћени типови равних апсорбера [5, 50, 112-116]
а) Кружни проточни канали са горње стране; б) Кружни проточни канали са доње стране; в) Кружни проточни канали у равни; г) Правоугаони проточни канали са горње стране; д) Шестоугаони проточни канали у равни; ж) Ромбоидни проточни канали у равни

Разлози за великом применом равних апсорбера налазе се у следећим њиховим особинама [5, 50, 112-116]: висок коефицијент топлотне проводљивости, висок коефицијент пролаза топлоте, висок коефицијент апсорпције краткоталасног зрачења, низак коефицијент емисије дуготаласног зрачења, дуг радни век, отпорност на корозију, отпорност на високе радне температуре, отпорност на високе радне притиске, низак коефицијент хидрауличког отпора, ниска цена производње, мала маса, мала дебљина, доступност на тржишту, итд.

Равни апсорбери настају паралелним низањем (спајањем) већег броја (елементарних) равних апсорберских плоча, израђених разним технолошким поступцима (Сл. 5.2), најчешће од бакра и алуминијума [5, 50, 112-116].



Слика 5.2 – Најчешће коришћене технологије спајања равне апсорберске плоче и проточног канала [45, 50, 114, 117, 118]

1) Равна апсорберска плоча; 2) Проточни канал; 3) Лем

а) Причвршћивање; б) Механичко причвршћивање; в) Хладно извлачење; д) Лемљење

Добре оптичке (апсорпционе и емисионе) перформансе алуминијумских равних апсорберских плоча остварују се употребом разних тзв. селективних премаза (**Таб. 5.1**).

Табела 5.1 – Оптичке карактеристике алуминијумских селективних апсорбера

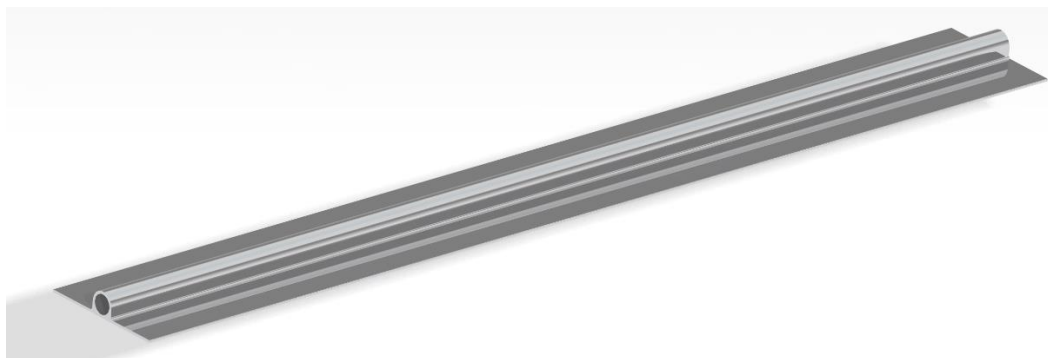
Селективни апсорбер	α [-]	ϵ [-]	Извор
$Ni-Al_2O_3$	0,92-0,97	0,11-0,225	[119]
$Ni-Al_2O_3$	0,92-0,97	0,11-0,23	[120]
$Ni-Al_2O_3$	0,85-0,93	0,03-0,05	[121]
$AlNi-Al_2O_3$	0,94	0,07	[122]
$Mo-Al_2O_3$	0,88-0,94	0,04-0,15	[123]
$Mo-Al_2O_3$	0,91-0,93	0,19-0,27	[124]
$W-Al_2O_3$	0,937-0,939	0,9-1,15	[125]
$Cu-CuAl_2O_4$	0,923	0,06	[126]
$Pt-Al_2O_3$	>0,98	<0,0005	[127]
$Ag-Al_2O_3$	0,93	0,04-0,05	[128]
$Sn-Al_2O_3$	0,93	0,21-0,24	[129]
$Sn-Al_2O_3$	0,89-0,94	0,21-0,24	[130, 131]

Основни задатак селективних премаза (**Таб. 5.1**) је максимизирање (>98% у случају $Pt-Al_2O_3$) упијања краткоталасног соларног зрачења, уз истовремено минимизирање (<0,1% за $Pt-Al_2O_3$) емитовања дуготаласног соларног зрачења [5, 50, 114].

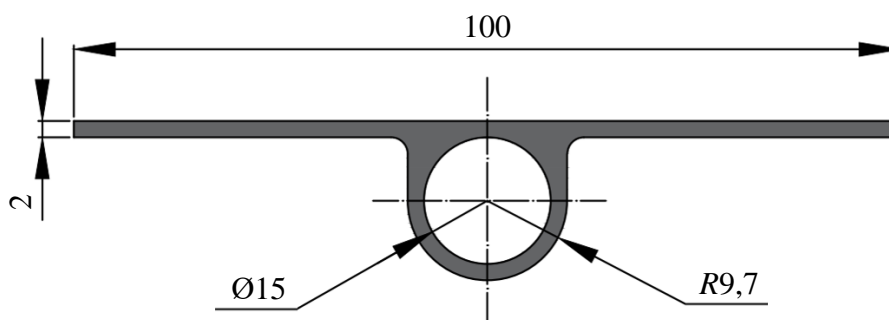
5.1.2 Раван $Sn-Al_2O_3$ селективни апсорбер

Физичко-хемијска анализа коришћеног равног $Sn-Al_2O_3$ селективног апсорбера (Сл. 5.3, Сл. 5.4) извршена је кроз наредне три фазе:

- Фаза I (одређивање дебљине селективног премаза);
- Фаза II (хемијско испитивање стања слободне површине селективног премаза);
- Фаза III (одређивање оптичких карактеристика селективног премаза).



Слика 5.3 – Изометријски приказ равне $Sn-Al_2O_3$ селективне апсорберске плоче



Слика 5.4 – Попречни пресек равне $Sn-Al_2O_3$ селективне апсорберске плоче

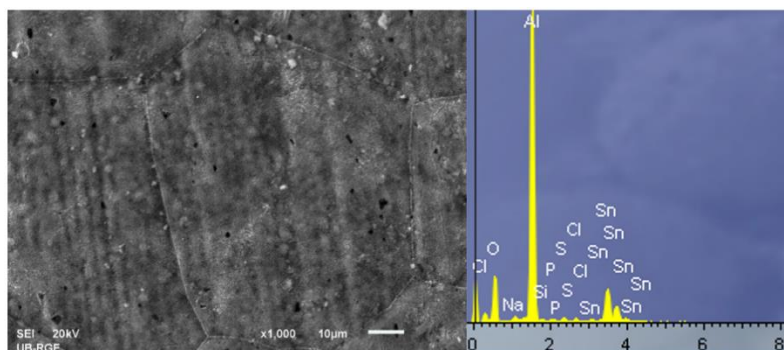
Просечна дебљина $Sn-Al_2O_3$ селективног премаза $d_{sc(avg)}$ [μm] (на великом броју тачкастих узорака^{V-1)} по читавој слободној површини), утврђена је применом следећег обрасца (Јед. 5.1):

$$d_{sc(avg)} = \frac{\sum_{i=1}^n d_{sc(i)}}{n} \quad (5.1)$$

Резултати мерења ($d_{sc(avg)}=15,7$ [μm]) показали су дискретну неравномерност наношења селективног премаза по апсорберској површини. То се може објаснити недостацима у технолошком поступку хладног извлачења апсорбера, недостацима у самој технологији премазивања, као и (микро) механичким оштећењима услед непажљивог руковања.

^{V-1)} Manual Extech CG204 CTT [132].

Резултати хемијских^{V-2)} анализа $Sn-Al_2O_3$ селективног премаза (Сл. 5.5, Таб. 5.2) потврдили су присуство нечистоћа на површини апсорбера.



Слика 5.5 – Хемијски састав $Sn-Al_2O_3$ селективног премаза (увећање $\times 1000$)

Табела 5.2 – Масени и атомски састав $Sn-Al_2O_3$ селективног премаза

Параметар	O	Na	Al	Si	P	S	Cl	Sn	Σ
Масени састав [%]	35,11	0,83	41,72	0,49	0,37	0,57	0,48	20,43	100
Атомски састав [%]	54,73	0,9	38,56	0,43	0,3	0,46	0,33	4,29	100

Удео кисеоника, алуминијума и калаја у масеном саставу износио је 97,26% (Таб. 5.2). Остатак (2,74%) чинили су нежељени примеси, при чему се издвајао натријум (0,83%).

Анализирањем атомског састава (Таб. 5.2), збир кисеоника, алуминијума и калаја био је 97,58%. Потом су следили следећи хемијски елементи: натријум (0,9%), сумпор (0,46%), силицијум (0,43%), хлор (0,33%) и фосфор (0,3%).

Према препорукама у [134-136], коефицијенти апсорпције $a_{sc(avg)}$ [-] (Јед. 5.2) и емисије $e_{sc(avg)}$ [-] (Јед. 5.3) селективних премаза (селективних апсорбера), у одређеном опсегу таласних дужина (од wl_{start} [μm] до wl_{stop} [μm]), зависе од претходно измереног коефицијента рефлексије^{V-3)} nsr_{sc} [μm]:

$$a_{sc(avg)} = \frac{\int_{wl_{start}}^{wl_{stop}} I_s(wl) \cdot [1 - nsr_{sc}(wl)] dwl}{\int_{wl_{start}}^{wl_{stop}} I_s(wl) dwl} \quad (5.2)$$

$$e_{sc(avg)} = \frac{\int_{wl_{start}}^{wl_{stop}} I_{BB}(wl) \cdot [1 - nsr_{sc}(wl)] dwl}{\int_{wl_{start}}^{wl_{stop}} I_{BB}(wl) dwl} \quad (5.3)$$

где је I_{BB} [W/m^2] спектрална емисија апсолутно црног тела на собној температури.

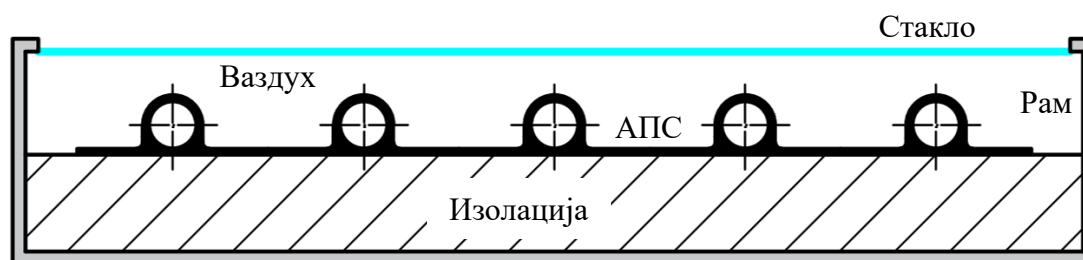
^{V-2)} SEM JEOL JSM-6610LV [133].

^{V-3)} Shimadzu 2600 UV-Vis спектрофотометар са интегрисаном сфером ISR-2600-Plus [137].

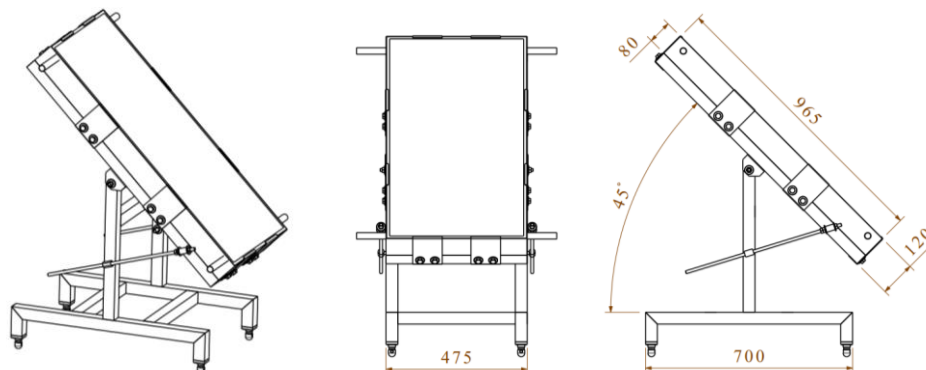
5.2 Дизајн РСП

5.2.1 Опис РСП конструкције

Конструкција равнoг СП (РСП, Сл. 5.6), спољашњих димензија $965 \times 475 \times 80$ mm (Сл. 5.7), била је прилично једноставна (Таб. 5.3). Изнад равнoг апсорбера (АПС), на одређеном растојању, постављено је једноструко застакљење. У циљу редуковања топлотних губитака^{V-4)}, испод апсорбера постављена је тврдо пресована минерална вуна. Раван апсорбер био је састављен од пет $Sn-Al_2O_3$ селективно премазаних апсорберских плоча. Бакарне цеви сабирника и разделника имале су пречник $\varnothing 22 \times 1$ mm, док је пречник проточних канала интегрисаних са апсорберским плочама износио $\varnothing 15 \times 1$ mm [138].



Слика 5.6 – Главне позиције РСП [138]



Слика 5.7 – Изометријски приказ РСП (лево) и његове ортогоналне пројекције (десно)

Табела 5.3 – Геометријске и термичке карактеристике РСП [138]

Слој	Материјал	A [m ²]	d [mm]	k [W/mK]	τ [-]	a [-]	e [-]
Рам	Алуминијум	0,23	2	203	-	-	-
АПС	$Sn-Al_2O_3$	0,35	2	203	-	0,88	0,25
Гас	Ваздух	-	33,5	0,026	-	-	-
Прекривка	Стакло	0,46	4	0,8	0,9	-	0,9
Изолација	Тврдо пресована минерална вуна	0,46	40	0,037	-	-	-

^{V-4)} Поглавље 6.3.1.

5.2.2 РСП експериментална инсталација

Експериментална поставка у којој је РСП заузимао централно место приказана је на наредној слици (Сл. 5.8).



Слика 5.8 – Експериментална инсталација са РСП [138]

1 – РСП; 2 – Носећи рам; 3 – Фиксно постоље; 4 – Зглобна веза; 5 – Навојне шипке;
6 – Горњи резервоар; 7 – Нивостат; 8 – Постоље горњег резервоара; 9 – Испусна
славина; 10 – Зауставни вентил; 11 – Косо ручни регулациони вентил; 12 – Доњи
резервоар; 13 – Соларно одзрачно лонче; 14 и 15 – Куглични вентили; 16 и 17 – Pt-100
сонде; 18 – Електро орман

Преко носећег рама (2) и зглобне везе са фиксним постољем (3), РСП (1) био је оријентисан ка југу. Зглобна веза (4) са навојним шипкама (5) омогућила је ротирање (закретање) РСП у правцу С-Ј око хоризонталне И-З осе, а тиме и прецизно подешавање угла нагиба према хоризонталу. Топлотно изолован горњи резервоар^{V-5)} (6), на постољу^{V-6)} (8), имао је са унутрашње стране уграђен пловак за одржавање жељеног нивоа воде. Ниво воде у горњем резервоару читавао се преко нивостата (7) са његове спољашње стране. Горњи резервоар на излазу (са његове доње стране) поседовао је испусну славину (9) – за случај хитног пражњења, као и зауставни вентил (10) – за случај хитног спречавања нежељене испоруке воде РСП. На излазу из РСП, постављен је косо ручни регулациони вентил (11) у циљу регулисања запреминског протока [138].

^{V-5)} Запремина горњег резервоара (пречника Ø800 mm) била је 250 l.

^{V-6)} Висина носача горњег резервоара износила је 1800 mm.

Вода из РСП истицала је у доњи резервоар^{V-7), V-8)} (12). Преко соларног одзрачног лончета (13) вршено је испуштање ваздуха из соларне инсталације. На самом улазу и излазу из РСП постојали су додатни куглични вентили (14) и (15). Pt-100 сонда (16) мерила је температуру воде на улазу у РСП, док је Pt-100 сонда (17) мерила температуру воде на излазу из РСП. Сигнал са Pt-100 сонди прикупљао је електро орман (18) који се налазио (испод РСП) на стабилном постољу (3) [138].

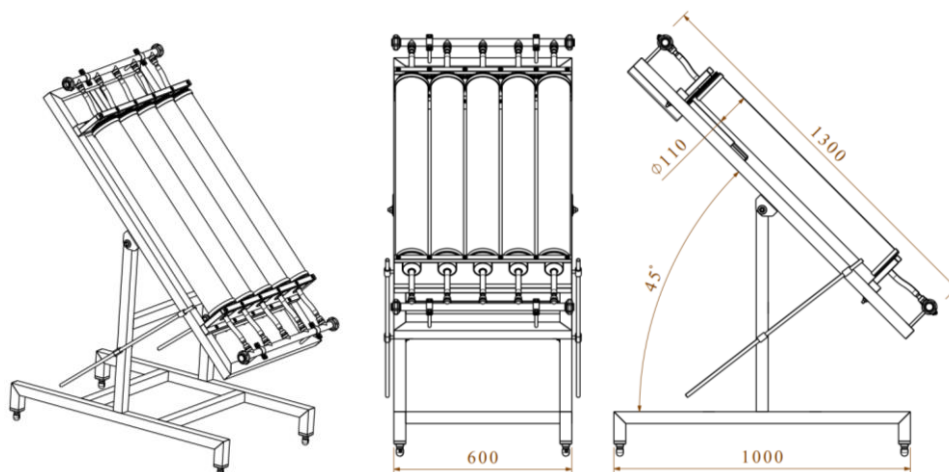
^{V-7)} Запремина доњег резервоара била је 50 l.

^{V-8)} Поглавље 7.5.1.

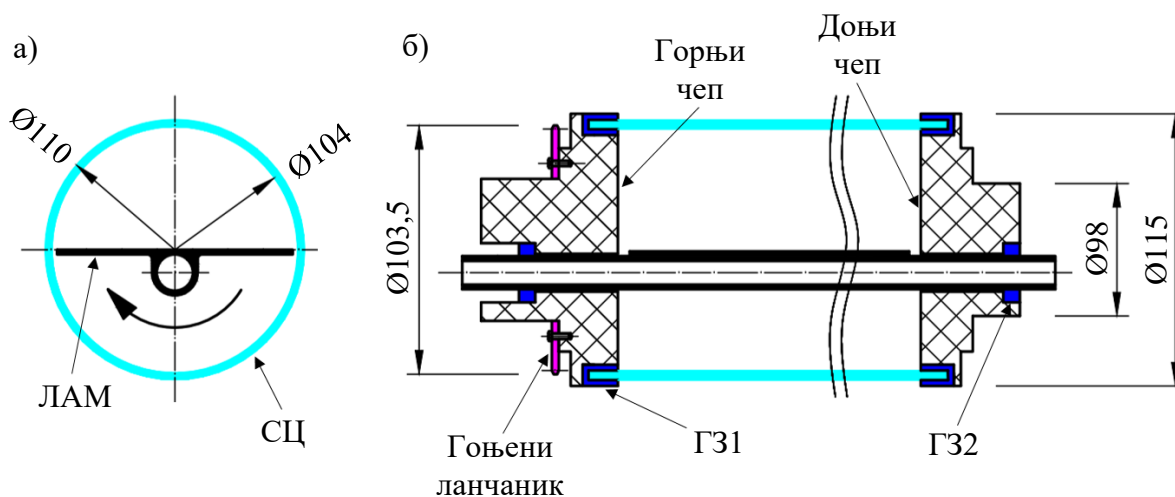
5.3 Дизајн РтАСП

5.3.1 Опис РтАСП конструкције

СП са ротационим апсорберима (РтАСП), спољашњих димензија $1300 \times 600 \times 205$ mm (Сл. 5.9), настао је комбиновањем различитих типова СП.



Слика 5.9 – Изометријски приказ РтАСП (лево) и његове ортогоналне пројекције (десно)



Слика 5.10 – Главне позиције РтА у конструкцији РтАСП
а) Попречни пресек; б) Уздужни пресек

Наиме, ексцентричним постављањем ламела (ЛАМ), са интегрисаним проточним каналима кружног попречног пресека са доње стране, унутар стаклених цеви (СЦ), настао је РтА – главна елементарна функционална целина РтАСП (Сл. 5.10, Таб. 5.4). Свака СЦ затворена је са два чепа: горњим и доњим. Гумена заптивка^{V-9)} 1 (ГЗ1)

^{V-9)} Гумене заптивке (ГЗ1 и ГЗ2) су специјално (наменски) дизајниране за потребе израде конструкције РтАСП.

посредовала је контакту стаклених цеви и чепова, док је гумена заптивка 2 (Г32) посредовала контакту ламела и чепова.

У циљу спречавања продирања ваздуха, влаге и прашине у РтА, поред чепова и заптивки, коришћен је и еластични силикон отпоран на временске прилике.

Табела 5.4 – Геометријске и термичке карактеристике РтАСП

Слој	Материјал	D_o/D_i [mm]	A [m ²]	d [mm]	k [W/mK]	τ [-]	a [-]	e [-]
Горњи чеп	Полиамид	115/98	0,038	58	0,27	-	-	-
Доњи чеп	Полиамид	115/98	0,038	42	0,27	-	-	-
ЛАМ	$Sn-Al_2O_3$	-	0,4	2	203	-	0,88	0,25
Гас	Ваздух	-	-	55	0,026	-	-	-
Прекривка	СЦ	110/104	1,45	3	0,8	0,9	-	0,9

Да би се омогућила циркулација воде кроз РтАСП, РтА су преко обртних спојница и флексибилних црева били повезани са разделником и сабирником. Прохромске цеви сабирника и разделника имале су пречник $\varnothing 25 \times 1,5$ mm, проточни канали унутар ламела, израђени од бакра, били су пречника $\varnothing 15 \times 1$ mm, а пречници флексибилних силиконских црева износили су $\varnothing 15 \times 1,5$ mm). Осно растојање између стаклених цеви износило је 125 mm.

5.3.2 Електро-механичка трансмисија

Примена специфичног рЈОП механизма^{V-10}, уз коришћење ланчаног преноса (са кораком 12,7 mm), омогућена је захваљујући вишенаменској функцији чепова (Сл. 5.11, Таб. 5.5):

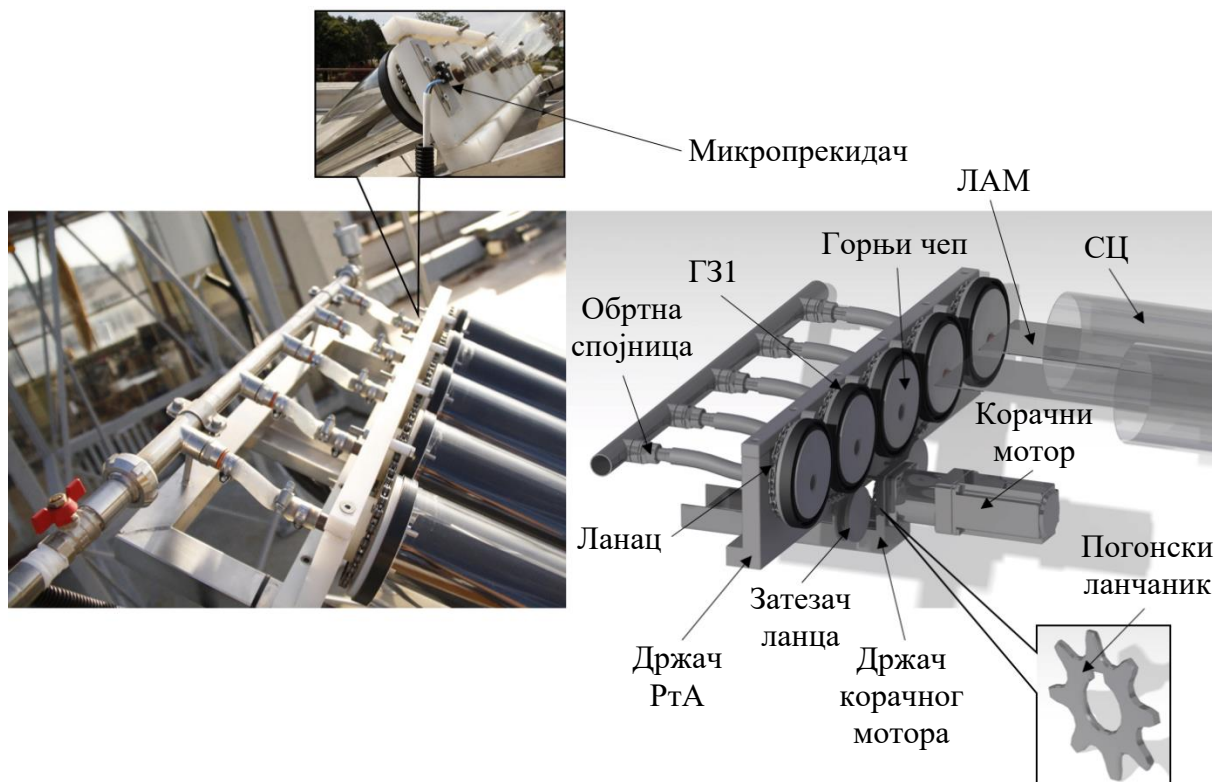
- Затварач РтА;
- Носач гоњених ланчаника (горњи чепови, Сл. 5.10);
- Носач РтА;
- Ослонац РтА;
- Функција радијалног клизног лежаја;
- Преносник снаге и обртног момента.

Улогу погонског агрегата, на коме се налазио погонски ланчаник, имао је хибридни корачни серво мотор (Сл. 5.11, Таб. 5.5). Мотор (снаге^{V-11}) 10 W) био је постављен испод РтА. Основна улога планетарног редуктора била је да уситни корак закретања (ротирања) РтА, са циљем да се обезбеди прецизна контрола праћења кретања положаја Сунца. Овај начин управљања обезбедио је (истовремено, истосмерно, са истом угаоном брзином) ротирање свих пет РтА (Сл. 5.9).

Многи технички проблеми у току саме израде РтАСП су превазиђени. Један од њих се односи на повезивање покретних (РтА) и непокретних (сабирник/разделник) елемената. Овај проблем је превазиђен конструисањем и употребом специјалних флексибилних (силиконских) црева и обртних спојница (Сл. 5.11).

^{V-10}) Поглавље 4.

^{V-11}) Снага хибридног корачног серво мотора димензионисана је према препорукама доступним у [139].



Слика 5.11 – Деталј рЈОП механизма за РтАСП

Табела 5.5 – Техничке карактеристике рЈОП механизма за РтАСП [140]

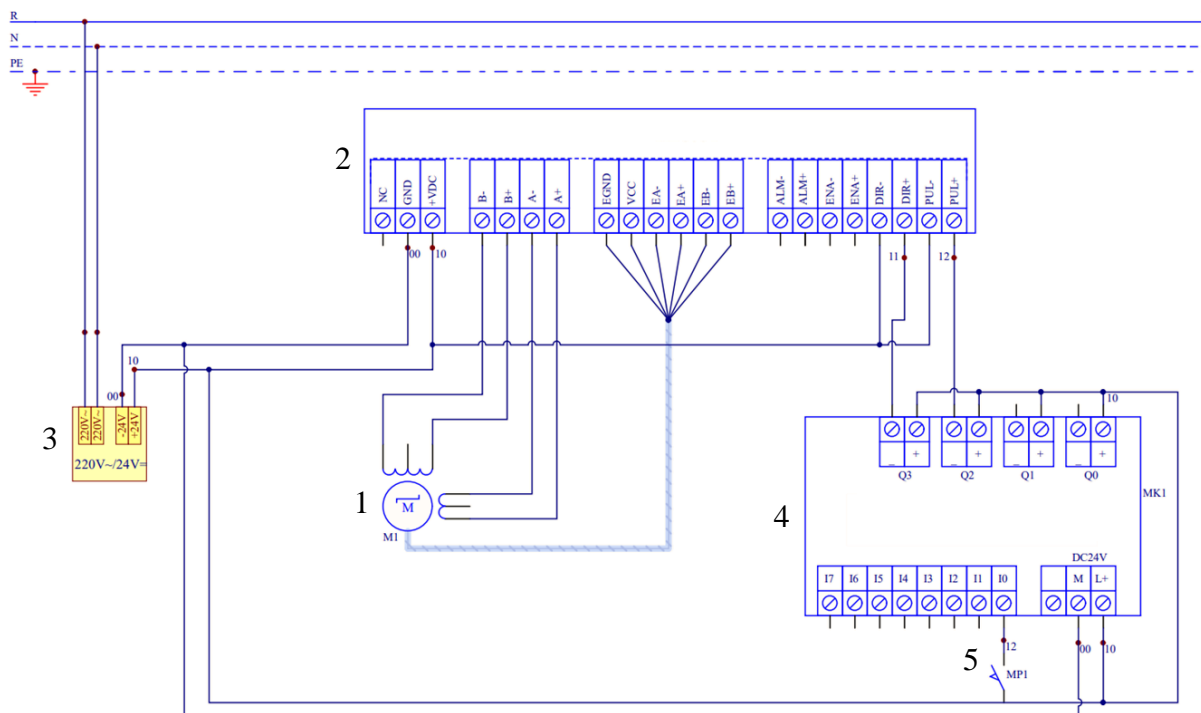
Елемент	Опис	n [-]	$D_{o(spr)}/D_{i(spr)}/d_{spr}$ [mm]
Погонски агрегат	Хибридни корачни серво мотор (HB808C+57HB250-80BJ)	1	-
	Планетарни редуктор (преносни однос 10:1)	1	-
Погонски ланчаник	SINOXX 4580 челик	1	39,39/25,44/2
Ланац	Једноредни ваљкасти ланац	1	-
Гоњени ланчаник	SINOXX 4580 челик	5	103,5/89,55/2

Улогу главног извршног органа^{V-12)} (почетног) стартовања и (крајњег) заустављања РтАСП (корачног мотора), током дана, имао је микропрекидач (5) на спољашњој страни држача РтА (Сл. 5.12). Радом микропрекидача управљао је логички контролер (4) по унапред дефинисаном распореду^{V-13)} (Сл. 5.13, Сл. 5.14). Логички контролер управљао је радом корачног мотора (1) и унутар самог распореда^{V-14)}, посредством управљача корачног мотора (2).

^{V-12)} Микропрекидач је одређивао почетни и крајњи положај РтАСП током дневног праћења кретања положаја Сунца.

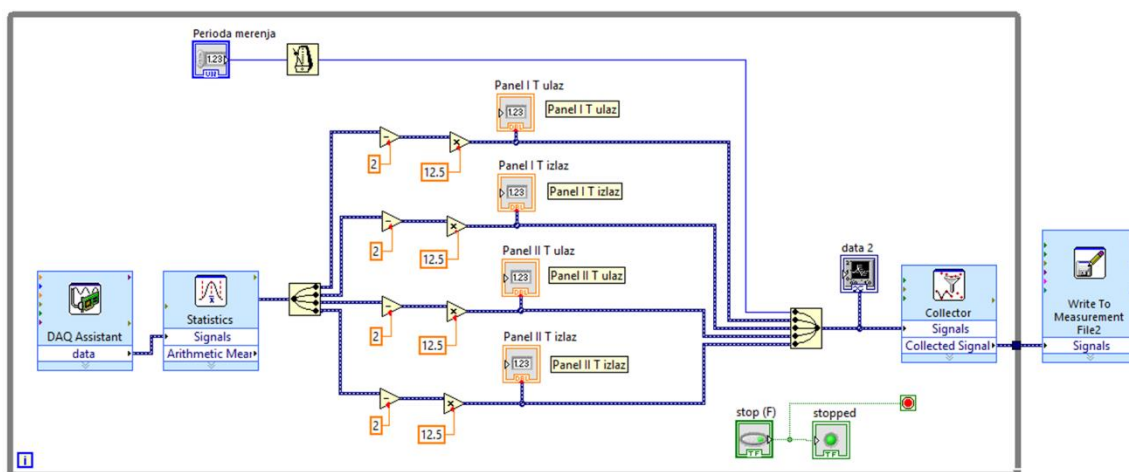
^{V-13)} „Радно време“ рЈОП механизма одређено је на основу реалне временске датотеке изласка и заласка Сунца доступне у [141].

^{V-14)} Поглавље 7.5.1.2 (Таб. 7.8).



Слика 5.12 – Електро шема рЈОП механизма за РтАСП

1 – Хибридни корачни серво мотор; 2 – Управљач хибридног корачног серво мотора;
3 – Исправљач; 4 – Логички контролер; 5 – Микропрекидач

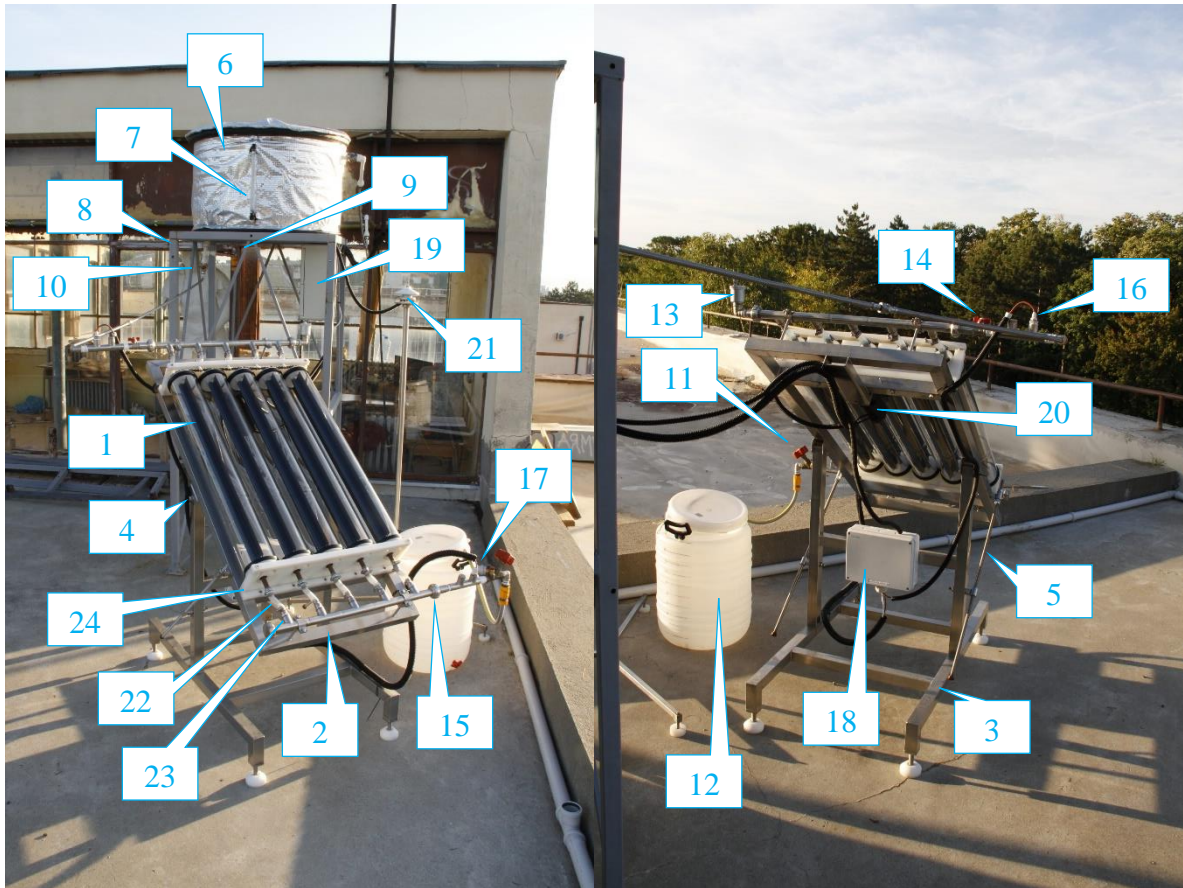


Слика 5.13 – Шема управљачког блока рЈОП механизма за РтАСП

5.3.3 РтАСП експериментална инсталација

Разлике између РСП (Сл. 5.8) и РтАСП (Сл. 5.14) огледале су се у следећој допунској опреми: употреби холендера (15) уместо кугличног вентила, додатног електро ормана 2 (19) за управљање радом хибридног корачног серво мотора (20), пиранометра^{V-15} (21) за мерење интензитета соларног зрачења у непосредној близини РтАСП, коришћењу силиконског (флексибилног) црева (22) и обртних спојница (23) у циљу повезивања покретних и непокретних елемената, као и пластичном држачу РтА (24).

^{V-15} Поглавље 7.5.



Слика 5.14 – Експериментална инсталација са РтАСП

1 – РтА (РтАСП); 2 – Носећи рам; 3 – Фиксно постоље; 4 – Зглобна веза; 5 – Навојне шипке; 6 – Горњи резервоар; 7 – Нивостат; 8 – Постоље горњег резервоара; 9 – Испусна славина; 10 – Зауставни вентил; 11 – Коси ручни регулациони вентил; 12 – Доњи резервоар; 13 – Соларно одзрачно лонче; 14 – Куглични вентил; 15 – Холендер; 16 и 17 – Рт-100 сонде; 18 – Електро орман 1; 19 – Електро орман 2; 20 – Корачни мотор; 21 – Пиранометар; 22 – Силиконско црево; 23 – Обртна спојница; 24 – Држач РтА (РтАСП)

Математички модели РСП и РТАСП

6.1 Соларно зрачење

6.1.1 Екстратерестријално и терестријално соларно зрачење

Просечно дневно екстратерестријално^{VI-1)} соларно зрачење H_o [W/m^2] (Јед. 6.1) [142, 143] је:

$$H_o = \frac{I_s}{\pi} (1 + 0,033 \cos(0,0172142 \text{ day})) (\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_{SS} + \omega_{SS} \sin \varphi \sin \delta) \quad (6.1)$$

где су: I_s [W/m^2] соларна константа, day [-] редни број дана у години, φ [°] географска ширина, δ [°] деклинација и ω_{SS} [°] часовни угао заласка Сунца.

Просечно дневно терестријално^{VI-2)} соларно зрачење H [W/m^2] (Јед. 6.2) [143, 144] је:

$$\frac{H}{H_o} = x' + b' \frac{S}{Z} \quad (6.2)$$

^{VI-1)} Екстратерестријално соларно зрачење дефинише се као соларна енергија на горњој површини Земљине атмосфере.

^{VI-2)} Терестријално соларно зрачење дефинише се као соларна енергија на површини Земље.

где су: x' [-] примарни коефицијент просечног дневног соларног зрачења (Јед. 6.3) [143, 145], b' [-] секундарни коефицијент просечног дневног соларног зрачења (Јед. 6.4) [143, 145], S [h] број јасних сунчаних сати током године и Z [h] трајање обданице током дана.

$$x' = -0,309 + 0,539 \cos \varphi - 0,0693 el + 0,29 \frac{S}{Z} \quad (6.3)$$

$$b' = 1,527 - 1,027 \cos \varphi - 0,0926 el - 0,359 \frac{S}{Z} \quad (6.4)$$

где је el [m] надморска висина за жељену локацију.

Веза између $\frac{I}{H}$ и $\frac{I_o}{H_o}$ дата је као (Јед. 6.5) [143, 146]:

$$\frac{I}{H} = (x'' + b'' \cos \omega) \frac{I_o}{H_o} \quad (6.5)$$

где су: I [W/m^2] тренутно (часовно) терестријално соларно зрачење, x'' [-] тренутни (часовни) примарни коефицијент (Јед. 6.6) [143, 146], b'' [-] тренутни (часовни) секундарни коефицијент (Јед. 6.7) [143, 146] и I_o [W/m^2] тренутно (часовно) екстратерестријално соларно зрачење (Јед. 6.8) [143, 147].

$$x'' = 0,409 + 0,5016 \sin \left(\omega_{ss} - \frac{\pi}{3} \right) \quad (6.6)$$

$$b'' = 0,6609 - 0,4767 \sin \left(\omega_{ss} - \frac{\pi}{3} \right) \quad (6.7)$$

$$I_o = I_s [1 + 0,033 \cos(0,0172142 \text{ day})] \cos \theta_z \quad (6.8)$$

6.1.2 Директно и дифузно соларно зрачење

Просечно дневно терестријално соларно зрачење, у општем случају, може се разложити на следеће две (основне) компоненте (Сл. 6.1) [5, 143]:

- Директно соларно зрачење H_{BEAM} [W/m^2] (зрачење које из тачкастог извора светлости, тј. Сунца, не наилази на било какву препреку у Земљиној атмосфери, па без распршивања, тј. директно, доспева на површину посматраног СП);
- Дифузно соларно зрачење H_{DIFF} [W/m^2] (зрачење које наилази на препреке у Земљиној атмосфери, па са распршивањем, из свих смерова^{VI-3)}, доспева на површину посматраног СП).

Однос просечног дневног терестријалног и екстратерестријалног соларног зрачења (Јед. 6.2) дефинише се и као индекс прозачности неба K [-] (Јед. 6.9) [13, 143]:

^{VI-3)} Дифузно соларно зрачење порекло води из следећих извора: небеске куполе (енгл. *sky dome*), небеског хоризонта (енгл. *sky horizon*) и уске области око директног соларног зрака (енгл. *circumsolar region*).

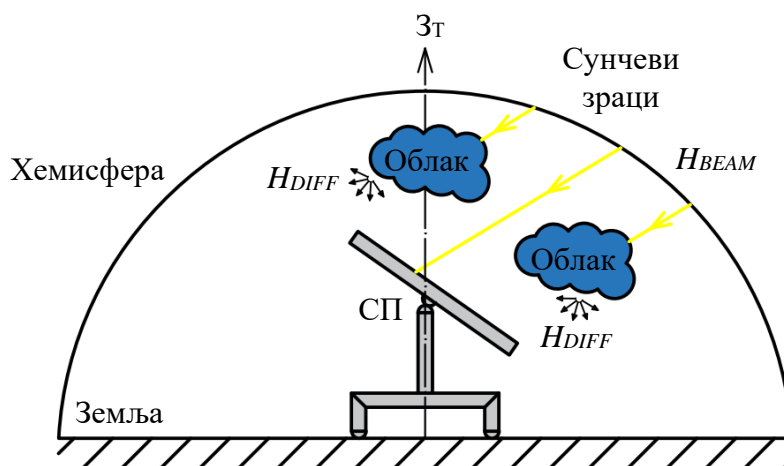
$$K = \frac{H}{H_0} \quad (6.9)$$

Однос просечног дневног дифузног и терестријалног соларног зрачења у функцији величине K [-] (Јед. 6.10) [143, 148] је:

$$\frac{H_{DIFF}}{H} = 0,974 + 0,693 K - 6,067 K^2 + 6,416 K^3 - 1,931 K^4 \quad (6.10)$$

Разлика просечног дневног терестријалног и дифузног зрачења одређује просечно дневно директно соларно зрачење H_{BEAM} [W/m²] (Јед. 6.11) [5, 13, 143, 148]:

$$H_{BEAM} = H - H_{DIFF} \quad (6.11)$$



Слика 6.1 – Директно и дифузно соларно зрачење

У случају да се ради о соларном зрачењу у било ком временском тренутку, (Јед. 6.9) трансформише се у (Јед. 6.12), (Јед. 6.10) у (Јед. 6.13), а (Јед. 6.11) у (Јед. 6.14) [5, 13, 143, 148]:

$$K = \frac{I}{I_0} \quad (6.12)$$

$$\frac{I_{DIFF}}{I} = 0,974 + 0,693 K - 6,067 K^2 + 6,416 K^3 - 1,931 K^4 \quad (6.13)$$

$$I_{BEAM} = I - I_{DIFF} \quad (6.14)$$

6.1.3 Апсорбовано соларно зрачење

6.1.3.1 Апсорбовано соларно зрачење за РСП

Укупна количина соларне енергије која бива апсорбована од стране РСП $I_{F,TOT}$ [W/m²] (Јед. 6.15, Сл. 6.2) једнака је збиру апсорбованог директног $I_{F,BEAM}$ [W/m²] (Јед.

6.16), апсорбованог дифузног^{VI-4)} $I_{F,DIFF}$ [W/m^2] (**Јед. 6.17**) и апсорбованог рефлектованог $I_{F,REFL}$ [W/m^2] (**Јед. 6.18**) соларног зрачења [5, 85, 93, 143, 149-153]:

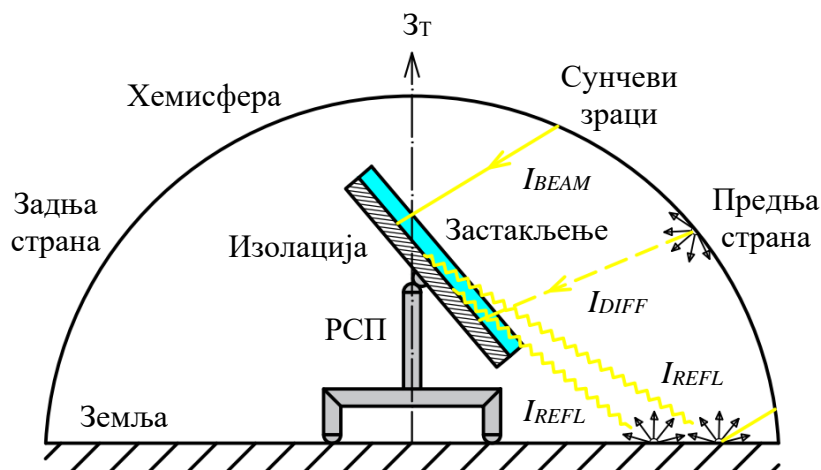
$$I_{F,TOT} = I_{F,BEAM} + I_{F,DIFF} + I_{F,REFL} \quad (6.15)$$

$$I_{F,BEAM} = (\tau\alpha)_{F,BEAM} I_{BEAM} \frac{\cos \theta_\beta}{\cos \theta_z} \quad (6.16)$$

$$I_{F,DIFF} = (\tau\alpha)_{F,DIFF} I_{DIFF} \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (6.17)$$

$$I_{F,REFL} = (\tau\alpha)_{F,REFL} alb_{F,REFL} (I_{BEAM} + I_{DIFF}) \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (6.18)$$

где су: $(\tau\alpha)_{F,BEAM}$ [-] оптичка ефикасност директног соларног зрачења за РСП, $\cos \theta_\beta$ [-] соларни упадни угао за РСП, $\cos \theta_z$ [-] соларни упадни угао за хоризонталну површину, $(\tau\alpha)_{F,DIFF}$ [-] оптичка ефикасност дифузног соларног зрачења за РСП, $(\tau\alpha)_{F,REFL}$ [-] оптичка ефикасност рефлектованог соларног зрачења за РСП и $alb_{F,ALB}$ [-] алbedo за РСП.



Слика 6.2 – Укупна апсорбована количина соларне енергије за РСП

Из (**Јед. 6.18**) лако се може закључити да је долазно рефлектовано соларно зрачење I_{REFL} [W/m^2] једнако збиру I_{BEAM} и I_{DIFF} (**Јед. 6.19**) [143, 149]:

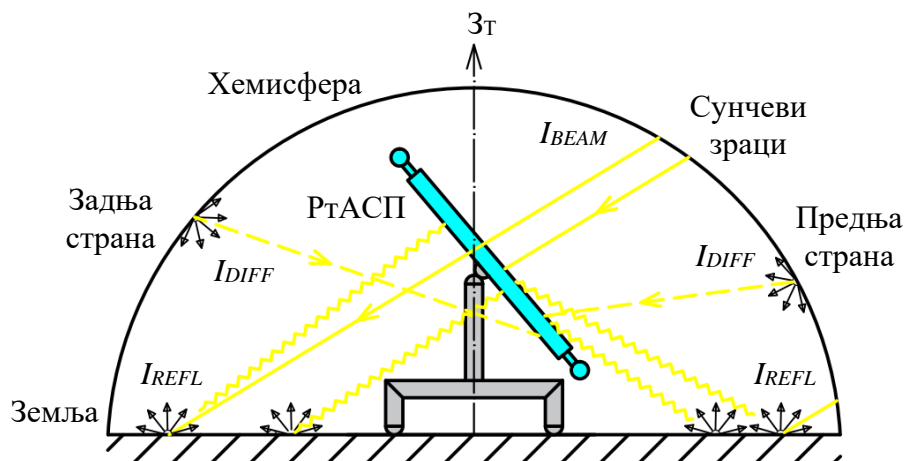
$$I_{REFL} = I_{BEAM} + I_{DIFF} \quad (6.19)$$

6.1.3.2 Апсорбовано соларно зрачење за РтАСП

Аналогно (**Јед. 6.15**), укупно апсорбовано соларно зрачење за РтАСП $I_{T,TOT}$ [W/m^2] (**Јед. 6.20**, **Сл. 6.3**) једнако је збиру апсорбованог директног $I_{T,BEAM}$ [W/m^2], апсорбованог дифузног $I_{T,DIFF}$ [W/m^2] и апсорбованог рефлектованог $I_{T,REFL}$ [W/m^2] соларног зрачења [5, 85, 93, 150-153]:

$$I_{T,TOT} = I_{T,BEAM} + I_{T,DIFF} + I_{T,REFL} \quad (6.20)$$

^{VI-4)} Дифузно соларно зрачење посматра се као изотропно, како за РСП, тако и за РтАСП.



Слика 6.3 – Укупна апсорбована количина соларне енергије за РтАСП

За разлику од РСП^{VI-5)} (Сл. 6.2), соларно зрачење на површину РтАСП пристиже и са задње стране (Сл. 6.3). Разлози су следећи:

- Стаклене цеви постављене су на одређеном међусобном осном растојању;
- Идејно решење конструкције РтАСП није подразумевало примену изолационих материјала^{VI-6)}.

Узимајући ове чињенице у обзир, као и рЈОП^{VI-7)} у правцу И-З око нагнуте С-Ј осе, $I_{T,BEAM}$ (Јед. 6.21), $I_{T,DIFF}$ (Јед. 6.22) и $I_{T,REFL}$ (Јед. 6.23) су [5, 85, 93, 150-153]:

$$I_{T,BEAM} = (\tau\alpha)_{T,BEAM} s_{T,BEAM} I_{BEAM} \frac{\cos \theta_{NS}}{\cos \theta_z} \quad (6.21)$$

$$I_{T,DIFF} = I_{T,DIFF(fs)} + I_{T,DIFF(bs)} \quad (6.22)$$

$$I_{T,REFL} = I_{T,REFL(fs)} + I_{T,REFL(bs)} \quad (6.23)$$

где су: $(\tau\alpha)_{T,BEAM}$ [-] оптичка ефикасност директног соларног зрачења за РтАСП, $s_{T,BEAM}$ [-] коефицијент соларног сенчења за РтАСП, $\cos \theta_{NS}$ [-] соларни упадни угао за РтАСП, $I_{T,DIFF(fs)}$ [W/m^2] апсорбовано дифузно соларно зрачење са предње стране РтАСП, $I_{T,DIFF(bs)}$ [W/m^2] апсорбовано дифузно соларно зрачење са задње стране РтАСП, $I_{T,REFL(fs)}$ [W/m^2] апсорбовано рефлектовано соларно зрачење са предње стране РтАСП и $I_{T,REFL(bs)}$ [W/m^2] апсорбовано рефлектовано соларно зрачење са задње стране РтАСП.

Међутим, у овом конкретном случају, долазно соларно зрачење са задње стране (компоненте $I_{T,DIFF(bs)}$ и $I_{T,REFL(bs)}$) може бити занемарено, узимајући у обзир следеће околности у којима је извршена експериментална^{VI-8)} фаза истраживања:

- Директна компонента соларног зрачења у занемарљивим износима успева да се пробије између стаклених цеви, и то искључиво у кратком временском периоду око соларног поднева;

^{VI-5)} РСП са задње стране поседује изолациони слој.

^{VI-6)} Поглавље 5.3.1.

^{VI-7)} Поглавље 4.

^{VI-8)} Поглавље 7.5.

- Износ долазног дифузног соларног зрачења са небеске куполе и небеског свода преполовљен је због постојања објекта^{VI-9)} иза РТАСП;
- Долазно рефлектовано соларно зрачење (збир долазног директног и долазног дифузног зрачења) умањено је за алbedo поменутог објекта.

Сада се (Јед. 6.22) трансформише у (Јед. 6.24), а (Јед. 6.23) у (Јед. 6.25) [5, 85, 93, 150-153]:

$$I_{T,DIFF} = I_{T,DIFF(fs)} = (\tau a)_{T,DIFF} VF_T I_{DIFF} \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (6.24)$$

$$I_{T,REFL} = I_{T,REFL(fs)} = (\tau a)_{T,REFL} alb_{T,REFL} VF_T I_{REFL} \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (6.25)$$

где су: $(\tau a)_{T,DIFF}$ [-] оптичка ефикасност дифузног соларног зрачења за РТАСП, VF_T [-] фактор облика за РТАСП, $(\tau a)_{T,REFL}$ [-] оптичка ефикасност рефлектованог соларног зрачења за РТАСП и $alb_{T,REFL}$ [-] алbedo за РТАСП.

Фактор облика^{VI-10)} VF_T (Јед. 6.26) веома је битан параметар у прорачунима $I_{T,DIFF}$ (Јед. 6.24) и $I_{T,REFL}$ (Јед. 6.25). У обзир узима енергију зрачења (фракцију) која се између суседних стаклених цеви у конструкцији РТАСП размењује путем исијавања [93]:

$$VF_T = \frac{\psi_1 + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{r_{T,GLT(o)}}{r_{T,LAM}} \right) (\psi_2 - \psi_1) + \frac{C_{T,GLT}}{2r_{T,LAM}} (\sin \psi_2 - \sin \psi_1)}{\pi} \quad (6.26)$$

где су: ψ_1 [°] угао потпуне соларне осунчаности за РТАСП, ψ_2 [°] угао потпуне соларне осенчености за РТАСП, $r_{T,GLT(o)}$ [m] спољашњи полупречник стаклене цеви за РТАСП, $r_{T,LAM}$ [m] полупречник ламеле за РТАСП и $C_{T,GLT}$ [m] међусобно осно растојање суседних стаклених цеви за РТАСП.

Одређивање интензитета I_{REFL} (Јед. 6.25) није једноставно као у случају РСП (Јед. 6.19). Ламеле које формирају РТАСП апсорберску површину, релативно мењају положај током дана једна у односу на другу, због чега се при одређивању ове компоненте соларног зрачења (Јед. 6.27) мора водити рачуна, да ли је РТАСП у потпуности (Сл. 6.4), или делимично (Сл. 6.5), изложен директном соларном зрачењу, односно, да ли ламеле у потпуности блокирају једна другу (Сл. 6.6):

$$I_{REFL} = \begin{cases} f(\overline{O_2 C_3}) = r_{T,LAM} & I_{BEAM}^{2r_{T,LAM}} + I_{DIFF}^{2r_{T,LAM}} & \text{за } |\psi| \leq |\psi_1| \\ f(\overline{O_2 F_2}, \overline{F_2 F_4}) = r_{T,LAM} & \left(I_{BEAM}^{\frac{F_2 F_4}{r_{T,LAM}}} + I_{DIFF}^{\frac{F_2 F_4}{r_{T,LAM}}} \right) + I_{DIFF}^{\frac{F_2 F_5}{r_{T,LAM}}} & \text{за } |\psi_2| < |\psi| < |\psi_1| \\ f(\overline{O_2 E_2}) = r_{T,LAM} & I_{DIFF}^{2r_{T,LAM}} & \text{за } |\psi_2| \leq |\psi| \end{cases} \quad (6.27)$$

Ако је РТАСП у потпуности изложен директном соларном зрачењу ($|\psi| \leq |\psi_1|$, Сл. 6.4), тада је I_{REFL} (Јед. 6.28). Када је $|\psi_2| \leq |\psi|$ (Сл. 6.6), онда је I_{REFL} (Јед. 6.29):

^{VI-9)} Поглавље 5.3.3.

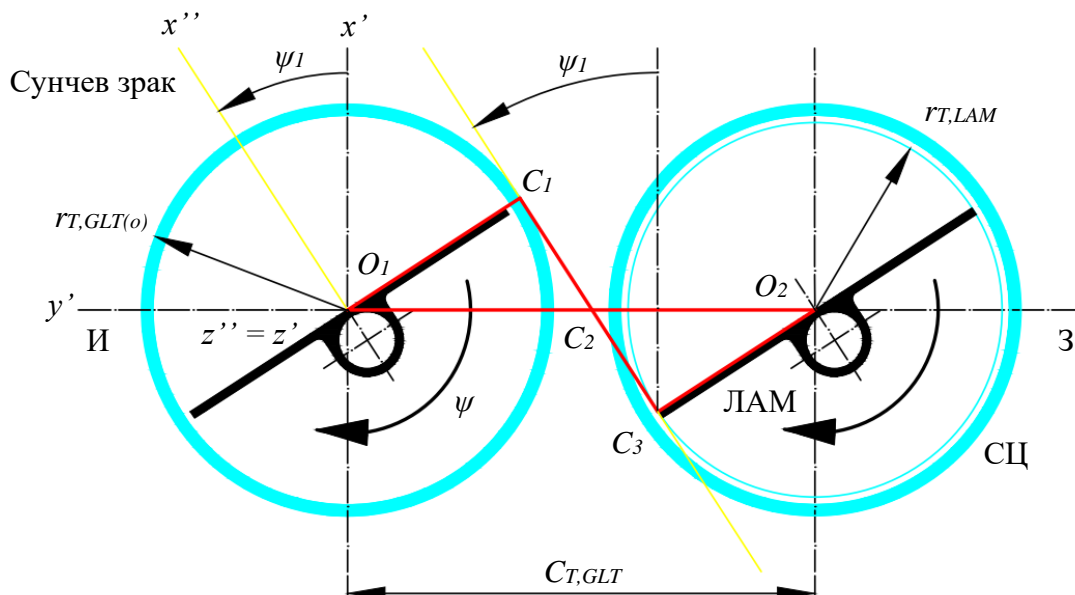
^{VI-10)} Енгл. *view factor*.

$$I_{REFL} = I_{BEAM} + I_{DIFF} \quad (6.28)$$

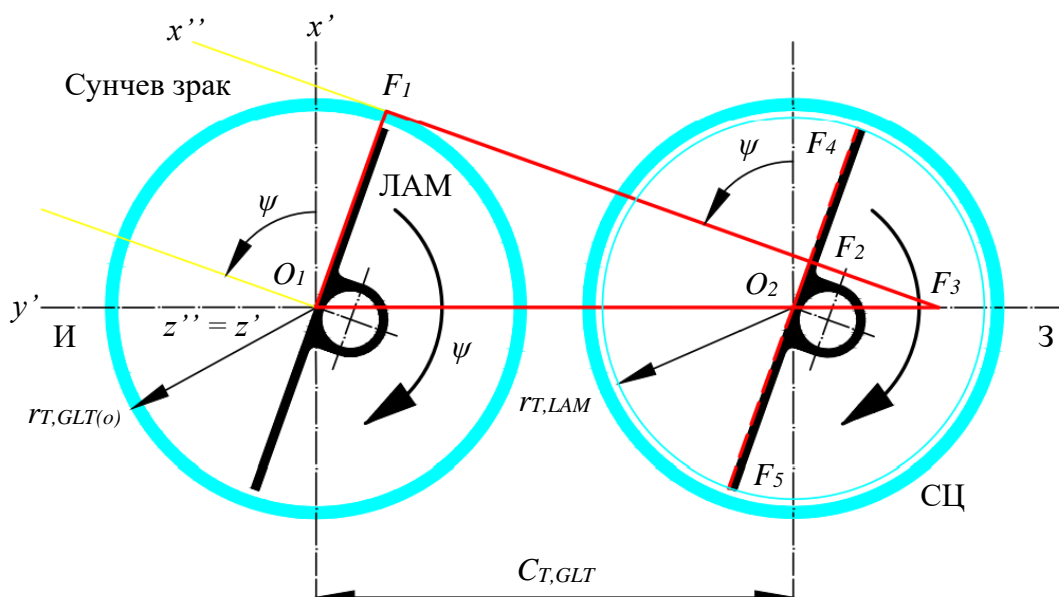
$$I_{REFL} = I_{DIFF} \quad (6.29)$$

У случајевима делимичне соларне осунчаности, тј. осенчености ($|\psi_2| < |\psi| < |\psi_1|$, Сл. 6.5, Јед. 6.30), на осунчани део примењује се (Јед. 6.28), док се на осенчени део примењује (Јед. 6.29):

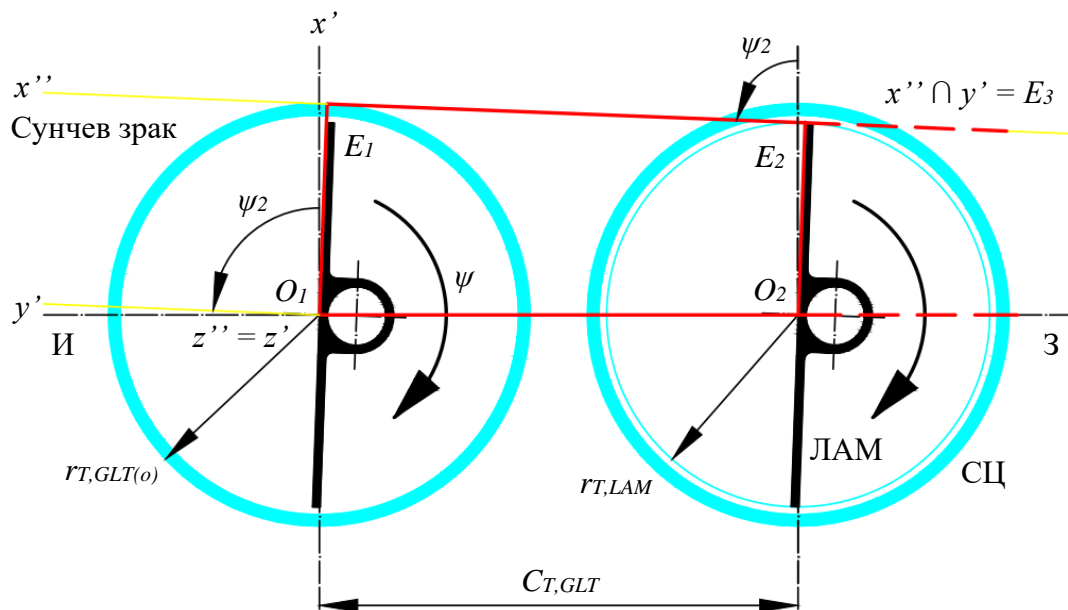
$$I_{REFL} = (I_{BEAM} + I_{DIFF})_{ОСУНЧАНО} + (I_{DIFF})_{ОСЕНЧЕНО} \quad (6.30)$$



Слика 6.4 – Период потпуне соларне осунчаности за РтАСП [85, 152, 154]



Слика 6.5 – Период делимичне соларне осунчаности за РтАСП [85, 152, 154]

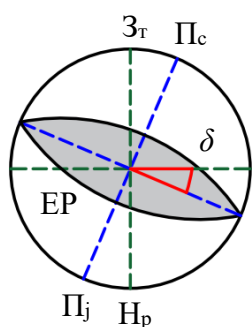


Слика 6.6 – Период потпуне соларне осенчености за РтАСП [85, 152, 154]

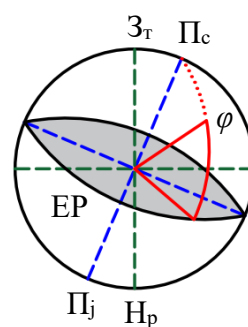
6.2 Соларна векторска алгебра и аналитичка геометрија

6.2.1 Соларни углови

Због Земљиног ротационог кретања око осе и око Сунца, као и „лоптастог“ облика, у соларној физици примењују се (соларни) сферни координатни системи. У сферним координатним системима, преко одговарајућих соларних углова^{VI-11)} (Сл. 6.7-6.14, Таб. 6.1), могуће је одредити, најпре (апсолутну) позицију средишта Земље у односу на средиште Сунца, а потом и (релативне) позиције посматраних СП у односу на средиште Земље [5, 13, 14, 143, 155].

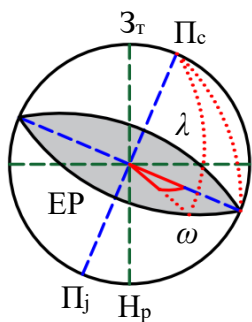


Слика 6.7 – Деклинација [155]

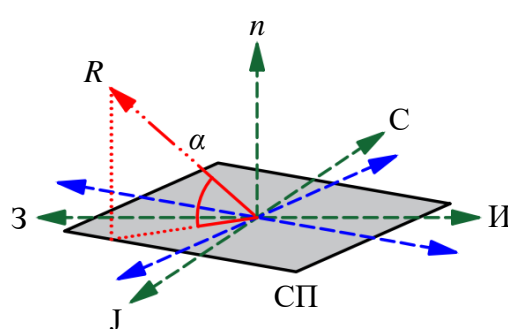


Слика 6.8 – Географска ширина [155]

Деклинација δ (Сл. 6.7) представља угао између екваторске равни (EP) која садржи средиште Земље и дужи која спаја средиште Земље и средиште Сунца. Географска ширина φ (Сл. 6.8) је угао између екваторске равни и дужи која спаја посматрану тачку на Земљиној површини и њено средиште [5, 13, 143, 155].



Слика 6.9 – Часовни угао и географска дужина [155]



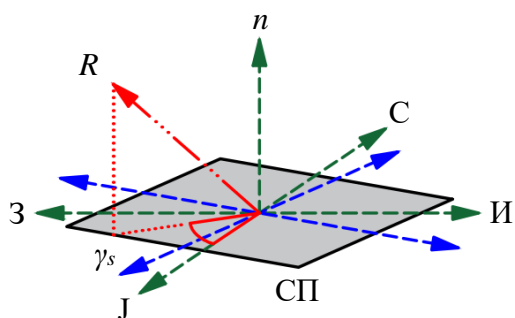
Слика 6.10 – Угао висине Сунца [155]

Часовни угао ω (Сл. 6.9) се дефинише као угао између локалне географске дужине и географске дужине у којој је Сунце у свом зениту. Географска дужина λ (Сл. 6.9) може се дефинисати као угаона удаљеност вертикалне равни која садржи средиште Земље и посматрану тачку од референтне вертикалне равни која садржи нулти меридијан^{VI-12)}.

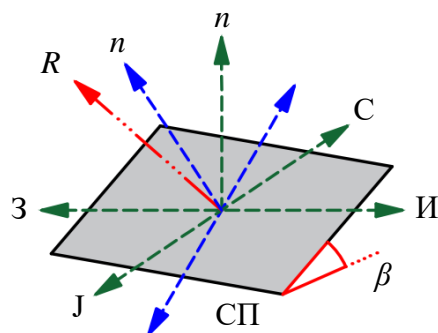
^{VI-11)} Соларни углови користе се у (соларним) сферним координатним системима за описивање сферних координата које се потом могу трансформисати у правоугле координате.

^{VI-12)} За нулти меридијан договором је узет меридијан који пролази кроз место Гринич у близини Лондона.

Угао висине Сунца α (Сл. 6.10) је угао који формирају Сунчеви зраци и њихова пројекција у хоризонтској^{VI-13)} равни [5, 13, 143, 155].

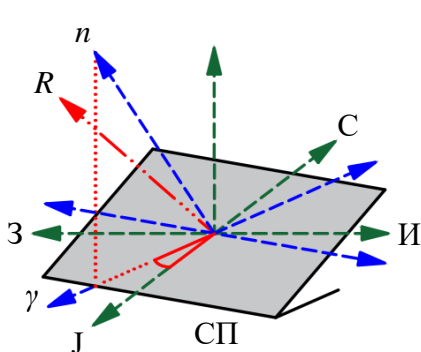


Слика 6.11 – Соларни азимутни угао [155]

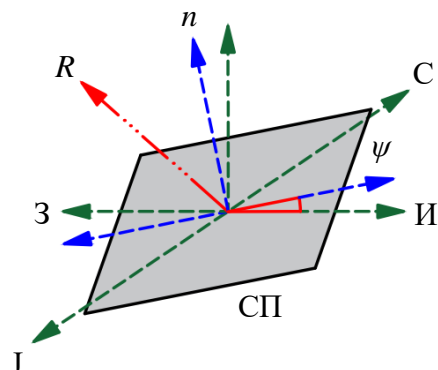


Слика 6.12 – Угао нагиба СП у правцу С-Ј [155]

Соларни азимутни угао γ_s (Сл. 6.11) одређен је С-Ј осом која се налази у хоризонтској равни и пројекцијом Сунчевих зрака на исту раван. Када се посматрана површина која лежи у хоризонтској равни закрене око И-З осе у истој равни, добија се угао нагиба СП у правцу С-Ј, тј. угао β (Сл. 6.12) [5, 13, 143, 155].



Слика 6.13 – Азимутни угао СП [155]



Слика 6.14 – Угао нагиба СП у правцу И-З [155]

Азимутни угао СП γ (Сл. 6.13) формирају пројекција вектора нормале на површину посматраног СП у хоризонтској равни и С-Ј оса у истој равни. Посматрана површина која се закреће око С-Ј осе у хоризонтској равни са истом формира угао нагиба СП у правцу И-З, тј. угао ψ (Сл. 6.14) [5, 13, 143, 155].

Деклинација и географска ширина (Таб. 6.1) узимају позитивне вредности за северну хемисферу. Часовни угао има предзнак „-“ у преподневним часовима, а достиже $\omega=0^\circ$ у тренутку када је Сунце у свом зениту – тренутак соларног поднева^{VI-14)} (тада је и $\gamma_s=0^\circ$). Локације источно од Гринича су са предзнаком „+“. Угао висине Сунца има негативне вредности за јужну хемисферу, а максималне апсолутне ($|a|$) вредности достижу се у тренутку соларног поднева. Посматрана површина у хоризонтској равни има угао нагиба

^{VI-13)} Хоризонтска раван је раван хоризонта. Она се налази у оку посматрача (у њој лежи СП). Може се поистоветити са хоризонталном равни.

^{VI-14)} Соларно подне се обично не поклапа са тренутком када часовник показује 12:00 h.

$\beta=0^\circ$, док је у вертикалној (у односу на хоризонтску) ова вредност $\beta=90^\circ$. Посматрана површина може заузимати било који положај у простору, па је $\gamma=0^\circ$ за случај да је она оријентисана ка југу (исток је негативан). Ако би посматрана површина пратила кретање Сунца током дана, тада би угао нагиба имао негативне вредности за период од изласка Сунца до $\omega=0^\circ$, а позитивне од $\omega=0^\circ$ па све до заласка [143, 155, 156].

Табела 6.1 – Соларни углови [143, 155, 156]

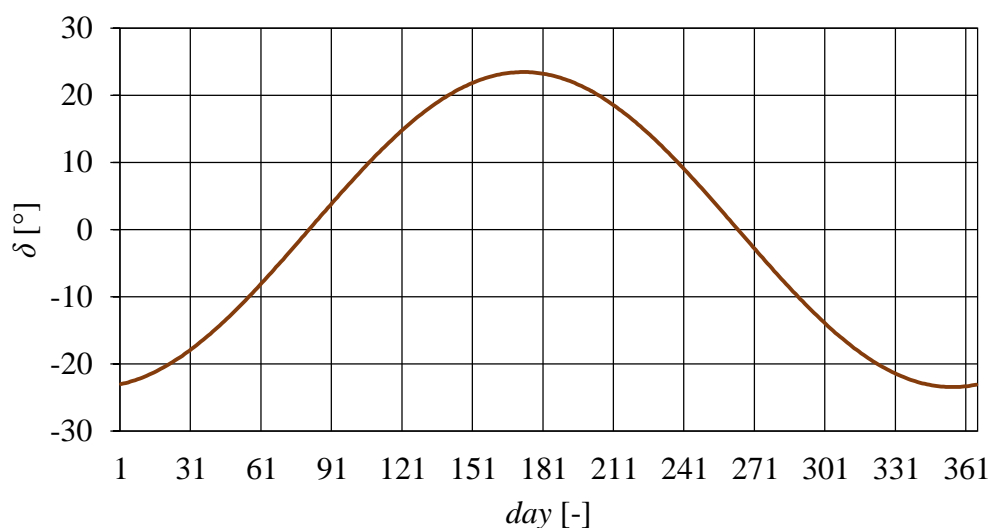
Назив	Ознака	Опис
Деклинација	δ [°]	$-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$
Географска ширина	φ [°]	$-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$
Часовни угао	ω [°]	$-180^\circ \leq \omega \leq 180^\circ$
Географска дужина	λ [°]	$-180^\circ \leq \lambda \leq 180^\circ$
Угао висине Сунца	α [°]	$ \alpha \leq 90^\circ$
Соларни азимутни угао	γ_s [°]	$-180^\circ \leq \gamma_s \leq 180^\circ$
Угао нагиба СП у правцу С-Ј	β [°]	$0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$
Азимутни угао СП	γ [°]	$-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$
Угао нагиба СП у правцу И-З	ψ [°]	$-90^\circ \leq \psi \leq 90^\circ$

Деклинација δ [°] може бити одређена (**Јед. 6.31, Сл. 6.15**), а часовни угао ω [°] (**Јед. 6.32**) [143, 155, 156]:

$$\delta = 23,45 \sin\left(360 \frac{284 + day}{365}\right) \quad (6.31)$$

$$\omega = 15\left(\frac{AST}{60} - 12\right) \quad (6.32)$$

где је day [-] редни број дана у години.



Слика 6.15 – Промена деклинације током године [13]

Са (Сл. 6.15) може се приметити да годишњу промену деклинације карактеришу четири битна датума: 21. јун (летња дугодневница, почетак лета, $\delta=23,45^\circ$), 21. децембар (зимска краткодневница, почетак зиме, $\delta=-23,45^\circ$), 21. март (пролећна равнодневница, почетак пролећа, $\delta=0^\circ$) и 20. септембар (јесења равнодневница, почетак јесени, $\delta=0^\circ$).

AST [min] (Јед. 6.32) је величина локалног соларног времена. Описана је стандардним меридијаном λ_{ST} [°], локалним меридијаном λ_{LOC} [°] и једначином времена E [min], односно (Јед. 6.33) [143, 155, 156]:

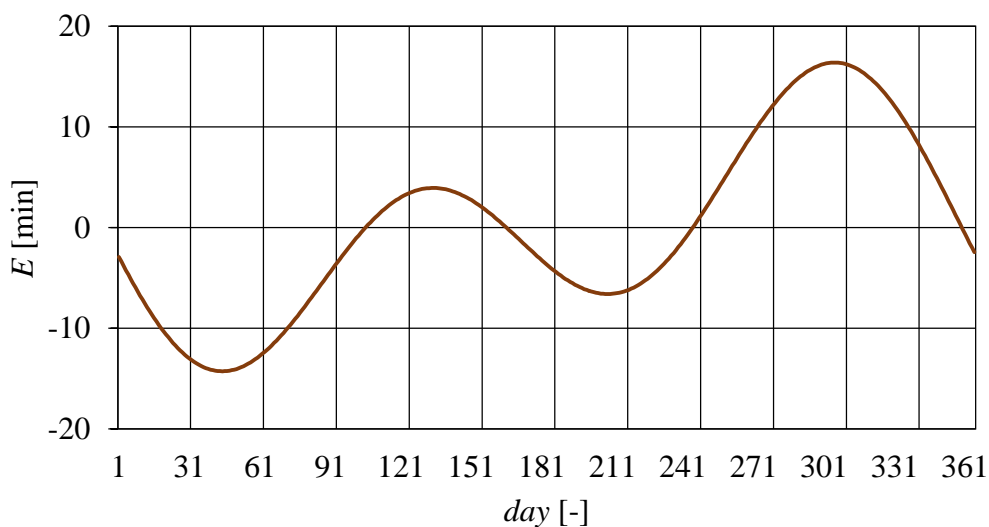
$$AST = CT - 4(\lambda_{ST} - \lambda_{LOC}) + E \quad (6.33)$$

где је CT [-] часовно време.

Једначина времена^{VI-15} E [min] (Јед. 6.33) зависи од коефицијента дана B [°], а у наставку су карактеристични обрасци за њихове прорачуне (Јед. 6.34, Јед. 6.35, Сл. 6.16) [143, 155, 156]:

$$E = 229,18 \begin{bmatrix} 0,000075 + 0,001868 \cos B - 0,032077 \sin B \\ -0,014615 \cos(2B) - 0,04089 \sin(2B) \end{bmatrix} \quad (6.34)$$

$$B = (day - 1) \frac{360}{365} \quad (6.35)$$



Слика 6.16 – Једначина времена [13]

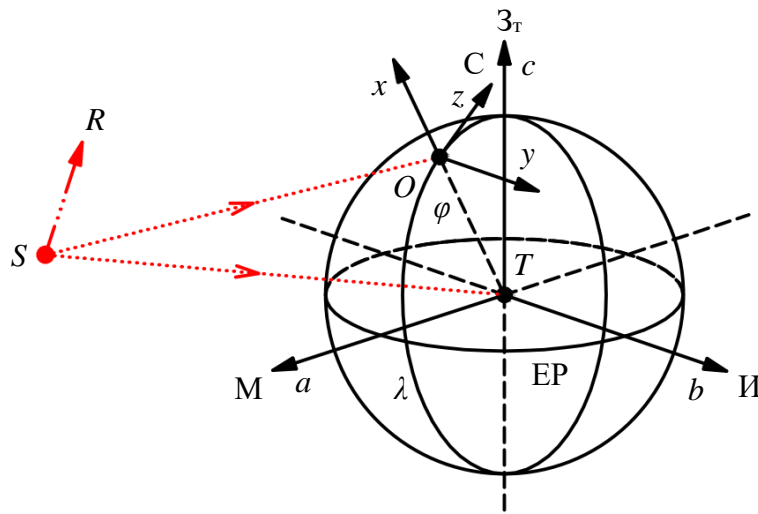
Једначина времена (Сл. 6.16) на годишњем нивоу четири пута сече апсису (16. април, 15. јун, 3. септембар и 26. децембар). Максимално позитивно одступање је 16,39 минута (2. новембар), док је максимално негативно одступање -14,27 минута (14. фебруар).

^{VI-15} Једначина времена показује разлику између соларног времена и средњег соларног времена због постојања разлике у брзини привидног кретања положаја Сунца. Ова разлика никада не прелази вредност од 17 минута.

6.2.2 Сферни координатни системи

У соларној физици користе се два сферна координатна система^{VI-16} (Сл. 6.17) [143, 155, 156]:

- Екваторски (основни, базни) $Tabc$ сферни координатни систем (тачка T представља координатни почетак у средишту Земље, a оса показује смер^{VI-17} λ , b оса смер И, c оса је управна^{VI-18}) на раван коју граде осе a и b);
- Хоризонтски $Oxyz$ сферни координатни систем (тачка O представља координатни почетак у средишту СП на површини Земље, y оса има исти смер као b оса, z оса показује смер С, x оса у негативном смеру пролази кроз координатни почетак екваторског $Tabc$ сферног координатног система, док у позитивном смеру показује правац нормале на раван коју праве осе y и z).



Слика 6.17 – Екваторски $Tabc$ сферни координатни систем, хоризонтски $Oxyz$ сферни координатни систем и вектор положаја Сунца у простору [155]

За приказивање произвољно постављеног вектора положаја Сунца R у простору користе се оба сферна координатна система (Сл. 6.17).

Правоугле координате вектора R_T у екваторском $Tabc$ сферном координатном систему^{VI-19}, применом векторске алгебре [157] и аналитичке геометрије [158], су (Јед. 6.36, Сл. 6.18) [155, 156]:

$$R_T = [R_{T-a}, R_{T-b}, R_{T-c}]^T = \begin{bmatrix} R_{T-a} \\ R_{T-b} \\ R_{T-c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta \cos \omega \\ \cos \delta \sin \omega \\ \sin \delta \end{bmatrix} \quad (6.36)$$

Правоугле координате вектора R_O , аналогно (Јед. 6.36), могу бити представљене и у хоризонтском $Oxyz$ сферном координатном систему (Јед. 6.37, Сл. 6.19) [155, 156]:

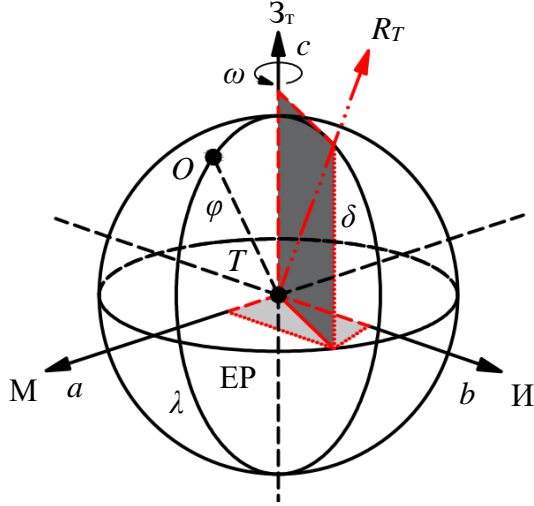
^{VI-16} Сферни координатни систем користе се за описивање лоптастих, ротационих тела.

^{VI-17} Оса a показује меридијански смер (смер М).

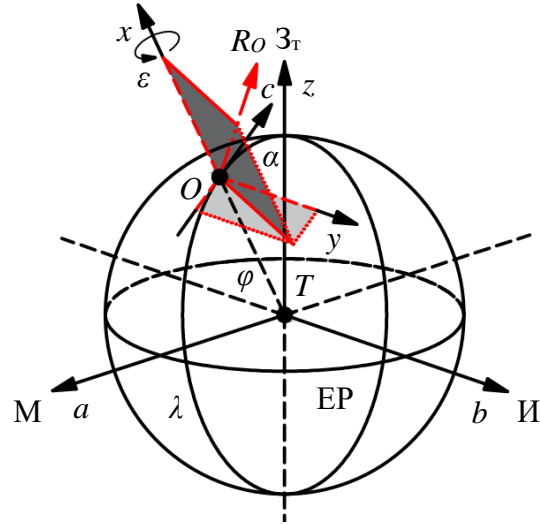
^{VI-18} Оса c показује смер Z_r .

^{VI-19} Транслаторним премештањем вектора положаја Сунца у тачку T (тачку O) омогућена је примена екваторског $Tabc$ (хоризонтског $Oxyz$) сферног координатног система.

$$R_O = [R_{O-x}, R_{O-y}, R_{O-z}]^T = \begin{bmatrix} R_{O-x} \\ R_{O-y} \\ R_{O-z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \alpha \\ -\cos \alpha \sin \varepsilon \\ \cos \alpha \cos \varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ -\cos \alpha \sin \varepsilon \\ \cos \alpha \cos \varepsilon \end{bmatrix} \quad (6.37)$$



Слика 6.18 – Разлагање вектора положаја Сунца у екваторском $Tabc$ сферном координатном систему [155]



Слика 6.19 – Разлагање вектора положаја Сунца у хоризонтском $Oxyz$ сферном координатном систему [155]

За разлику од вектора R (R_O , R_T), вектор нормале n на површини СП могуће је приказати само у хоризонтском $Oxyz$ сферном координатном систему [155].

Најпре се дефинише почетни јединични вектор нормале n_O на површини СП који се налази у хоризонтској равни (Јед. 6.38-6.41) [155, 156]:

$$n_O = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.38)$$

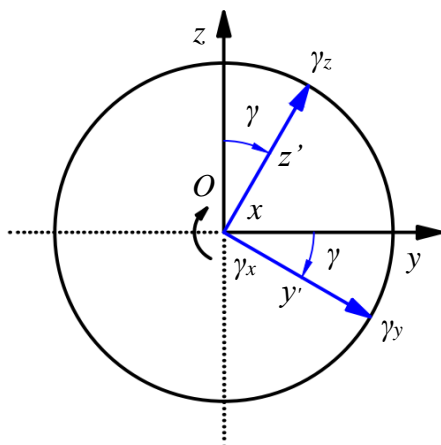
$$n_x = [1,0,0]^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.39)$$

$$n_y = [0,1,0]^T = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.40)$$

$$n_z = [0,0,1]^T = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6.41)$$

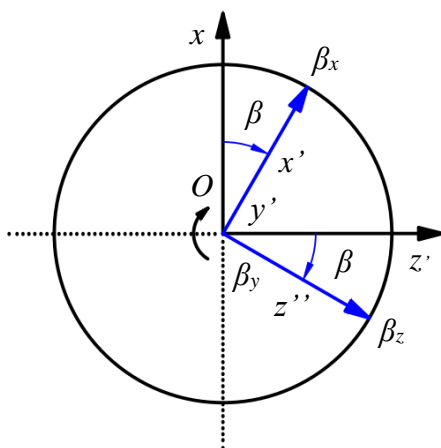
Ротирањем вектора n_0 [155, 156], прво око $-x$ осе за угао γ (Јед. 6.42, Сл. 6.20), па око нове $-y'$ осе за угао β (Јед. 6.43, Сл. 6.21), и на крају око нове $-z''$ осе за угао ψ (Јед. 6.44, Сл. 6.22), формирају се одговарајуће матрице $[\gamma]$, $[\beta]$ и $[\psi]$:

$$[\gamma] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (6.42)$$



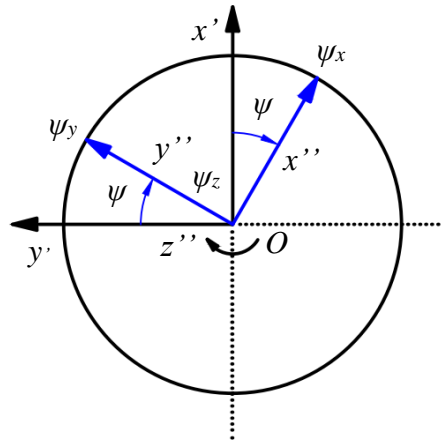
Слика 6.20 – Ротирање почетног јединичног вектора нормале око $-x$ осе у хоризонтском $Oxyz$ сферном координатном систему [155]

$$[\beta] = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (6.43)$$



Слика 6.21 – Ротирање јединичног вектора нормале око нове $-y'$ осе у хоризонтском $Oxy'z'$ сферном координатном систему [155]

$$[\psi] = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.44)$$



Слика 6.22 – Ротирање јединичног вектора нормале око нове $-z''$ осе у хоризонтском $Ox'y'z''$ сферном координатном систему [155]

Множењем матрица $[\gamma]$ (Јед. 6.42), $[\beta]$ (Јед. 6.43) и $[\psi]$ (Јед. 6.44) формира се нова матрица $[n']$ (Јед. 6.45) [155, 156]:

$$[n'] = [\gamma][\beta][\psi] = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \psi & -\cos \beta \sin \psi & \sin \beta \\ \sin \gamma \sin \beta \cos \psi + \cos \gamma \sin \psi & -\sin \gamma \sin \beta \sin \psi + \cos \gamma \cos \psi & -\sin \gamma \cos \beta \\ -\cos \gamma \sin \beta \cos \psi + \sin \gamma \sin \psi & \cos \gamma \sin \beta \sin \psi + \sin \gamma \cos \psi & \cos \gamma \cos \beta \end{bmatrix} \quad (6.45)$$

Даљим множењем $[n']$ (Јед. 6.45) са правоуглим координатама n_O (Јед. 6.38-6.41) долази се до правоуглих координата n (Јед. 6.46-6.49) [155, 156]:

$$n = [n'_x, n'_y, n'_z]^T = \begin{bmatrix} n'_x \\ n'_y \\ n'_z \end{bmatrix} = [n'] \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} \quad (6.46)$$

$$n'_x = [n'] \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \psi \\ \sin \gamma \sin \beta \cos \psi + \cos \gamma \sin \psi \\ -\cos \gamma \sin \beta \cos \psi + \sin \gamma \sin \psi \end{bmatrix} \quad (6.47)$$

$$n'_y = [n'] \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \beta \sin \psi \\ -\sin \gamma \sin \beta \sin \psi + \cos \gamma \cos \psi \\ \cos \gamma \sin \beta \sin \psi + \sin \gamma \cos \psi \end{bmatrix} \quad (6.48)$$

$$n'_z = [n'] \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \beta \\ -\sin \gamma \cos \beta \\ \cos \gamma \cos \beta \end{bmatrix} \quad (6.49)$$

Скаларни производ^{VI-20)} $n=[n'_x, n'_y, n'_z]^T$ (Јед. 6.47-6.49) и матрице $[R]$ одређује јединични соларни вектор $S=[S_x, S_y, S_z]^T$ (Јед. 6.50-6.53) [155, 156]:

$$S = [S_x, S_y, S_z]^T = R \bullet \begin{bmatrix} n'_x \\ n'_y \\ n'_z \end{bmatrix} \quad (6.50)$$

$$S_x = R \bullet n'_x \quad (6.51)$$

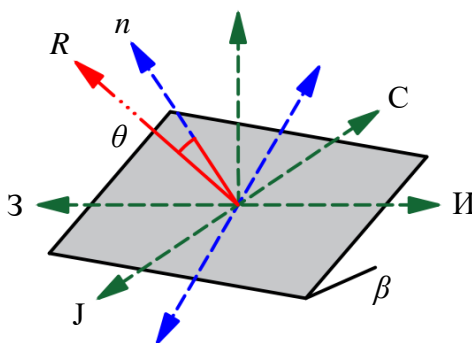
$$S_y = R \bullet n'_y \quad (6.52)$$

$$S_z = R \bullet n'_z \quad (6.53)$$

6.2.3 Соларни упадни угао

6.2.3.1 Соларни упадни угао за фиксне равне соларне пријемнике

Према *Lambert*-овом закону^{VI-21)} [5], соларни упадни угао $\cos\theta$ [-] формирају вектор положаја Сунца R и вектор нормале n на произвољно постављеној (у овом случају) фиксној равној површини СП. Соларни упадни угао графички је приказан на (Сл. 6.23).



Слика 6.23 – Соларни упадни угао [155]

Соларни упадни угао $\cos\theta$ [-] математички се може записати као (Јед. 6.54) [15, 155, 156]:

$$\cos\theta = f(R, n) = R \bullet n \quad (6.54)$$

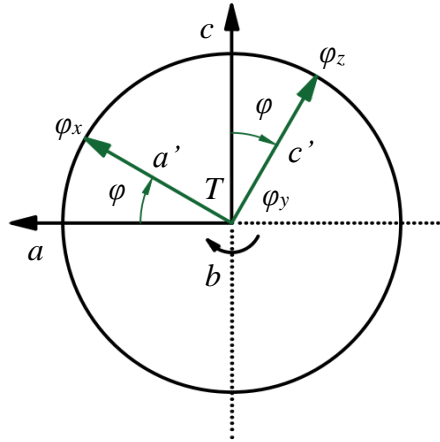
Како тачка O у хоризонтском $Oxyz$ сферном координатном систему може заузимати било које φ (Сл. 6.17, Сл. 6.19) за исто λ (у односу на тачку T у екваторском $Tabc$ координатном систему), вектор R (Јед. 6.56) се за жељену, тј. произвољну, локацију на површини Земље рачуна као производ матрице $[\varphi]$ (Јед. 6.55, Сл. 6.24) са координатама R_T (Јед. 6.36) [15, 155, 156]:

^{VI-20)} Енгл. *dot product*.

^{VI-21)} *Lambert*-ов закон се примењује у случајевима када је удео директног I_{BEAM} соларног зрачења далеко већи од удела дифузног I_{DIFF} соларног зрачења у укупном соларном износу I_{TOT} .

$$[\varphi] = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (6.55)$$

$$R = [\varphi] \begin{bmatrix} R_{T-a} \\ R_{T-b} \\ R_{T-c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta \\ \cos \delta \sin \omega \\ -\sin \varphi \cos \delta \cos \omega + \cos \varphi \sin \delta \end{bmatrix} \quad (6.56)$$



Слика 6.24 – Ротирање вектора положаја Сунца око $-b$ осе у екваторском $Tabc$ сферном координатном систему [155]

Узимајући у обзир да је у хоризонтском $Oxyz$ сферном координатном систему координата $R_{O-x} = \cos \theta$ (Јед. 6.36), закључује се да је угао $\cos \theta$ (Јед. 6.57) одређен производом $S_x = R \cdot n'_x$ [15, 155, 156]:

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta \\ \cos \delta \sin \omega \\ -\sin \varphi \cos \delta \cos \omega + \cos \varphi \sin \delta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \psi \\ \sin \gamma \sin \beta \cos \psi + \cos \gamma \sin \psi \\ -\cos \gamma \sin \beta \cos \psi + \sin \gamma \sin \psi \end{bmatrix} = \\ &= \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \cos \beta \cos \psi + \sin \varphi \sin \delta \cos \beta \cos \psi + \\ &+ \cos \delta \sin \omega \sin \gamma \sin \beta \cos \psi + \cos \delta \sin \omega \cos \gamma \sin \psi + \\ &+ \sin \varphi \cos \delta \cos \omega \cos \gamma \sin \beta \cos \psi - \sin \varphi \cos \delta \cos \omega \sin \gamma \sin \psi - \\ &- \cos \varphi \sin \delta \cos \gamma \sin \beta \cos \psi + \cos \varphi \sin \delta \sin \gamma \sin \psi \end{aligned} \quad (6.57)$$

За различите случајеве постављања фиксног равног СП, вредности углова $\cos \theta$ редом су (Јед. 6.58-6.64) [15, 155, 156]:

$$\begin{aligned} \cos \theta_{\beta\gamma} &= \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \cos \beta + \sin \varphi \sin \delta \cos \beta + \\ &+ \cos \delta \sin \omega \sin \gamma \sin \beta + \sin \varphi \cos \delta \cos \omega \cos \gamma \sin \beta - \quad \text{за } \psi = 0^\circ \quad (6.58) \\ &- \cos \varphi \sin \delta \cos \gamma \sin \beta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \cos \theta_{\beta\psi} = & \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \cos \beta \cos \psi + \sin \varphi \sin \delta \cos \beta \cos \psi + \\ & + \cos \delta \sin \omega \sin \psi + \sin \varphi \cos \delta \cos \omega \sin \beta \cos \psi - \quad \text{за } \gamma = 0^\circ \quad (6.59) \\ & - \cos \varphi \sin \delta \sin \beta \cos \psi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \cos \theta_{\gamma\psi} = & \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \cos \psi + \sin \varphi \sin \delta \cos \psi + \\ & + \cos \delta \sin \omega \cos \gamma \sin \psi - \sin \varphi \cos \delta \cos \omega \sin \gamma \sin \psi - \quad \text{за } \beta = 0^\circ \quad (6.60) \\ & + \cos \varphi \sin \delta \sin \gamma \sin \psi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \cos \theta_{\beta} = & \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \cos \beta + \sin \varphi \sin \delta \cos \beta + \\ & + \sin \varphi \cos \delta \cos \omega \sin \beta - \cos \varphi \sin \delta \sin \beta \quad \text{за } \psi = 0^\circ \wedge \gamma = 0^\circ \quad (6.61) \end{aligned}$$

$$\cos \theta_{\gamma} = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta \quad \text{за } \psi = 0^\circ \wedge \beta = 0^\circ \quad (6.62)$$

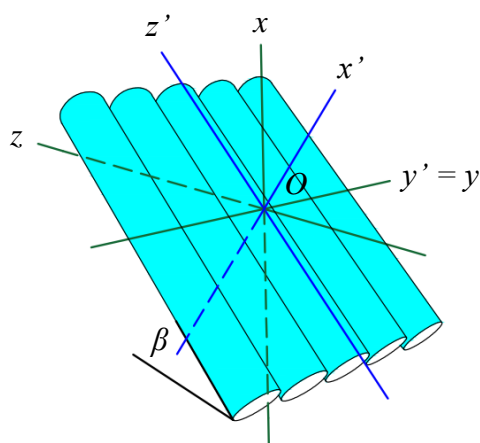
$$\begin{aligned} \cos \theta_{\psi} = & \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \cos \psi + \sin \varphi \sin \delta \cos \psi + \\ & + \cos \delta \sin \omega \sin \psi \quad \text{за } \gamma = 0^\circ \wedge \beta = 0^\circ \quad (6.63) \end{aligned}$$

$$\cos \theta_z = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta \quad \text{за } \psi = 0^\circ \wedge \gamma = 0^\circ \wedge \beta = 0^\circ \quad (6.64)$$

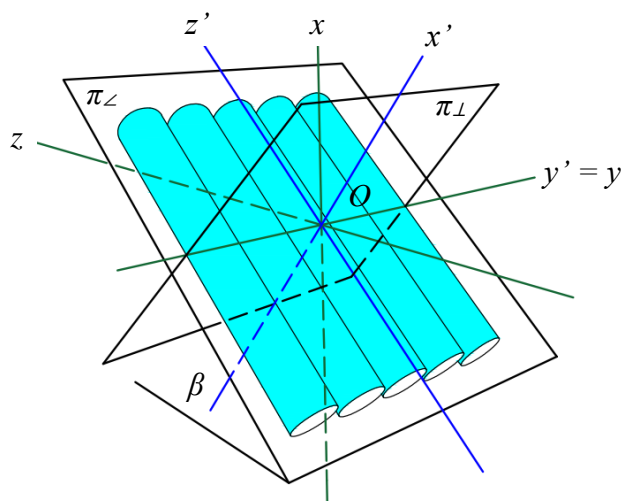
6.2.3.2 Соларни упадни угао за фиксне цевасте соларне пријемнике

Фиксни цевасте СП (Сл. 6.25), за разлику од фиксних равних СП (Сл. 6.23), у свом склопу поседују стаклене цеви кружног попречног пресека, па се за анализу долазног соларног зрачења код оваквих конструкција користе две равни (Сл. 6.26) [14, 15]:

- Подужна (уздужна) π_{\perp} раван (формирају је осе x' и z' , садржи осу стаклене цеви, прати оријентацију СП у зависности од углова γ, β, ψ);
- Попречна (управна) π_{\perp} раван (формирају је осе x' и $y'=y$, управна је на уздужну раван, садржи попречни пресек стаклене цеви).



Слика 6.25 – Фиксни цеваст СП [14, 15]



Слика 6.26 – Уздужна и попречна раван [14, 15]

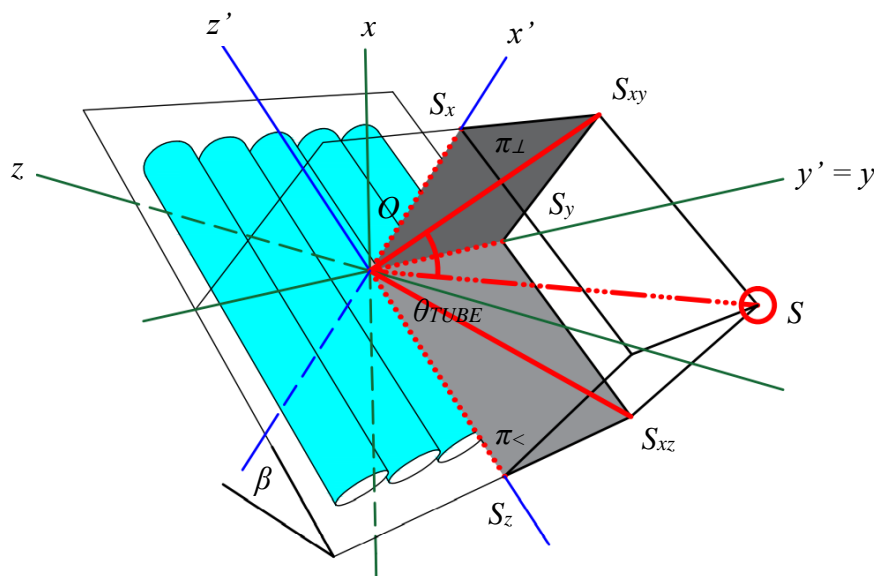
Јединични соларни вектор S (Јед. 6.50) може се разложити, тј. пројектовати у подужној π_{\perp} (Јед. 6.65), односно у попречној π_{\perp} (Јед. 6.66), равни [14, 15, 156]:

$$S_{xz} = [S_x, 0, S_z]^T = \begin{bmatrix} S_x \\ 0 \\ S_z \end{bmatrix} \quad (6.65)$$

$$S_{xy} = [S_x, S_y, 0]^T = \begin{bmatrix} S_x \\ S_y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.66)$$

Према препорукама доступним у [159], соларни упадни угао $\cos\theta_{TUBE}$ [-] за фиксне цевасте СП одређује се као скаларни производ вектора S и пројекције вектора S_{xy} у попречној π_{\perp} равни, односно као (Јед. 6.67, Сл. 6.27):

$$\cos\theta_{TUBE} = \frac{\begin{bmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_x \\ S_y \\ 0 \end{bmatrix}}{\sqrt{(S_x)^2 + (S_y)^2}} = \frac{(S_x)^2 + (S_y)^2}{\sqrt{(S_x)^2 + (S_y)^2}} = \sqrt{(S_x)^2 + (S_y)^2} \quad (6.67)$$



Слика 6.27 – Разлагање јединичног соларног вектора у уздужној и попречној равни [14, 15]

Ако се усвоји да је $\psi=0^\circ$ и $\gamma=0^\circ$ (фиксни цеваст СП оријентисан ка југу), тада се једначина за S_x (Јед. 6.51) трансформише у (Јед. 6.68), док се једначина за S_y (Јед. 6.52) трансформише у (Јед. 6.69) [14, 15, 156]:

$$S_x = R \cdot n'_x = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta \\ \cos \delta \sin \omega \\ -\sin \varphi \cos \delta \cos \omega + \cos \varphi \sin \delta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta \\ 0 \\ -\sin \beta \end{bmatrix} =$$

$$= \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \cos \beta + \sin \varphi \sin \delta \cos \beta +$$

$$+ \sin \varphi \cos \delta \cos \omega \sin \beta - \cos \varphi \sin \delta \sin \beta \quad (6.68)$$

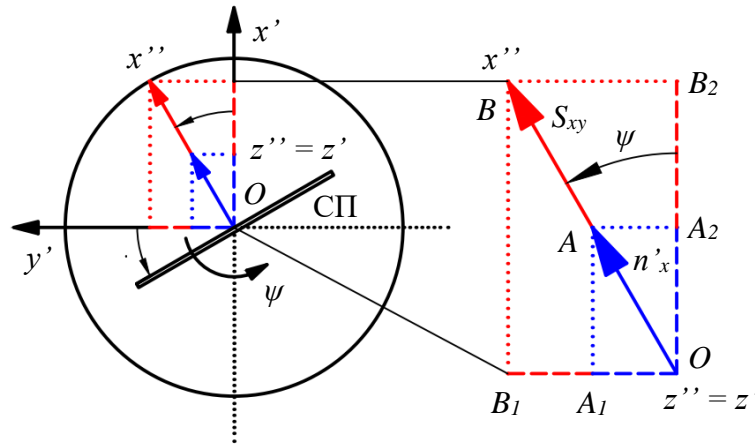
$$S_y = R \cdot n'_y = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta \\ \cos \delta \sin \omega \\ -\sin \varphi \cos \delta \cos \omega + \cos \varphi \sin \delta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \cos \delta \sin \omega \quad (6.69)$$

На крају, угао $\cos \theta_{TUBE}$ је (Јед. 6.70) [14, 15, 156]:

$$\cos \theta_{TUBE} = \sqrt{\left(\cos \varphi \cos \delta \cos \omega \cos \beta + \sin \varphi \sin \delta \cos \beta + \sin \varphi \cos \delta \cos \omega \sin \beta - \cos \varphi \sin \delta \sin \beta \right)^2 + (\cos \delta \sin \omega)^2} \quad (6.70)$$

6.2.3.3 Соларни упадни угао за покретне равне соларне пријемнике

Праћење кретања положаја Сунца, могуће је само под условом да пројекција S_{xy} у попречној π_{\perp} равни има исти смер као вектор нормале n'_x на површини посматраног СП (Сл. 6.28) [14, 15, 160].



Слика 6.28 – Вектор нормале и пројекција јединичног соларног вектора у попречној равни [14, 15, 160]

Како је ротирање СП (око нагнуте С-Ј осе за угао β у односу на хоризонтску раван) у правцу И-З одређено углом ψ , за случај да је $\gamma=0^\circ$, из сличности троуглова $\Delta OBB_1 \sim \Delta OAA_1$ и $\Delta OBB_2 \sim \Delta OAA_2$ (Сл. 6.28) могуће је дефинисати следеће односе (Јед. 6.71, Јед. 6.72) [14, 15, 160]:

$$\frac{\overline{OA_1}}{\overline{OA_2}} = \frac{\overline{OB_1}}{\overline{OB_2}} \quad (6.71)$$

$$\frac{\sin \psi}{\cos \psi} = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \theta_{\beta}} = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega \cos \beta + \sin \varphi \sin \delta \cos \beta + \sin \varphi \cos \delta \cos \omega \sin \beta - \cos \varphi \sin \delta \sin \beta} \quad (6.72)$$

Наведени израз (Јед. 6.72) елиминисањем $\cos \delta$ постаје (Јед. 6.73) [14, 15, 160]:

$$\tan \psi = \frac{\sin \omega}{\cos \varphi \cos \omega \cos \beta + \sin \varphi \tan \delta \cos \beta + \sin \varphi \cos \omega \sin \beta - \cos \varphi \tan \delta \sin \beta} \quad (6.73)$$

Соларни упадни угао $\cos \theta_{NS}$ [-] за покретну равну конструкцију СП сада се може дефинисати као (Јед. 6.74) [14, 15, 160]:

$$\begin{aligned} \cos \theta_{NS} &= \begin{bmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \psi \\ \sin \psi \\ 0 \end{bmatrix} = \\ &= \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \cos \beta \cos \psi + \sin \varphi \sin \delta \cos \beta \cos \psi + \\ &+ \sin \varphi \cos \delta \cos \omega \sin \beta \cos \psi - \cos \varphi \sin \delta \sin \beta \cos \psi + \\ &+ \cos \delta \sin \omega \sin \psi \end{aligned} \quad (6.74)$$

Тригонометријским операцијама (Јед. 6.75, Јед. 6.76), уз примену (Јед. 6.73) могуће је елиминисати угао ψ из (Јед. 6.74) [14, 15, 160]:

$$\sin \psi = \frac{\tan \psi}{\sqrt{1 + \tan^2 \psi}} \quad (6.75)$$

$$\cos \psi = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \psi}} \quad (6.76)$$

Узимајући у обзир све наведено, долази се до коначног израза за одређивање $\cos \theta_{NS}$ [-] (Јед. 6.77) [14, 15, 160]:

$$\cos \theta_{NS} = \cos \delta \sqrt{\sin^2 \omega + \left(\cos \varphi \cos \omega \cos \beta + \sin \varphi \tan \delta \cos \beta - \cos \varphi \tan \delta \sin \beta + \sin \varphi \cos \omega \sin \beta \right)^2} \quad (6.77)$$

6.3 Топлотни губици

Према Првом закону Термодинамике, количина соларне енергије која доспева (уложена енергија) на апсорберске површине (свих) СП, не може у потпуности бити упијена и предата (корисна енергија) радним флуидима. Неупијени износи уложене енергије неповратно напуштају СП преко њихових граничних површина, па се стога третирају као топлотни губици.

Одређивање топлотних губитака (како за РСП, тако и за РтАСП) заснива се на примени једначина којима се описују (добро познати) механизми пролаза топлоте преко главних позиција СП: провођења топлоте (кондукције), прелаза топлоте (конвекције) и зрачења (радијације).

Главне позиције РСП су: равна апсорберска површина са интегрисаним проточним каналима (апсорбер), изолациони слој, ваздушни слој, стаклена прекривка (једноструко застакљење) и бочне граничне површине (рам).

Са друге стране, због специфичности соларне конструкције, главне позиције једног РтА у конструкцији РтАСП су: равна апсорберска плоча са интегрисаним проточним каналом (ламела), ваздушни слој, стаклена цев и данца (чепови).

6.3.1 Топлотни губици за РСП

Ако се РСП посматра као црна енергетска кутија^{VI-22)}, топлотни губици $Q_{F,LOSS}$ [W] (Јед. 6.78, Сл. 6.29) који у њему настају, пропорционали су разлици температуре апсорбера $T_{F,ABS}$ [K] и температуре околног ваздуха T_{air} [K], а обрнуто пропорционални укупним отпорима пролазу топлотних губитака $\Sigma R_{F,LOSS}$ [K/W] (Јед. 6.79) [14, 15, 149, 161]:

$$Q_{F,LOSS} = \frac{T_{F,ABS} - T_{air}}{\Sigma R_{F,LOSS}} \quad (6.78)$$

$$\Sigma R_{F,LOSS} = \frac{1}{A_{F,ABS(up)} \Sigma U_{F,LOSS}} = \frac{1}{A_{F,ABS(up)} (U_{F,GL} + U_{F,INS} + U_{F,EDG})} \quad (6.79)$$

где су: $A_{F,ABS(up)}$ [m²] површина горње стране апсорбера за РСП, $\Sigma U_{F,LOSS}$ [W/m²K] укупни коефицијент пролаза топлотних губитака за РСП, $U_{F,GL}$ [W/m²K] коефицијент пролаза топлотних губитака за стакло РСП (Јед. 6.80, Сл. 6.30) [15, 149, 156, 161, 162], $U_{F,INS}$ [W/m²K] коефицијент пролаза топлотних губитака за изолациони слој РСП (Јед. 6.81, Сл. 6.31) [15, 149, 156, 161, 162] и $U_{F,EDG}$ [W/m²K] коефицијент пролаза топлотних губитака за рам РСП (Јед. 6.82, Сл. 6.32) [15, 149, 156, 161, 162].

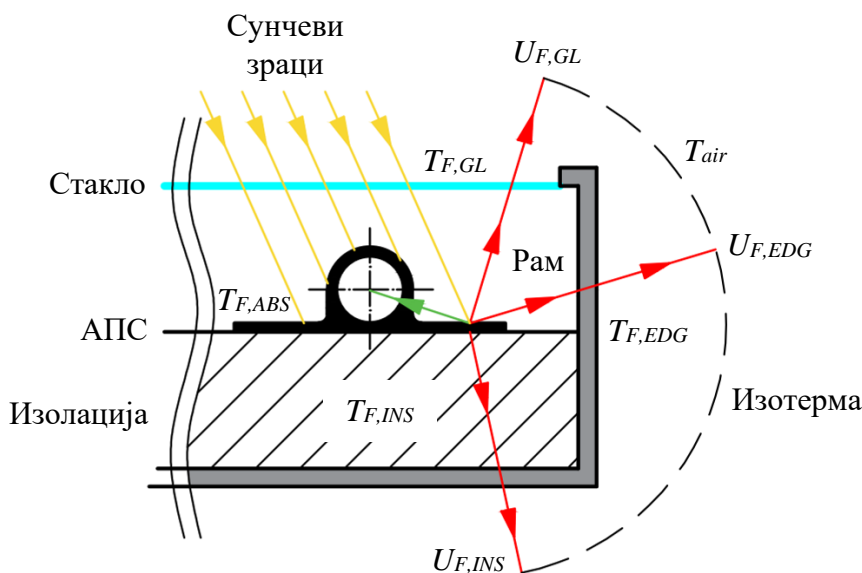
^{VI-22)} Црна енергетска кутија је отворени термодинамички систем небитних димензија, са јасно утврђеним границама, улазима и излазима, преко којих се са околином размењују одговарајуће масене и енергетске информације, при чему није неопходно познавање механизма претварања рада, тј. енергије из једног облика у други, већ се уз помоћ одговарајућих количинских показатеља утврђују одговарајући енергетски учинци истог [163].

$$U_{F,GL} = \frac{1}{\frac{1}{h_{F,ABS-GL(rad)} + h_{F,ABS-GL(con)}} + \frac{d_{F,GL}}{k_{F,GL}} + \frac{1}{h_{F,GL-air(rad)} + h_{F,GL-air(con)}}} \quad (6.80)$$

$$U_{F,INS} = \frac{1}{\frac{d_{F,INS}}{k_{F,INS}} + \frac{1}{h_{F,INS-air(con)}}} \quad (6.81)$$

$$U_{F,EDG} = \frac{1}{\frac{d_{F,EDG}}{k_{F,EDG}} + \frac{1}{h_{F,EDG-air(con)}}} \frac{A_{F,EDG}}{A_{F,TOT}} \quad (6.82)$$

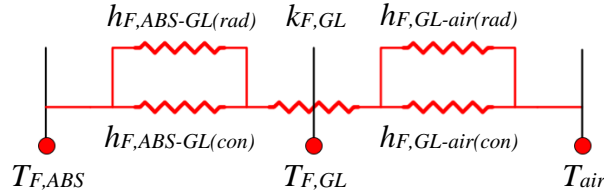
где су: $h_{F,ABS-GL(rad)}$ [W/m²K] коефицијент прелаза топлоте зрачењем са апсорбера на стакло за РСП (Јед. 6.83) [14, 15, 149, 155], $h_{F,ABS-GL(con)}$ [W/m²K] коефицијент прелаза топлоте конвекцијом^{VI-23)} са апсорбера на стакло за РСП (Јед. 6.84) [14, 15, 149, 161], $d_{F,GL}$ [m] дебљина стакла за РСП, $k_{F,GL}$ [W/mK] коефицијент топлотне проводљивости за стакло РСП, $h_{F,GL-air(rad)}$ [W/m²K] коефицијент прелаза топлоте зрачењем са стакла на околни ваздух за РСП (Јед. 6.85) [149, 161], $h_{F,GL-air(con)}$ [W/m²K] коефицијент прелаза топлоте конвекцијом са стакла на околни ваздух за РСП (Јед. 6.86) [149, 164], $d_{F,INS}$ [m] дебљина изолационог слоја за РСП, $k_{F,INS}$ [W/mK] коефицијент топлотне проводљивости за изолациони слој РСП, $h_{F,INS-air(con)}$ [W/m²K] коефицијент прелаза топлоте конвективним^{VI-24)} путем са изолационог слоја на околни ваздух за РСП, $d_{F,EDG}$ [m] дебљина рама за РСП, $k_{F,EDG}$ [W/mK] коефицијент топлотне проводљивости за рам РСП, $h_{F,EDG-air(con)}$ [W/m²K] коефицијент прелаза топлоте конвекцијом са рама на околни ваздух за РСП, $A_{F,EDG}$ [m²] површина рама за РСП и $A_{F,TOT}$ [m²] укупна површина за РСП.



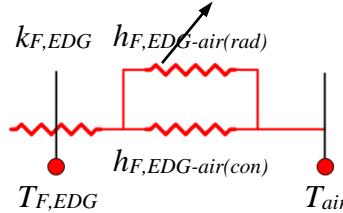
Слика 6.29 – Мрежа отпора пролазу топлотних губитака за РСП [149]

VI-23) Природна конвекција.

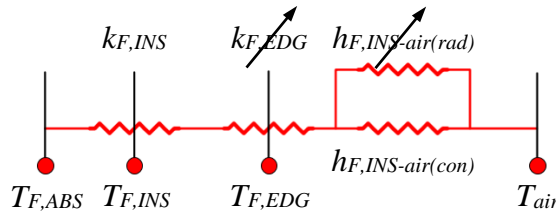
VI-24) Принудна конвекција.



Слика 6.30 – Мрежа отпора пролазу топлотних губитака кроз стакло за РСП



Слика 6.31 – Мрежа отпора пролазу топлотних губитака кроз рам за РСП



Слика 6.32 – Мрежа отпора пролазу топлотних губитака кроз изолациони слој за РСП

$$h_{F,ABS-GL(rad)} = \frac{\sigma(T_{F,ABS}^2 + T_{F,GL}^2)(T_{F,ABS} + T_{F,GL})}{\frac{1}{e_{F,ABS}} + \frac{1}{e_{F,GL}} - 1} \quad (6.83)$$

$$h_{F,ABS-GL(con)} = \frac{Nu_{F,AIR} k_{F,AIR}}{d_{F,AIR}} \quad (6.84)$$

$$h_{F,GL-air(rad)} = \sigma e_{F,GL} (T_{F,GL}^2 + T_{air}^2)(T_{F,GL} + T_{air}) \quad (6.85)$$

$$h_{F,GL-air(con)} = 2,8 + 3W \quad (6.86)$$

где су: σ [W/m^2K^4] Stefan–Boltzmann-ова константа, $T_{F,GL}$ [K] температура стакла за РСП, $e_{F,ABS}$ [-] коефицијент емисије дуготаласног зрачења апсорбера за РСП, $e_{F,GL}$ [-] коефицијент емисије дуготаласног зрачења стакла за РСП, $Nu_{F,AIR}$ [-] Nusselt-ов број ваздушног слоја између апсорбера и стакла за РСП (Јед. 6.87) [149, 165], $k_{F,AIR}$ [W/mK] коефицијент топлотне проводљивости ваздушног слоја између апсорбера и стакла за РСП, $d_{F,AIR}$ [m] дебљина ваздушног слоја између апсорбера и стакла за РСП и W [m/s] брзина ветра.

$$Nu_{F,AIR} = 1 + 1,44 \left(1 - \frac{1708 (\sin(1,8\beta))^{1,6}}{Ra_{F,AIR} \cos \beta} \right) \left(1 - \frac{1708}{Ra_{F,AIR} \cos \beta} \right)^* + \left(\left(\frac{Ra_{F,AIR} \cos \beta}{5830} \right)^{0,33} - 1 \right)^* \quad (6.87)$$

при чему знак „*“ (који се јавља у експоненту неких чланова другог и трећег сабирка) значи да се у обзир узимају само позитивне вредности.

$Ra_{F,AIR}$ број у (Јед. 6.87) може се описати помоћу (Јед. 6.88) [149, 165]:

$$Ra_{F,AIR} = \frac{gT_{F,AIR}d_{F,AIR}K_{F,AIR}}{\nu_{F,AIR}\zeta_{F,AIR}} \quad (6.88)$$

где су: g [m/s²] убрзање Земљине теже, $T_{F,AIR}$ [K] температура ваздушног слоја између апсорбера и стакла за РСП, $K_{F,AIR}$ [K⁻¹] коефицијент запреминског ширења ваздушног слоја између апсорбера и стакла за РСП, $\nu_{F,AIR}$ [m²/s] кинематска вискозност ваздушног слоја између апсорбера и стакла за РСП и $\zeta_{F,AIR}$ [m²/s] температурна проводљивост ваздушног слоја између апсорбера и стакла за РСП.

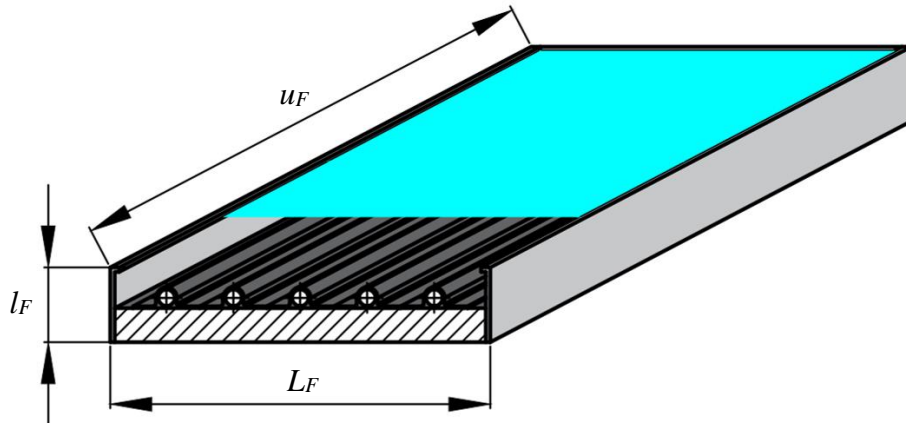
Површина апсорбера за РСП $A_{F,ABS}$ [m²] може се одредити преко (Јед. 6.89), површина рама $A_{F,EDG}$ [m²] преко (Јед. 6.90, Сл. 6.33), а укупна површина $A_{F,TOT}$ [m²] РСП преко (Јед. 6.91, Сл. 6.33) [149]:

$$A_{F,ABS} = n_{F,ABS}L_{F,ABS(1)}u_{F,ABS} \quad (6.89)$$

$$A_{F,EDG} = 2(l_F L_F + l_F u_F) \quad (6.90)$$

$$A_{F,TOT} = 2(l_F L_F + l_F u_F + L_F u_F) \quad (6.91)$$

где су: $n_{F,ABS}$ [-] број равних апсорберских плоча за РСП, $L_{F,ABS(1)}$ [m] ширина једне равне апсорберске плоче за РСП, $u_{F,ABS}$ [m] дужина апсорбера за РСП, l_F [m] висина РСП, L_F [m] ширина РСП и u_F [m] дужина РСП.



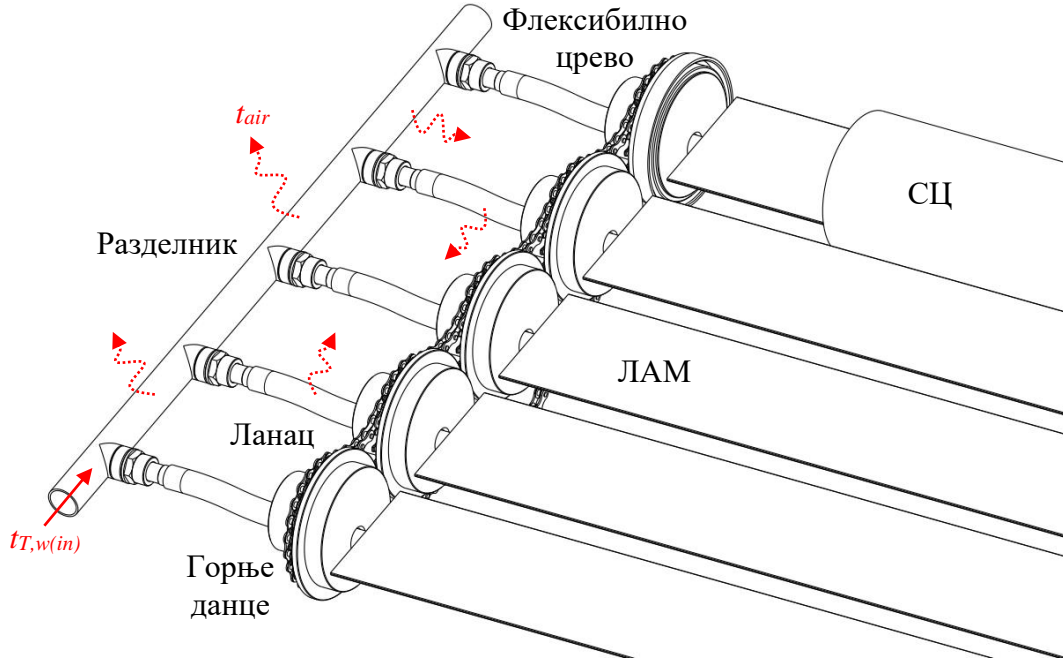
Слика 6.33 – Спољашње димензије РСП [149]

6.3.2 Топлотни губици за РтАСП

Топлотни губици који настају у РтАСП $Q_{T,LOSS}$ [W] једнаки су збиру топлотних губитака који настају у РтА $Q_{T,LOSS(LAM)}$ [W], разделнику $Q_{T,LOSS(SPL)}$ [W] и сабирнику $Q_{T,LOSS(MIX)}$ [W] (Јед. 6.92, Сл. 6.34):

$$Q_{T,LOSS} = Q_{T,LOSS(LAM)} \pm Q_{T,LOSS(SPL)} \pm Q_{T,LOSS(MIX)} \quad (6.92)$$

Величине $Q_{T,LOSS(SPL)}$ и $Q_{T,LOSS(MIX)}$ морају се узети у обзир јер су разделник и сабирник неизоловани^{VI-25)} делови РТАСП, због чега се топлотни трансфери могу одвијати у два смера^{VI-26)}: ка РТАСП (уколико је амбијентална температура виша од температуре воде) и од РТАСП (уколико је амбијентална температура нижа од температуре воде).



Слика 6.34 – Детаљ топлотног трансфера између разделника и околног ваздуха

Топлотни губици $Q_{T,LOSS(LAM)}$ [W] (Јед. 6.93, Сл. 6.35, Сл. 6.36) пропорционали су разлици температуре апсорберске плоче, тј. ламеле $T_{T,LAM}$ [K] и температуре околног ваздуха T_{air} [K], а обрнуто пропорционални укупним отпорима пролазу топлотних губитака $\sum R_{T,LOSS}$ [K/W] (Јед. 6.94) [166]:

$$Q_{T,LOSS(LAM)} = \frac{T_{T,LAM} - T_{air}}{\sum R_{T,LOSS}} \quad (6.93)$$

$$\sum R_{T,LOSS} = \sum R_{T,LOSS(\perp)} + \sum R_{T,LOSS(\angle)} \quad (6.94)$$

где су: $R_{T,LOSS(\perp)}$ [K/W] укупни отпори пролазу топлотних губитака са ламела на околни ваздух у попречној равни (Јед. 6.95, Сл. 6.35а, Сл. 6.36) и $R_{T,LOSS(\angle)}$ [K/W] укупни отпори пролазу топлотних губитака са ламела на околни ваздух у уздужној^{VI-27)} равни (Сл. 6.35б).

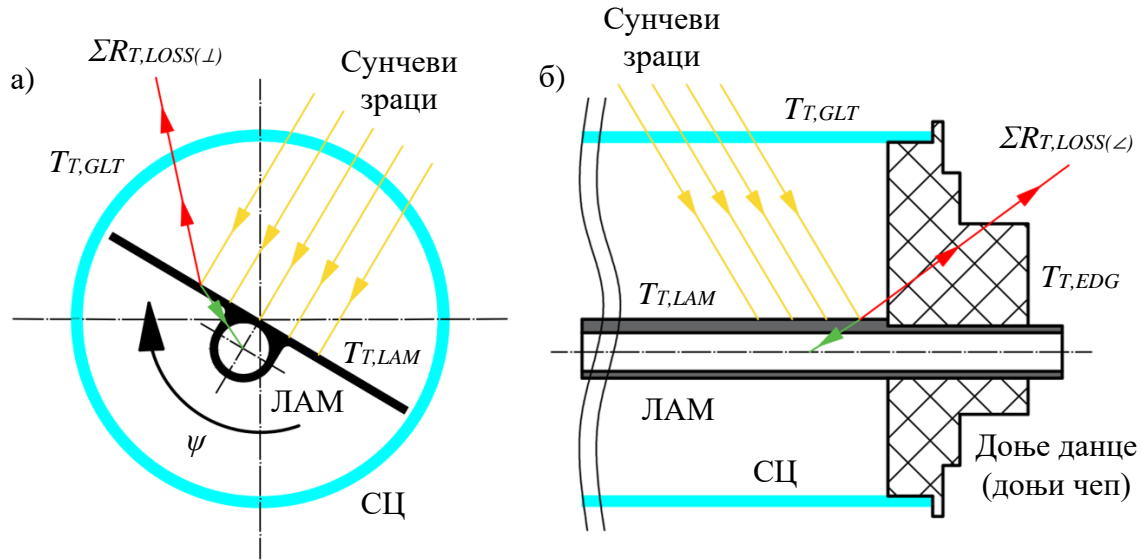
$$\sum R_{T,LOSS(\perp)} = R_{T,LAM-GLT} + R_{T,GLT} + R_{T,GLT-air} \quad (6.95)$$

VI-25) Поглавље 5.3.1.

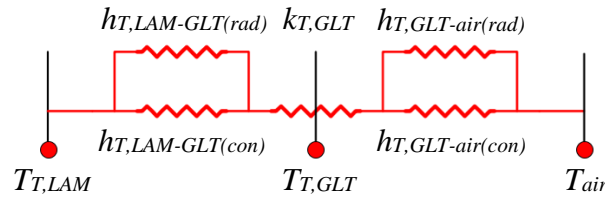
VI-26) Због тога се испред поменутих чланова налази знак „±“.

VI-27) Ови губици могу бити занемарени, јер је површина свих данаца (чепова) доста мања од укупне површине РТАСП (поглавље 5.3.1).

где су: $R_{T,LAM-GLT}$ [K/W] отпор преносу топлотних губитака са ламела на стаклене цеви за РТАСП (Јед. 6.96) [167], $R_{T,GLT}$ [K-W] отпор преносу топлотних губитака кроз стаклене цеви за РТАСП (Јед. 6.97) [167] и $R_{T,GLT-air}$ [K-W] отпор преносу топлотних губитака са стаклених цеви на околни ваздух за РТАСП (Јед. 6.98) [167].



Слика 6.35 – Мрежа отпора пролазу топлотних губитака за РТАСП [167-170]
а) Попречна раван; б) Уздужна раван



Слика 6.36 – Мрежа отпора пролазу топлотних губитака кроз стаклену цев за РТАСП

$$R_{T,LAM-GLT} = \frac{1}{A_{T,LAM(tot)} (h_{T,LAM-GLT(rad)} + h_{T,LAM-GLT(con)})} \quad (6.96)$$

$$R_{T,GLT} = \frac{u_{T,GLT}}{A_{T,GLT(i)} 2\pi k_{T,GLT}} \ln \left(\frac{D_{T,GLT(o)}}{D_{T,GLT(i)}} \right) \quad (6.97)$$

$$R_{T,GLT-air} = \frac{1}{A_{T,GLT(o)} (h_{T,GLT-air(rad)} + h_{T,GLT-air(con)})} \quad (6.98)$$

где су: $A_{T,LAM(tot)}$ [m²] укупна површина ламела за РТАСП, $h_{T,LAM-GLT(rad)}$ [W/m²K] коефицијент прелаза топлоте зрачењем^{VI-28} са ламела на стаклене цеви за РТАСП (Јед. 6.99) [14, 15, 63, 161], $u_{T,GLT}$ [m] дужина стаклене цеви за РТАСП, $h_{T,LAM-GLT(con)}$ [W/m²K] коефицијент прелаза топлоте конвекцијом^{VI-29} са ламела на стаклене цеви за РТАСП (Јед. 6.100) [14, 15, 63, 161], $A_{T,GLT(i)}$ [m²] унутрашња површина стаклених цеви за

^{VI-28}) Стаклена цев у потпуности обухвата ламелу.

^{VI-29}) Природна конвекција.

РТАСП, $k_{T,GLT}$ [W/mK] коефицијент топлотне проводљивости стаклених цеви за РТАСП, $D_{T,GLT(o)}$ [m] спољашњи пречник стаклених цеви за РТАСП, $D_{T,GLT(i)}$ [m] унутрашњи пречник стаклених цеви за РТАСП, $A_{T,GLT(o)}$ [m²] спољашња површина стаклених цеви за РТАСП, $h_{T,GLT-air(rad)}$ [W/m²K] коефицијент прелаза топлоте зрачењем са стаклених цеви на околни ваздух за РТАСП (Јед. 6.101) [161] и $h_{T,GLT-air(con)}$ [W/m²K] коефицијент прелаза топлоте конвекцијом^{VI-30} са стаклених цеви на околни ваздух за РТАСП (Јед. 6.102) [164].

$$h_{T,LAM-GLT(rad)} = \frac{(T_{T,LAM}^2 + T_{T,GLT}^2)(T_{T,LAM} + T_{T,GLT})}{\frac{1}{\sigma e_{T,LAM}} + \frac{A_{T,LAM(tot)}}{A_{T,GLT(i)}} \left(\frac{1}{\sigma e_{T,GLT}} - \frac{1}{\sigma} \right)} \quad (6.99)$$

$$h_{T,LAM-GLT(con)} = \frac{Nu_{T,AIR} k_{T,AIR}}{D_{T,GLT(i)}} \quad (6.100)$$

$$h_{T,GLT-air(rad)} = \sigma e_{T,GLT} (T_{T,GLT}^2 + T_{air}^2) (T_{T,GLT} + T_{air}) \quad (6.101)$$

$$h_{T,GLT-air(con)} = 2,8 + 3W \quad (6.102)$$

где су: $T_{T,GLT}$ [K] температура стаклених цеви за РТАСП, $e_{T,LAM}$ [-] коефицијент емисије дуготаласног зрачења ламела за РТАСП, $e_{T,GLT}$ [-] коефицијент емисије дуготаласног зрачења стаклених цеви за РТАСП, $Nu_{T,AIR}$ [-] *Nusselt*-ов број ваздушног слоја између ламела и стаклених цеви за РТАСП (Јед. 6.103) [165] и $k_{T,AIR}$ [W/mK] коефицијент топлотне проводљивости ваздушног слоја између ламела и стаклених цеви за РТАСП.

$$Nu_{T,AIR} = 1 + 1,44 \left(1 - \frac{1708 (\sin(1,8\beta))^{1,6}}{Ra_{T,AIR} \cos \beta} \right) \left(1 - \frac{1708}{Ra_{T,AIR} \cos \beta} \right)^* + \left(\left(\frac{Ra_{T,AIR} \cos \beta}{5830} \right)^{0,33} - 1 \right)^* \quad (6.103)$$

Знак „*“ у (Јед. 6.103) има исту функцију као у (Јед. 6.87).

$Ra_{T,AIR}$ број за РТАСП (Јед. 6.104) [165] је:

$$Ra_{T,AIR} = \frac{g T_{T,AIR} D_{T,GLT(i)} \kappa_{T,AIR}}{\nu_{T,AIR} \zeta_{T,AIR}} \quad (6.104)$$

где су: $T_{T,AIR}$ [K] температура ваздушног слоја између ламела и стаклених цеви за РТАСП, $\kappa_{T,AIR}$ [K⁻¹] коефицијент запреминског ширења ваздушног слоја између ламела и стаклених цеви за РТАСП, $\nu_{T,AIR}$ [m²/s] кинематска вискозност ваздушног слоја између ламела и стаклених цеви за РТАСП и $\zeta_{T,AIR}$ [m²/s] температурна проводљивост ваздушног слоја између ламела и стаклених цеви за РТАСП.

^{VI-30} Принудна конвекција.

Укупна површина свих ламела у конструкцији РтАСП $A_{T,LAM}$ [m²] (Јед. 6.105) је:

$$A_{T,LAM(tot)} = n_{T,LAM} O_{T,LAM(1)} u_{T,LAM} \quad (6.105)$$

где су: $n_{T,LAM}$ [-] број ламела за РтАСП, $O_{T,LAM(1)}$ [m] обим једне ламеле за РтАСП и $u_{T,LAM}$ [m] дужина ламела за РтАСП.

Са друге стране, $A_{T,GLT(i)}$ [m²] (Јед. 6.106) и $A_{T,GLT(o)}$ [m²] (Јед. 6.107) су:

$$A_{T,GLT(i)} = n_{T,GLT} D_{T,GLT(i)} \pi u_{T,GLT} \quad (6.106)$$

$$A_{T,GLT(o)} = n_{T,GLT} D_{T,GLT(o)} \pi u_{T,GLT} \quad (6.107)$$

где је $n_{T,GLT}$ [-] број стаклених цеви за РтАСП.

6.4 Топлотна снага

У литератури постоји више метода за одређивање топлотних снага СП: преко температура апсорберских површина и околног ваздуха (прва метода, М1), преко температура радних флуида (најчешће воде) на улазима у посматране СП и околног ваздуха (друга метода, М2), као и преко температура радних флуида на улазу и излазу из СП, тј. Првог закона Термодинамике за отворене термодинамичке системе (трећа метода, М3).

У теоријским истраживањима, одређивање температура апсорбера (М1 метода) и радних флуида на излазу из СП (М3 метода) је отежано, због чега М2 метода има предност. У случају експерименталних истраживања, због своје једноставности и практичности, М3 метода има предност коришћења.

Уз претходно увођење специфичних термичких индикатора (фактор преноса топлотне енергије, фактор ефикасности, коефицијент ефикасности), у наставку су изложене све три методе за одређивање топлотних снага РСП и РтАСП.

Познавање топлотне снаге СП, представља предуслов за одређивање још једног, подједнако важног, термичког параметра, а то је термичка ефикасност СП.

6.4.1 Топлотна снага за РСП

Применом Закона о одржању енергије^{VI-31)}, топлотна снага^{VI-32)} за РСП $Q_{F,HEAT(M1)}$ [W] (Јед. 6.108) представља разлику долазног соларног топлотног флукса $Q_{F,SUN}$ [W] и топлотних губитака $Q_{F,LOSS}$ [W] [14, 149, 171, 172]:

$$Q_{F,HEAT(M1)} = Q_{F,SUN} - Q_{F,LOSS} = A_{F,ABS(up)} I_{F,TOT} - \frac{T_{F,ABS} - T_{air}}{\sum R_{F,LOSS}} \quad (6.108)$$

Топлотна снага^{VI-33)} за РСП $Q_{F,HEAT(M2)}$ [W] може се одредити и преко (Јед. 6.109) [14, 149, 171, 172]:

$$Q_{F,HEAT(M2)} = f_{F,HEAT} \left(A_{F,ABS(up)} I_{F,TOT} - \frac{T_{F,w(in)} - T_{air}}{\sum R_{F,LOSS}} \right) \quad (6.109)$$

где су: $f_{F,HEAT}$ [-] фактор преноса топлотне енергије за РСП (Јед. 6.110) [5, 30, 149, 173-176] и $T_{F,w(in)}$ [K] температура воде на улазу у РСП.

$$f_{F,HEAT} = \frac{\dot{m}_{F,w} c_{p-w} \sum R_{F,LOSS}}{A_{F,ABS(up)}} \left(1 - e^{-\frac{A_{F,ABS(up)} G_{F,HEAT}}{\dot{m}_{F,w} c_{p-w} \sum R_{F,LOSS}}} \right) \quad (6.110)$$

^{VI-31)} Закон о одржању енергије заснива се на Првом закону Термодинамике.

^{VI-32)} М1 метода.

^{VI-33)} М2 метода.

где су: $\dot{m}_{F,w}$ [kg/s] масени проток воде кроз РСП, c_{p-w} [J/kgK] специфична топлота воде за РСП и $G_{F,HEAT}$ [-] фактор ефикасности за РСП (Јед. 6.111) [5, 30, 149, 173-176].

$$G_{F,HEAT} = \frac{\sum R_{F,LOSS}}{R_{F,ABS} + R_{F,ABS-w} + \frac{L_{F,ABS(1)} \sum R_{F,LOSS}}{D_{F,w(o)} + CE_{F,HEAT}(L_{F,ABS(1)} - D_{F,w(o)})}} \quad (6.111)$$

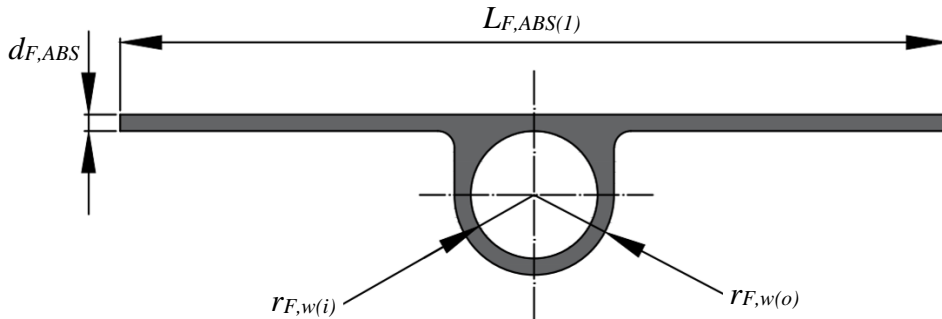
Фактор $G_{F,HEAT}$ зависи од следећих величина: $R_{F,ABS}$ [K/W] отпор преносу топлотних губитака кроз апсорбер за РСП (Јед. 6.112) [5, 30, 149, 173-176], $R_{F,ABS-w}$ [K/W] отпор преносу топлотних губитака са апсорбера на воду (Јед. 6.113) [5, 30, 149, 173-176], $D_{F,w(o)}$ [m] геометријска карактеристика проточних канала за РСП (Сл. 6.37) и $CE_{F,HEAT}$ [-] коефицијент ефикасности за РСП (Јед. 6.114) [5, 30, 149, 173-176]:

$$R_{F,ABS} = \frac{d_{F,ABS}}{A_{F,w(o)} k_{F,ABS}} \quad (6.112)$$

$$R_{F,ABS-w} = \frac{1}{A_{F,w(i)} h_{F,ABS-w(con)}} \quad (6.113)$$

$$CE_{F,HEAT} = \frac{\tanh \left(\frac{(L_{F,ABS(1)} - D_{F,w(o)}) \sqrt{\frac{1}{d_{F,ABS} k_{F,ABS} \sum R_{F,LOSS}}}}{2} \right)}{(L_{F,ABS(1)} - D_{F,w(o)}) \sqrt{\frac{1}{d_{F,ABS} k_{F,ABS} \sum R_{F,LOSS}}}} \quad (6.114)$$

где су: $d_{F,ABS}$ [m] дебљина апсорбера за РСП, $A_{F,w(o)}$ [m²] укупна спољашња површина проточних канала за РСП (Јед. 6.115), $k_{F,ABS}$ [W/mK] коефицијент топлотне проводљивости апсорбера за РСП, $A_{F,w(i)}$ [m²] укупна унутрашња површина проточних канала (Јед. 6.116) за РСП и $h_{F,ABS-w(con)}$ [W/m²K] коефицијент прелаза топлоте са апсорбера на воду за РСП.



Слика 6.37 – Попречни пресек једне апсорберске плоче (ламеле)

$$A_{F,w(o)} = n_{F,w} D_{F,w(o)} u_{F,w} \quad (6.115)$$

$$A_{F,w(i)} = n_{F,w} D_{F,w(i)} \pi u_{F,w} \quad (6.116)$$

где су: $n_{F,w}$ [-] број проточних канала за РСП, $D_{F,w(i)}$ [m] унутрашњи пречник проточних канала за РСП и $u_{F,w}$ [m] дужина проточних канала за РСП.

Коефицијент прелаза топлоте $h_{F,ABS-w(con)}$ (Јед. 6.117) зависи од следећег [5, 30, 149, 173-176]: $Nu_{F,w}$ [-] *Nusselt*-овог броја (Јед. 6.118), $k_{F,w}$ [W/mK] коефицијента топлотне проводљивости воде за РСП и пречника $D_{F,w(i)}$.

$$h_{F,ABS-w(con)} = \frac{Nu_{F,w} k_{F,w}}{D_{F,w(i)}} \quad (6.117)$$

Nu број (Јед. 6.118) за РСП детаљно је изложен у [177, 178]:

$$Nu_{F,w} = c (Re_{F,w})^n (Pr_{F,w})^m \left(\frac{Pr_{F,w}}{Pr_{F,ABS}} \right)^{0,25} \quad (6.118)$$

где су: c , n , m [-] одговарајући коефицијенти који зависе од режима струјања^{VI-34}) и других (додатних) геометријских услова у којима се одвија конвективна размена топлотне енергије за РСП, $Re_{F,w}$ [-] *Reynolds*-ов број воде за РСП, $Pr_{F,w}$ [-] *Prandtl*-ов број воде за РСП и $Pr_{F,ABS}$ [-] *Prandtl*-ов број апсорбера за РСП.

Топлотна снага^{VI-35}) за РСП $Q_{F,HEAT(M3)}$ [W] може бити одређена и на следећи начин (Јед. 6.119) [179, 180]:

$$Q_{F,HEAT(M3)} = \dot{m}_{F,w} c_{p-w} (T_{F,w(out)} - T_{F,w(in)}) \quad (6.119)$$

где је $T_{F,w(out)}$ [K] температура воде на излазу из РСП.

6.4.2 Топлотна снага за РтАСП

Топлотна снага^{VI-36}) за РтАСП $Q_{T,HEAT(M1)}$ [W] (Јед. 6.120) може се одредити као разлика $Q_{T,SUN}$ [W] и $Q_{T,LOSS}$ [W], или као^{VI-37}) $Q_{T,HEAT(M2)}$ [W] (Јед. 6.121) – ако се у обзир узме фактор преноса топлотне енергије за РтАСП $f_{T,HEAT}$ [-] (Јед. 6.122) [14, 171, 172]:

$$Q_{T,HEAT(M1)} = Q_{T,SUN} - Q_{T,LOSS} = A_{T,LAM(up)} I_{T,TOT} - \frac{T_{T,LAM} - T_{air}}{\sum R_{T,LOSS}} \quad (6.120)$$

$$Q_{T,HEAT(M2)} = f_{T,HEAT} \left(A_{T,LAM(up)} I_{T,TOT} - \frac{T_{T,w(in)} - T_{air}}{\sum R_{T,LOSS}} \right) \quad (6.121)$$

^{VI-34}) Струјање (протицање) радног флуида може бити: ламинарно, прелазно и турбулентно.

^{VI-35}) М3 метода.

^{VI-36}) М1 метода.

^{VI-37}) М2 метода.

$$f_{T,HEAT} = \frac{\dot{m}_{T,w} c_{p-w} \sum R_{T,LOSS}}{A_{T,LAM(up)}} \left(1 - e^{-\frac{A_{T,LAM(up)} G_{T,HEAT}}{\dot{m}_{T,w} c_{p-w} \sum R_{T,LOSS}}} \right) \quad (6.122)$$

где су: $T_{T,w(in)}$ [K] температура воде на улазу у РтАСП, $\dot{m}_{T,w}$ [kg/s] масени проток воде кроз РтАСП, c_{p-w} [J/kgK] специфична топлота воде за РтАСП и $G_{T,HEAT}$ [-] фактор ефикасности за РтАСП (Јед. 6.123) [5, 30, 173-176].

$$G_{T,HEAT} = \frac{\sum R_{T,LOSS}}{R_{T,LAM} + R_{T,LAM-w} + \frac{L_{T,LAM(1)} \sum R_{T,LOSS}}{D_{T,w(o)} + CE_{T,HEAT} (L_{T,LAM(1)} - D_{T,w(o)})}} \quad (6.123)$$

Сада фактор $G_{T,HEAT}$ зависи од: $R_{T,LAM}$ [K/W] отпор преносу топлотних губитака кроз ламеле за РтАСП (Јед. 6.124) [5, 30, 173-176], $R_{T,LAM-w}$ [K/W] отпор преносу топлотних губитака са ламела на воду (Јед. 6.125) [5, 30, 173-176], $D_{T,w(o)}$ [m] геометријска карактеристика проточних канала^{VI-38)} за РтАСП (Сл. 6.37) и $CE_{T,HEAT}$ [-] коефицијент ефикасности за РтАСП (Јед. 6.126) [5, 30, 173-176]:

$$R_{T,LAM} = \frac{d_{T,LAM}}{A_{T,w(o)} k_{T,LAM}} \quad (6.124)$$

$$R_{T,LAM-w} = \frac{1}{A_{T,w(i)} h_{T,LAM-w(con)}} \quad (6.125)$$

$$CE_{T,HEAT} = \frac{\tanh \left(\frac{(L_{T,LAM(1)} - D_{T,w(o)}) \sqrt{\frac{1}{d_{T,LAM} k_{T,LAM} \sum R_{T,LOSS}}}}{2} \right)}{(L_{T,LAM(1)} - D_{T,w(o)}) \sqrt{\frac{1}{d_{T,LAM} k_{T,LAM} \sum R_{T,LOSS}}}} \quad (6.126)$$

где су: $d_{T,LAM}$ [m] дебљина ламела за РтАСП, $A_{T,w(o)}$ [m²] укупна спољашња површина проточних канала за РтАСП (Јед. 6.127), $k_{T,LAM}$ [W/mK] коефицијент топлотне проводљивости ламела за РтАСП, $A_{T,w(i)}$ [m²] укупна унутрашња површина проточних канала (Јед. 6.128) за РтАСП и $h_{T,LAM-w(con)}$ [W/m²K] коефицијент прелаза топлоте са ламела на воду за РтАСП.

$$A_{T,w(o)} = n_{T,w} D_{T,w(o)} u_{T,w} \quad (6.127)$$

$$A_{T,w(i)} = n_{T,w} D_{T,w(i)} \pi u_{T,w} \quad (6.128)$$

где су: $n_{T,w}$ [-] број проточних канала за РтАСП, $D_{T,w(i)}$ [m] унутрашњи пречник проточних канала за РтАСП и $u_{T,w}$ [m] дужина проточних канала за РтАСП.

^{VI-38)} У случају РтАСП важе иста правила као за РСП.

Коефицијент прелаза топлоте $h_{T,LAM-w(con)}$ (Јед. 6.129) [5, 30, 173-176], аналогно (Јед. 6.117), је:

$$h_{T,LAM-w(con)} = \frac{Nu_{T,w} k_{T,w}}{D_{T,w(i)}} \quad (6.129)$$

где су: $Nu_{T,w}$ [-] *Nusselt*-ов број (Јед. 6.130) за РТАСП [177, 178] и $k_{T,w}$ [W/mK] коефицијент топлотне проводљивости воде за РТАСП.

$$Nu_{T,w} = c (Re_{T,w})^n (Pr_{T,w})^m \left(\frac{Pr_{T,w}}{Pr_{T,LAM}} \right)^{0,25} \quad (6.130)$$

где су: c, n, m [-] одговарајући коефицијенти конвективног прелаза топлоте за РТАСП, $Re_{T,w}$ [-] *Reynolds*-ов број воде за РТАСП, $Pr_{T,w}$ [-] *Prandtl*-ов број воде за РТАСП и $Pr_{T,LAM}$ [-] *Prandtl*-ов број ламела за РТАСП.

На крају, топлотна снага^{VI-39)} за РТАСП $Q_{T,HEAT(M3)}$ [W] (Јед. 6.131) [179, 180] је:

$$Q_{T,HEAT(M3)} = \dot{m}_{T,w} c_{p-w} (T_{T,w(out)} - T_{T,w(in)}) \quad (6.131)$$

где је $T_{T,w(out)}$ [K] температура воде на излазу из РТАСП.

^{VI-39)} М3 метода.

6.5 Ефикасност

6.5.1 Оптичка ефикасност

6.5.1.1 Оптичка ефикасност за РСП

Оптичка ефикасност директног соларног зрачења за РСП $(\tau a)_{F,BEAM}$ [-] (Јед. 6.132) може се одредити према препорукама у [149, 181-185]:

$$(\tau a)_{F,BEAM} = 1,01(\tau a)_{F(\perp)} \tau_{F,B} a_{F,B} \quad (6.132)$$

где су: $(\tau a)_{F(\perp)}$ [-] номинална оптичка ефикасност за РСП (Јед. 6.133) [149, 181-185], $\tau_{F,B}$ [-] модификатор коефицијента дијатермије директног соларног зрачења за РСП (Јед. 6.134) [149, 181-185] и $a_{F,B}$ [-] модификатор коефицијента апсорпције директног соларног зрачења за РСП (Јед. 6.135) [149, 181-185].

$$(\tau a)_{F(\perp)} = e^{ce_{F,GL} d_{F,GL}} \left(1 - \left(\frac{p_{F,GL} - 1}{p_{F,GL} + 1} \right)^2 \right) \quad (6.133)$$

$$\tau_{F,B} \cong (\tau_a)_{F,B} (\tau_r)_{F,B} \quad (6.134)$$

$$a_{F,B} = 1 + \frac{2,0345}{10^3} \theta_{F,b(1)} - \frac{1,99}{10^4} \theta_{F,b(1)}^2 + \frac{5,324}{10^6} \theta_{F,b(1)}^3 - \frac{4,799}{10^8} \theta_{F,b(1)}^4 \quad (6.135)$$

где су: $ce_{F,GL}$ [m^{-1}] коефицијент екстинкције^{VI-40} за РСП, $p_{F,GL}$ [-] индекс преламања^{VI-41} соларног зрачења за РСП (Јед. 6.136) [149, 181-185], $(\tau_a)_{F,B}$ [-] модификатор апсорпционих губитака коефицијента дијатермије директног соларног зрачења за РСП (Јед. 6.137) [149, 181-185], $(\tau_r)_{F,B}$ [-] модификатор рефлексивних губитака коефицијента дијатермије директног соларног зрачења за РСП (Јед. 6.138) [149, 181-185] и $\theta_{F,b(1)}$ [$^\circ$] соларни упадни угао директне компоненте соларног зрачења пре преламања за РСП (Сл. 6.38).

$$p_{F,GL} = \frac{\sin \theta_{F,b(1)}}{\sin \theta_{F,b(2)}} \Rightarrow \sin \theta_{F,b(2)} = \arccos \left(\frac{\sin \theta_{F,b(1)}}{p_{F,GL}} \right) \quad (6.136)$$

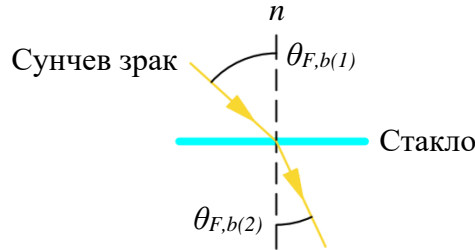
$$(\tau_a)_{F,B} = e^{\frac{ce_{F,GL} d_{F,GL}}{\cos \theta_{F,b(2)}}} \quad (6.137)$$

$$(\tau_r)_{F,B} = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - (r_b)_{F(\angle)}}{1 + (r_b)_{F(\angle)}} + \frac{1 - (r_b)_{F(\perp)}}{1 + (r_b)_{F(\perp)}} \right) \quad (6.138)$$

^{VI-40} Коефицијент екстинкције узима вредности од $4 m^{-1}$ (за стакла лошијег квалитета) до $32 m^{-1}$ (за стакла веома високог квалитета).

^{VI-41} Индекс преламања стакла је 1,526.

где су: $\theta_{F,b(2)}$ [°] соларни упадни угао директне компоненте соларног зрачења након преламања за РСП (Сл. 6.38), $(r_b)_{F(\angle)}$ [-] модификатор уздужне компоненте коефицијента рефлексије директног соларног зрачења за РСП (Јед. 6.139) [149, 181-185] и $(r_b)_{F(\perp)}$ [-] модификатор попречне компоненте коефицијента рефлексије директног соларног зрачења за РСП (Јед. 6.140) [149, 181-185].



Слика 6.38 – Соларни упадни углови директне^{VI-42)} компоненте соларног зрачења пре и након преламања за РСП

$$(r_b)_{F(\angle)} = \frac{\tan^2(\theta_{F,b(2)} - \theta_{F,b(1)})}{\tan^2(\theta_{F,b(2)} + \theta_{F,b(1)})} \quad (6.139)$$

$$(r_b)_{F(\perp)} = \frac{\sin^2(\theta_{F,b(2)} - \theta_{F,b(1)})}{\sin^2(\theta_{F,b(2)} + \theta_{F,b(1)})} \quad (6.140)$$

Оптичка ефикасност дифузног соларног зрачења за РСП $(\tau_a)_{F,DIFF}$ [-] (Јед. 6.141) [149, 181-185] је:

$$(\tau_a)_{F,DIFF} = 1,01(\tau_a)_{F(\perp)}\tau_{F,D}a_{F,D} \quad (6.141)$$

где су: $\tau_{F,D}$ [-] модификатор коефицијента дијатермије дифузног соларног зрачења за РСП (Јед. 6.142) [149, 181-185] и $a_{F,D}$ [-] модификатор коефицијента апсорпције дифузног соларног зрачења за РСП (Јед. 6.143) [149, 181-185].

$$\tau_{F,D} \cong (\tau_a)_{F,D}(\tau_r)_{F,D} \quad (6.142)$$

$$a_{F,D} = 1 + \frac{2,0345}{10^3}\theta_{F,d(1)} - \frac{1,99}{10^4}\theta_{F,d(1)}^2 + \frac{5,324}{10^6}\theta_{F,d(1)}^3 - \frac{4,799}{10^8}\theta_{F,d(1)}^4 \quad (6.143)$$

где су: $(\tau_a)_{F,D}$ [-] модификатор апсорпционих губитака коефицијента дијатермије дифузног соларног зрачења за РСП (Јед. 6.144) [149, 181-185], $(\tau_r)_{F,D}$ [-] модификатор рефлексионих губитака коефицијента дијатермије дифузног соларног зрачења за РСП (Јед. 6.145) [149, 181-185] и $\theta_{F,d(1)}$ [°] соларни упадни угао дифузне компоненте соларног зрачења пре преламања за РСП (Јед. 6.146) [149, 181-185].

$$(\tau_a)_{F,D} = e^{-\frac{ce_{F,\alpha}d_{F,\alpha}}{\cos\theta_{F,d(2)}}} \quad (6.144)$$

^{VI-42)} На исти начин могу се илустровати соларни упадни углови дифузног и рефлектованог соларног зрачења пре и након преламања.

$$(\tau_r)_{F,D} = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - (r_d)_{F(\angle)}}{1 + (r_d)_{F(\angle)}} + \frac{1 - (r_d)_{F(\perp)}}{1 + (r_d)_{F(\perp)}} \right) \quad (6.145)$$

$$\theta_{F,d(1)} = 59,68 - 0,1388 \beta + 0,001497 \beta^2 \quad (6.146)$$

где су: $(r_d)_{F(\angle)}$ [-] модификатор уздужне компоненте коефицијента рефлексije дифузног соларног зрачења за РСП [149, 181-185], $(r_d)_{F(\perp)}$ [-] модификатор попречне компоненте коефицијента рефлексije дифузног соларног зрачења за РСП [149, 181-185].

Преко угла $\theta_{F,d(1)}$, за унапред познато $p_{F,GL}$, могуће је одредити соларни упадни угао дифузне компоненте соларног зрачења након преламања за РСП $\theta_{F,d(2)}$ [°] (Јед. 6.147) [149, 181-185]:

$$p_{F,GL} = \frac{\sin \theta_{F,d(1)}}{\sin \theta_{F,d(2)}} \Rightarrow \sin \theta_{F,d(2)} = \arccos \left(\frac{\sin \theta_{F,d(1)}}{p_{F,GL}} \right) \quad (6.147)$$

Модификатори $(r_d)_{F(\angle)}$ (Јед. 6.148) и $(r_d)_{F(\perp)}$ (Јед. 6.149) су [149, 181-185]:

$$(r_d)_{F(\angle)} = \frac{\tan^2(\theta_{F,d(2)} - \theta_{F,d(1)})}{\tan^2(\theta_{F,d(2)} + \theta_{F,d(1)})} \quad (6.148)$$

$$(r_d)_{F(\perp)} = \frac{\sin^2(\theta_{F,d(2)} - \theta_{F,d(1)})}{\sin^2(\theta_{F,d(2)} + \theta_{F,d(1)})} \quad (6.149)$$

Последња компонента оптичке ефикасности односи се на рефлектовано соларно зрачење за РСП $(\tau_a)_{F,REFL}$ [-] (Јед. 6.150) [149, 181-185]:

$$(\tau_a)_{F,REFL} = 1,01(\tau_a)_{F(\perp)} \tau_{F,R} a_{F,R} \quad (6.150)$$

где су: $\tau_{F,R}$ [-] модификатор коефицијента дијатермије рефлектованог соларног зрачења за РСП (Јед. 6.151) [149, 181-185] и $a_{F,R}$ [-] модификатор коефицијента апсорпције рефлектованог соларног зрачења за РСП (Јед. 6.152) [149, 181-185].

$$\tau_{F,R} \cong (\tau_a)_{F,R} (\tau_r)_{F,R} \quad (6.151)$$

$$a_{F,R} = 1 + \frac{2,0345}{10^3} \theta_{F,r(1)} - \frac{1,99}{10^4} \theta_{F,r(1)}^2 + \frac{5,324}{10^6} \theta_{F,r(1)}^3 - \frac{4,799}{10^8} \theta_{F,r(1)}^4 \quad (6.152)$$

где су: $(\tau_a)_{F,R}$ [-] модификатор апсорпционих губитака коефицијента дијатермије рефлектованог соларног зрачења за РСП (Јед. 6.153) [149, 181-185], $(\tau_r)_{F,R}$ [-] модификатор рефлексиних губитака коефицијента дијатермије рефлектованог соларног зрачења за РСП (Јед. 6.154) [149, 181-185] и $\theta_{F,r(1)}$ [°] соларни упадни угао рефлектоване компоненте соларног зрачења пре преламања за РСП (Јед. 6.155) [149, 181-185].

$$(\tau_a)_{F,R} = e^{\frac{ce_{F,GL}d_{F,GL}}{\cos\theta_{F,r(2)}}} \quad (6.153)$$

$$(\tau_r)_{F,R} = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - (r_r)_{F(\angle)}}{1 + (r_r)_{F(\angle)}} + \frac{1 - (r_r)_{F(\perp)}}{1 + (r_r)_{F(\perp)}} \right) \quad (6.154)$$

$$\theta_{F,r(1)} = 90 - 0,5788 \beta + 0,002693 \beta^2 \quad (6.155)$$

где су: $\theta_{F,r(2)}$ [°] соларни упадни угао рефлектоване компоненте соларног зрачења након преламања за РСП (Јед. 6.156) [149, 181-185], $(r_r)_{F(\angle)}$ [-] модификатор уздужне компоненте коефицијента рефлексије рефлектованог соларног зрачења за РСП (Јед. 6.157) [149, 181-185] и $(r_r)_{F(\perp)}$ [-] модификатор попречне компоненте коефицијента рефлексије рефлектованог соларног зрачења за РСП (Јед. 6.158) [149, 181-185].

$$p_{F,GL} = \frac{\sin \theta_{F,r(1)}}{\sin \theta_{F,r(2)}} \Rightarrow \sin \theta_{F,r(2)} = \arccos \left(\frac{\sin \theta_{F,r(1)}}{p_{F,GL}} \right) \quad (6.156)$$

$$(r_r)_{F(\angle)} = \frac{\tan^2(\theta_{F,r(2)} - \theta_{F,r(1)})}{\tan^2(\theta_{F,r(2)} + \theta_{F,r(1)})} \quad (6.157)$$

$$(r_r)_{F(\perp)} = \frac{\sin^2(\theta_{F,r(2)} - \theta_{F,r(1)})}{\sin^2(\theta_{F,r(2)} + \theta_{F,r(1)})} \quad (6.158)$$

6.5.1.2 Оптичка ефикасност за РтАСП

За РтАСП, оптичка ефикасност директног соларног зрачења $(\tau a)_{T,BEAM}$ [-] (Јед. 6.159) [186-191] је:

$$(\tau a)_{T,BEAM} = 1,01(\tau a)_{T(\perp)} \tau_{T,B} a_{T,B} \quad (6.159)$$

где су: $(\tau a)_{T(\perp)}$ [-] номинална оптичка ефикасност за РтАСП (Јед. 6.160) [186-191], $\tau_{T,B}$ [-] модификатор коефицијента дијатермије директног соларног зрачења за РтАСП (Јед. 6.161) [186-191] и $a_{T,B}$ [-] модификатор коефицијента апсорпције директног соларног зрачења за РтАСП (Јед. 6.162) [186-191].

$$(\tau a)_{T(\perp)} = e^{ce_{T,GL}d_{T,GL}} \left(1 - \left(\frac{p_{T,GLT} - 1}{p_{T,GLT} + 1} \right)^2 \right) \quad (6.160)$$

$$\tau_{T,B} \cong (\tau_a)_{T,B} (\tau_r)_{T,B} \quad (6.161)$$

$$a_{T,B} = 1 + \frac{2,0345}{10^3} \theta_{T,b(1)} - \frac{1,99}{10^4} \theta_{T,b(1)}^2 + \frac{5,324}{10^6} \theta_{T,b(1)}^3 - \frac{4,799}{10^8} \theta_{T,b(1)}^4 \quad (6.162)$$

где су: $ce_{T,GLT}$ [m⁻¹] коефицијент екстинкције за РтАСП, $p_{T,GLT}$ [-] индекс преламања соларног зрачења за РтАСП (Јед. 6.163) [186-191], $(\tau a)_{T,B}$ [-] модификатор апсорпционих губитака коефицијента дијатермије директног соларног зрачења за РтАСП (Јед. 6.164) [186-191], $(\tau_r)_{T,B}$ [-] модификатор рефлексионих губитака коефицијента дијатермије

директног соларног зрачења за РТАСП (**Јед. 6.165**) [186-191] и $\theta_{T,b(1)}$ [°] соларни упадни угао директне компоненте соларног зрачења пре преламања за РТАСП.

$$P_{T,GLT} = \frac{\sin \theta_{T,b(1)}}{\sin \theta_{T,b(2)}} \Rightarrow \sin \theta_{T,b(2)} = \arccos \left(\frac{\sin \theta_{T,b(1)}}{P_{T,GLT}} \right) \quad (6.163)$$

$$(\tau_a)_{T,B} = e^{\frac{ce_{T,GLT} d_{T,GLT}}{\cos \theta_{T,b(2)}}} \quad (6.164)$$

$$(\tau_r)_{T,B} = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - (r_b)_{T(\angle)}}{1 + (r_b)_{T(\angle)}} + \frac{1 - (r_b)_{T(\perp)}}{1 + (r_b)_{T(\perp)}} \right) \quad (6.165)$$

где су: $\theta_{T,b(2)}$ [°] соларни упадни угао директне компоненте соларног зрачења након преламања за РТАСП, $(r_b)_{T(\angle)}$ [-] модификатор уздужне компоненте коефицијента рефлексије директног соларног зрачења за РТАСП (**Јед. 6.166**) [186-191] и $(r_b)_{T(\perp)}$ [-] модификатор попречне компоненте коефицијента рефлексије директног соларног зрачења за РТАСП (**Јед. 6.167**) [186-191].

$$(r_b)_{T(\angle)} = \frac{\tan^2(\theta_{T,b(2)} - \theta_{T,b(1)})}{\tan^2(\theta_{T,b(2)} + \theta_{T,b(1)})} \quad (6.166)$$

$$(r_b)_{T(\perp)} = \frac{\sin^2(\theta_{T,b(2)} - \theta_{T,b(1)})}{\sin^2(\theta_{T,b(2)} + \theta_{T,b(1)})} \quad (6.167)$$

Оптичка ефикасност дифузног соларног зрачења за РТАСП $(\tau a)_{T,DIFF}$ [-] (**Јед. 6.168**) [186-191] је:

$$(\tau a)_{T,DIFF} = 1,01(\tau a)_{T(\perp)} \tau_{T,D} a_{T,D} \quad (6.168)$$

где су: $\tau_{T,D}$ [-] модификатор коефицијента дијатермије дифузног соларног зрачења за РТАСП (**Јед. 6.169**) [186-191] и $a_{T,D}$ [-] модификатор коефицијента апсорпције дифузног соларног зрачења за РТАСП (**Јед. 6.170**) [186-191].

$$\tau_{T,D} \cong (\tau_a)_{T,D} (\tau_r)_{T,D} \quad (6.169)$$

$$a_{T,D} = 1 + \frac{2,0345}{10^3} \theta_{T,d(1)} - \frac{1,99}{10^4} \theta_{T,d(1)}^2 + \frac{5,324}{10^6} \theta_{T,d(1)}^3 - \frac{4,799}{10^8} \theta_{T,d(1)}^4 \quad (6.170)$$

где су: $(\tau_a)_{T,D}$ [-] модификатор апсорпционих губитака коефицијента дијатермије дифузног соларног зрачења за РТАСП (**Јед. 6.171**) [186-191], $(\tau_r)_{T,D}$ [-] модификатор рефлексионих губитака коефицијента дијатермије дифузног соларног зрачења за РТАСП (**Јед. 6.172**) [186-191] и $\theta_{T,d(1)}$ [°] соларни упадни угао дифузне компоненте соларног зрачења пре преламања за РТАСП (**Јед. 6.173**) [186-191].

$$(\tau_a)_{T,D} = e^{\frac{ce_{T,GLT} d_{T,GLT}}{\cos \theta_{T,d(2)}}} \quad (6.171)$$

$$(\tau_r)_{T,D} = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - (r_d)_{T(\angle)}}{1 + (r_d)_{T(\angle)}} + \frac{1 - (r_d)_{T(\perp)}}{1 + (r_d)_{T(\perp)}} \right) \quad (6.172)$$

$$\theta_{T,d(1)} = 59,68 - 0,1388 \beta + 0,001497 \beta^2 \quad (6.173)$$

где су: $\theta_{T,d(2)}$ [°] соларни упадни угао дифузне компоненте соларног зрачења након преламања за РТАСП (Јед. 6.174) [186-191], $(r_d)_{T(\angle)}$ [-] модификатор уздужне компоненте коефицијента рефлексије дифузног соларног зрачења за РТАСП (Јед. 6.175) [186-191] и $(r_d)_{T(\perp)}$ [-] модификатор попречне компоненте коефицијента рефлексије дифузног соларног зрачења за РТАСП (Јед. 6.176) [186-191].

$$p_{T,GLT} = \frac{\sin \theta_{T,d(1)}}{\sin \theta_{T,d(2)}} \Rightarrow \sin \theta_{T,d(2)} = \arccos \left(\frac{\sin \theta_{T,d(1)}}{p_{T,GLT}} \right) \quad (6.174)$$

$$(r_d)_{T(\angle)} = \frac{\tan^2(\theta_{T,d(2)} - \theta_{T,d(1)})}{\tan^2(\theta_{T,d(2)} + \theta_{T,d(1)})} \quad (6.175)$$

$$(r_d)_{T(\perp)} = \frac{\sin^2(\theta_{T,d(2)} - \theta_{T,d(1)})}{\sin^2(\theta_{T,d(2)} + \theta_{T,d(1)})} \quad (6.176)$$

На крају, оптичка ефикасност рефлектованог соларног зрачења за РТАСП $(\tau a)_{T,REFL}$ [-] одређује се следећим изразом (Јед. 6.177) [186-191] је:

$$(\tau a)_{T,REFL} = 1,01(\tau a)_{T(\perp)} \tau_{T,R} a_{T,R} \quad (6.177)$$

где су: $\tau_{T,R}$ [-] модификатор коефицијента дијатермије рефлектованог соларног зрачења за РТАСП (Јед. 6.178) [186-191] и $a_{T,R}$ [-] модификатор коефицијента апсорпције рефлектованог соларног зрачења за РТАСП (Јед. 6.179) [186-191].

$$\tau_{T,R} \cong (\tau_a)_{T,R} (\tau_r)_{T,R} \quad (6.178)$$

$$a_{T,R} = 1 + \frac{2,0345}{10^3} \theta_{T,r(1)} - \frac{1,99}{10^4} \theta_{T,r(1)}^2 + \frac{5,324}{10^6} \theta_{T,r(1)}^3 - \frac{4,799}{10^8} \theta_{T,r(1)}^4 \quad (6.179)$$

где су: $(\tau_a)_{T,R}$ [-] модификатор апсорпционих губитака коефицијента дијатермије рефлектованог соларног зрачења за РТАСП (Јед. 6.180) [186-191], $(\tau_r)_{T,R}$ [-] модификатор рефлексионих губитака коефицијента дијатермије рефлектованог соларног зрачења за РТАСП (Јед. 6.181) [186-191] и $\theta_{T,r(1)}$ [°] соларни упадни угао рефлектоване компоненте соларног зрачења пре преламања за РТАСП (Јед. 6.182) [186-191].

$$(\tau_a)_{T,R} = e^{-\frac{c \epsilon_{r,air} d_{r,air}}{\cos \theta_{T,r(2)}}} \quad (6.180)$$

$$(\tau_r)_{T,R} = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - (r_r)_{T(\angle)}}{1 + (r_r)_{T(\angle)}} + \frac{1 - (r_r)_{T(\perp)}}{1 + (r_r)_{T(\perp)}} \right) \quad (6.181)$$

$$\theta_{T,r(1)} = 90 - 0,5788 \beta + 0,002693 \beta^2 \quad (6.182)$$

где су: $\theta_{T,r(2)}$ [°] соларни упадни угао рефлектоване компоненте соларног зрачења након преламања за РТАСП (Јед. 6.183) [186-191], $(r_r)_{T(\angle)}$ [-] модификатор уздужне компоненте коефицијента рефлексије рефлектованог соларног зрачења за РТАСП (Јед. 6.184) [186-191] и $(r_r)_{T(\perp)}$ [-] модификатор попречне компоненте коефицијента рефлексије рефлектованог соларног зрачења за РТАСП (Јед. 6.185) [186-191].

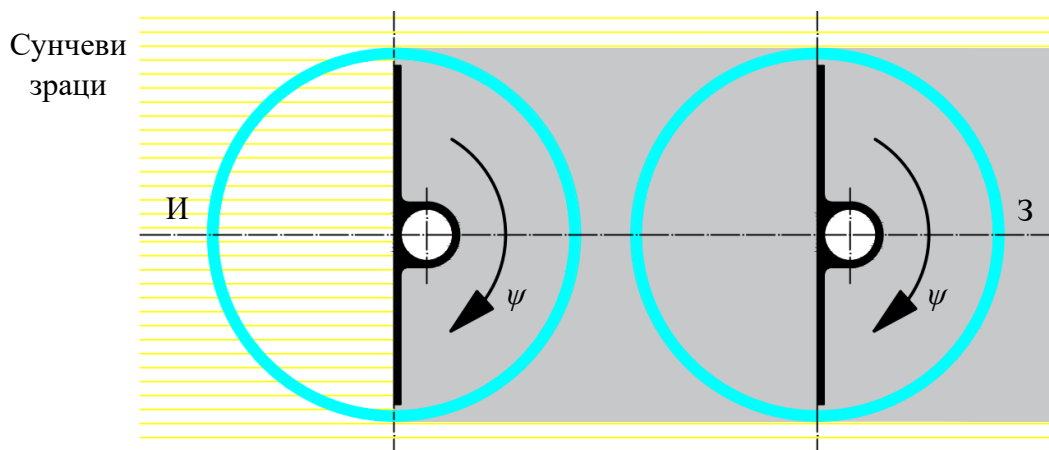
$$P_{T,GLT} = \frac{\sin \theta_{T,r(1)}}{\sin \theta_{T,r(2)}} \Rightarrow \sin \theta_{T,r(2)} = \arccos \left(\frac{\sin \theta_{T,r(1)}}{P_{T,GLT}} \right) \quad (6.183)$$

$$(r_r)_{T(\angle)} = \frac{\tan^2(\theta_{T,r(2)} - \theta_{T,r(1)})}{\tan^2(\theta_{T,r(2)} + \theta_{T,r(1)})} \quad (6.184)$$

$$(r_r)_{T(\perp)} = \frac{\sin^2(\theta_{T,r(2)} - \theta_{T,r(1)})}{\sin^2(\theta_{T,r(2)} + \theta_{T,r(1)})} \quad (6.185)$$

6.5.2 Коефицијент соларног сенчења

РТАСП у свом склопу поседује ламеле које се (за разлику од РСП) ротирају око своје осе, захваљујући специфичном (заједничком) рЈОП механизму^{VI-43}, све са циљем да соларни упадни угао, у сваком тренутку током дана, у попречној равни, буде управан на њихову површину. Са друге стране, због одређених геометријских ограничења ($D_{T,GLT(o)}$, $D_{T,GLT(i)}$, $D_{T,LAM}$, $r_{T,GLT(o)}$, $r_{T,GLT(i)}$, $r_{T,LAM}$ и $C_{T,GLT}$), РТАСП карактерише један негативни феномен који умањује апсорбовање соларне енергије. У питању је ефекат соларног сенчења који се може описати коефицијентом соларног сенчења.



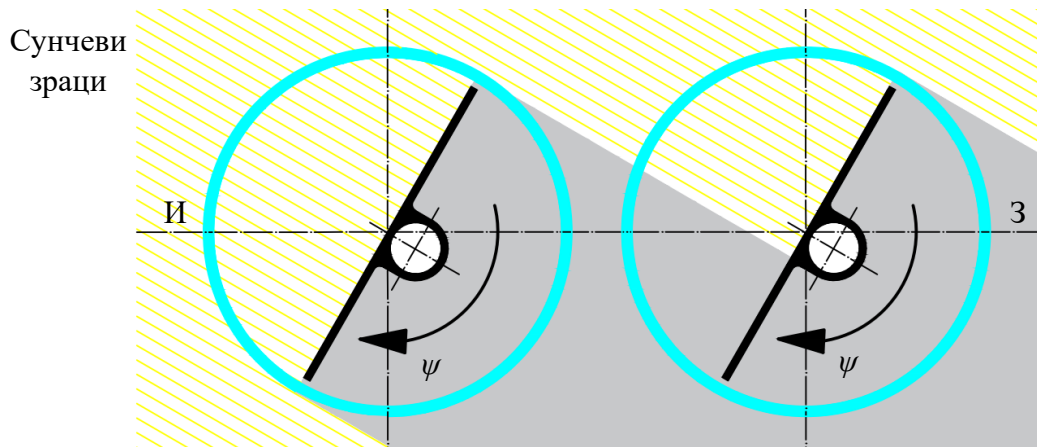
Слика 6.39 – Потпуна соларна осенченост за РТАСП у тренутку изласка Сунца

У тренутку изласка Сунца (Сл. 6.39), када је $\psi = -90^\circ$, може се приметити да је једино прва ламела, гледајући с’ лева (И) на десно (З), у потпуности (100%) изложена директном соларном зрачењу. Преостале ламеле (њих 4) налазе се у потпуној сенци.

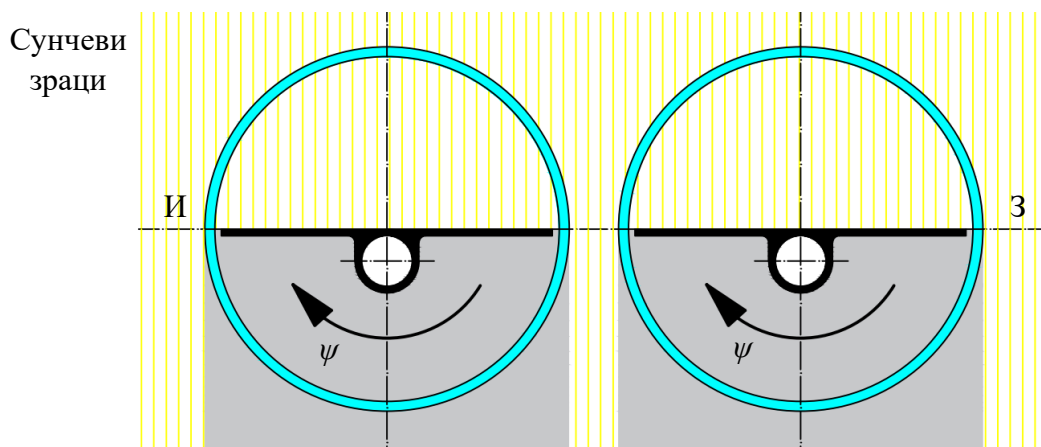
Удео соларног сенчења на преосталим ламелама (иза прве, Сл. 6.40) полако опада до одређеног преподневног тренутка (пре соларног поднева), када све ламеле постају у потпуности изложене идентичним износима директног соларног зрачења. Ово стање на

^{VI-43} Поглавље 5.3.

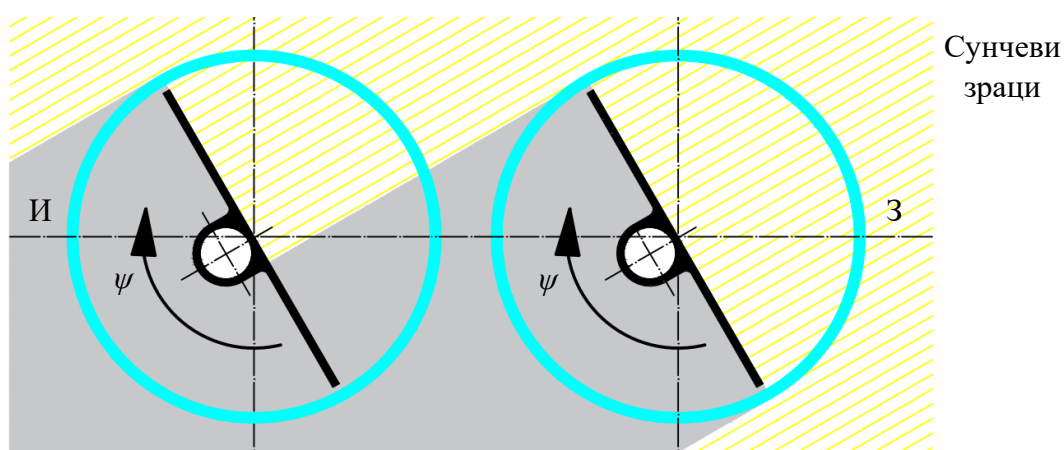
снази је све до одређеног послеподневног тренутка (након соларног поднева), када се по други пут (сада са растућим градијентом) током дана јавља ефекат соларног сенчења.



Слика 6.40 – Соларна осунчаност и осенченост за РтАСП при преподневним положајима Сунца



Слика 6.41 – Потпуна соларна осунчаност за РтАСП у тренутку соларног поднева

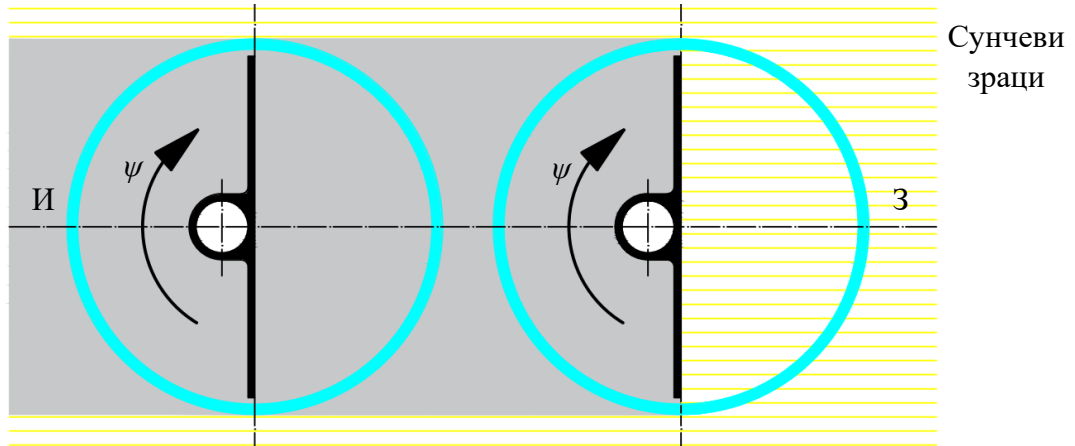


Слика 6.42 – Соларна осунчаност и осенченост за РтАСП при послеподневним положајима Сунца

У оквиру наведеног временског периода, јавља се и ефекат нултог часовног угла ($\psi=0^\circ$). Тренутак, када се све ламеле, уз потпуну изложеност идентичним износима

директног соларног зрачења, налазе у истој (заједничкој) равни (Сл. 6.41). Другим речима, у тренутку соларног поднева, апсорбер (састављен од ламела) РТАСП заузима идентичан положај у простору као и апсорбер РСП.

Као што је већ речено, у одређеном послеподневном тренутку (тренутак поновног јављања ефекта соларног сенчења), интензитет долазног директног соларног зрачења опада на свим ламелама (Сл. 6.42), осим на последњој. Последња ламела изложена је директном соларном зрачењу све до његовог заласка (Сл. 6.43), када је $\psi=90^\circ$.



Слика 6.43 – Потпуна соларна осенченост за РТАСП у тренутку заласка Сунца

Пошто се потпуна соларна осунчаност и осенченост смењују два пута током дана (једном пре подне, једном после подне), следећом једначином (Јед. 6.186) [85, 93, 150, 192-195] могуће је описати коефицијент соларног сенчења за РТАСП $s_{T,BEAM}$ [-]:

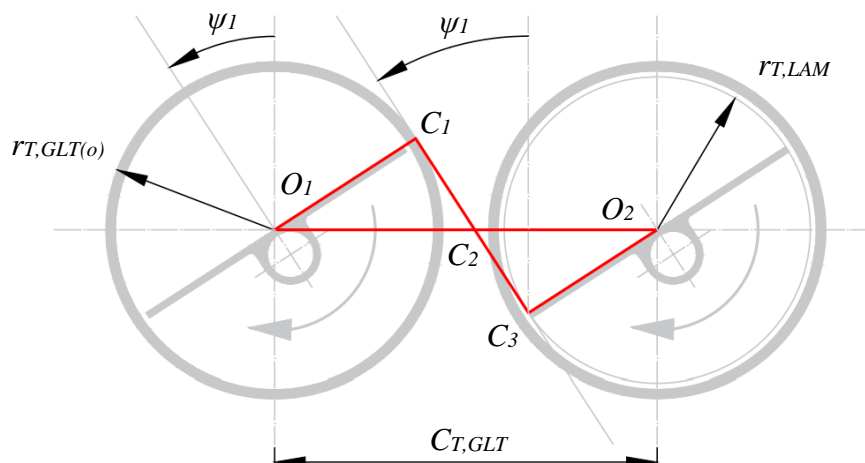
$$s_{T,BEAM} = \begin{cases} 1 & \text{за } |\psi| \leq |\psi_1| \\ \frac{C_{T,GLT} \cos \psi}{2r_{T,LAM}} + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{r_{T,GLT(o)}}{r_{T,LAM}} \right) & \text{за } |\psi_2| < |\psi| < |\psi_1| \\ 0 & \text{за } |\psi_2| \leq |\psi| \end{cases} \quad (6.186)$$

Тренутак потпуне соларне осунчаности (Сл. 6.44) одређен је углом ψ_1 из сличности троуглова $\Delta O_1 C_1 C_2 \sim \Delta O_2 C_2 C_3$ (Јед. 6.187-6.189) [85, 93, 150, 192-195]:

$$\frac{\overline{O_1 O_2} - \overline{O_2 C_2}}{\overline{O_2 C_2}} = \frac{\overline{O_1 C_1}}{\overline{O_2 C_3}} \Rightarrow \frac{C_{T,GLT} - \overline{O_2 C_2}}{\overline{O_2 C_2}} = \frac{r_{T,GLT(o)}}{r_{T,LAM}} \Rightarrow \overline{O_2 C_2} = \frac{r_{T,LAM} C_{T,GLT}}{r_{T,GLT(o)} + r_{T,LAM}} \quad (6.187)$$

$$\cos \psi_1 = \frac{\overline{O_1 C_1}}{\overline{O_1 C_2}} = \frac{r_{T,GLT(o)}}{C_{T,GLT} - \overline{O_2 C_2}} = \frac{r_{T,GLT(o)}}{C_{T,GLT} - \frac{r_{T,LAM} C_{T,GLT}}{r_{T,GLT(o)} + r_{T,LAM}}} = \frac{r_{T,GLT(o)} + r_{T,LAM}}{C_{T,GLT}} \quad (6.188)$$

$$\psi_1 = \arccos \left(\frac{r_{T,GLT(o)} + r_{T,LAM}}{C_{T,GLT}} \right) \quad (6.189)$$



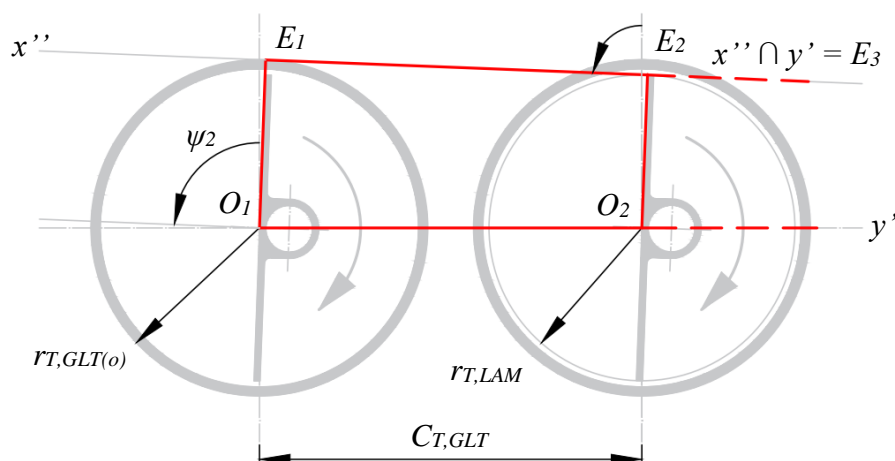
Слика 6.44 – Тренутак потпуне соларне осунчаности за РтАСП [85, 150, 192]

Тренутак потпуне соларне осенчености (Сл. 6.45) одређен је углом ψ_2 из сличности троуглова $\Delta O_1 E_1 E_3 \sim \Delta O_2 E_2 E_3$ (Јед. 6.190-6.192) [85, 93, 150, 192-195]:

$$\frac{\overline{O_1 O_2} + \overline{O_2 E_3}}{\overline{O_2 E_3}} = \frac{\overline{O_1 E_1}}{\overline{O_2 E_2}} \Rightarrow \frac{C_{T,GLT} + \overline{O_2 E_3}}{\overline{O_2 E_3}} = \frac{r_{T,GLT(o)}}{r_{T,LAM}} \Rightarrow \overline{O_2 E_3} = \frac{r_{T,LAM} C_{T,GLT}}{r_{T,GLT(o)} - r_{T,LAM}} \quad (6.190)$$

$$\cos \psi_2 = \frac{\overline{O_2 E_2}}{\overline{O_2 E_3}} = \frac{r_{T,LAM}}{\overline{O_2 E_3}} = \frac{r_{T,LAM}}{\frac{r_{T,LAM} C_{T,GLT}}{r_{T,GLT(o)} - r_{T,LAM}}} = \frac{r_{T,GLT(o)} - r_{T,LAM}}{C_{T,GLT}} \quad (6.191)$$

$$\psi_2 = \arccos \left(\frac{r_{T,GLT(o)} - r_{T,LAM}}{C_{T,GLT}} \right) \quad (6.192)$$



Слика 6.45 – Тренутак потпуне соларне осенчености за РтАСП [85, 150, 192]

За произвољан положај ψ (Сл. 6.46), при чему је $\psi_1 < \psi < \psi_2$, користи се сличност троуглова $\Delta O_1 F_1 F_3 \sim \Delta O_2 F_2 F_3$ (Јед. 6.193-6.195) [85, 93, 150, 192-195]:

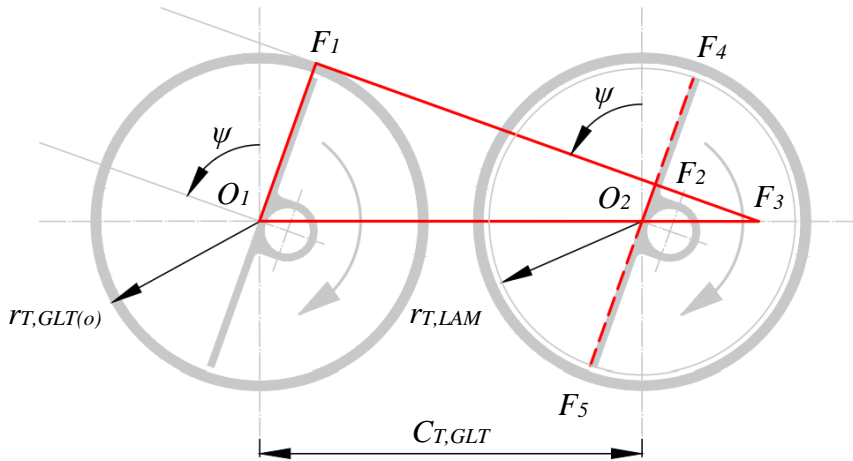
$$\frac{\overline{O_1 O_2} + \overline{O_2 F_3}}{\overline{O_2 F_3}} = \frac{\overline{O_1 F_1}}{\overline{O_2 F_2}} \Rightarrow \frac{C_{T,GLT} + \overline{O_2 F_3}}{\overline{O_2 F_3}} = \frac{r_{T,GLT(o)}}{\overline{O_2 F_2}} \Rightarrow \overline{O_2 F_2} = \frac{\overline{O_2 F_3} (r_{T,GLT(o)} - \overline{O_2 F_2})}{C_{T,GLT}} \quad (6.193)$$

$$\cos \psi = \frac{\overline{O_2 F_2}}{\overline{O_2 F_3}} = \frac{C_{T,GLT}}{\overline{O_2 F_3} (r_{T,GLT(o)} - \overline{O_2 F_2})} = \quad (6.194)$$

$$= \frac{r_{T,GLT(o)} - \overline{O_2 F_2}}{C_{T,GLT}} \Rightarrow \overline{O_2 F_2} = r_{T,GLT(o)} - C_{T,GLT} \cos \psi$$

$$\frac{\overline{F_2 F_4}}{\overline{F_4 F_5}} = \frac{\overline{F_2 F_4}}{2r_{T,LAM}} = \frac{r_{T,LAM} - \overline{O_2 F_2}}{2r_{T,LAM}} = \frac{r_{T,LAM} - (r_{T,GLT(o)} - C_{T,GLT} \cos \psi)}{2r_{T,LAM}} = \quad (6.195)$$

$$= \frac{C_{T,GLT} \cos \psi}{2r_{T,LAM}} + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{r_{T,GLT(o)}}{r_{T,LAM}} \right)$$



Слика 6.46 – Соларна осунчаност и осенченост за РтАСП [85, 150, 192]

6.5.3 Термичка ефикасност

6.5.3.1 Термичка ефикасност за РСП

Термичка ефикасност за РСП η_F [-] у општем случају може се представити као однос излаза, тј. корисне енергије и улаза, тј. уложене енергије (Јед. 6.196) [5, 149, 150, 196, 197]:

$$\eta_F = \frac{\text{izlaz}}{\text{ulaz}} \quad (6.196)$$

Улаз у РСП је $Q_{F,SUN}$ [W], док је излаз $Q_{F,HEAT}$ [W]. Како се $Q_{F,HEAT}$ може одредити на више начина (Јед. 6.108, Јед. 6.109, Јед. 6.119), исто важи и за η_F (Јед. 6.197-6.199) [5, 149, 150, 196, 197]:

$$\eta_{F(M1)} = \frac{Q_{F,HEAT(M1)}}{Q_{F,SUN}} = \frac{A_{F,ABS(up)} I_{F,TOT} - \frac{T_{F,ABS} - T_{air}}{\sum R_{F,LOSS}}}{A_{F,ABS(up)} I_{F,TOT}} \quad (6.197)$$

$$\eta_{F(M2)} = \frac{Q_{F,HEAT(M2)}}{Q_{F,SUN}} = \frac{f_{F,HEAT} \left(A_{F,ABS(up)} I_{F,TOT} - \frac{T_{F,w(in)} - T_{air}}{\sum R_{F,LOSS}} \right)}{A_{F,ABS(up)} I_{F,TOT}} \quad (6.198)$$

$$\eta_{F(M3)} = \frac{Q_{F,HEAT(M3)}}{Q_{F,SUN}} = \frac{\dot{m}_{F,w} c_{p-w} (T_{F,w(out)} - T_{F,w(in)})}{A_{F,ABS(up)} I_{F,TOT}} \quad (6.199)$$

Без обзира на одабрану методу прорачуна (M1, M2, M3), топлотне снаге требају бити приближно једнаке ($Q_{F,HEAT(M1)} \approx Q_{F,HEAT(M2)} \approx Q_{F,HEAT(M3)}$), а самим тим и термичке ефикасности ($\eta_{F(M1)} \approx \eta_{F(M2)} \approx \eta_{F(M3)}$).

6.5.3.2 Термичка ефикасност за РтАСП

Узимајући у обзир разне методе за одређивање $Q_{T,HEAT}$ [W], као и (Јед. 6.120, Јед. 6.121, Јед. 131) које важе за РСП, термичка ефикасност за РтАСП η_T [-] (Јед. 6.200-6.202) [5, 149, 150, 196, 197] је:

$$\eta_{T(M1)} = \frac{Q_{T,HEAT(M1)}}{Q_{T,SUN}} = \frac{A_{T,LAM(up)} I_{T,TOT} - \frac{T_{T,LAM} - T_{air}}{\sum R_{T,LOSS}}}{A_{T,LAM(up)} I_{T,TOT}} \quad (6.200)$$

$$\eta_{T(M2)} = \frac{Q_{T,HEAT(M2)}}{Q_{T,SUN}} = \frac{f_{T,HEAT} \left(A_{T,LAM(up)} I_{T,TOT} - \frac{T_{T,w(in)} - T_{air}}{\sum R_{T,LOSS}} \right)}{A_{T,LAM(up)} I_{T,TOT}} \quad (6.201)$$

$$\eta_{T(M3)} = \frac{Q_{T,HEAT(M3)}}{Q_{T,SUN}} = \frac{\dot{m}_{T,w} c_{p-w} (T_{T,w(out)} - T_{T,w(in)})}{A_{T,LAM(up)} I_{T,TOT}} \quad (6.202)$$

И у случају РтАСП, као за РСП, треба да буду испуњени услови једнакости за топлотну снагу ($Q_{T,HEAT(M1)} \approx Q_{T,HEAT(M2)} \approx Q_{T,HEAT(M3)}$), односно за термичку ефикасност ($\eta_{T(M1)} \approx \eta_{T(M2)} \approx \eta_{T(M3)}$).

VII

Резултати истраживања РСП и РТАСП

7.1 Теоријско истраживање РСП и РТАСП

7.1.1 Теоријска поставка

7.1.1.1 Соларни прорачунски алгоритам за РСП

На наредној слици (Сл. 7.1) приказан је једноставан прорачунски алгоритам^{VII-1)}, на бази троструког итеративног поступка, коришћен у фази теоријског истраживања РСП конструкције.

Наиме, за познате вредности^{VII-2)} I_{HOR} , $\dot{m}_{F,w}$, $t_{F,w(in)}$, t_{air} и W , вредности $t_{F,w(avg)}$, $t_{F,GL}$ и $t_{F,ABS}$ бивале су претпостављене на почетку итеративног поступка. На основу ових вредности, потом би уследио прорачун следећих параметара: $\Sigma R_{F,LOSS}$, $Q_{F,HEAT}$ и η_F .

Након завршетка прорачуна, све три претпостављене вредности биле су подвргнуте проверама, тј. трострукој филтрацији (Сл. 7.1).

$$T_{F,w(avg)} = T_{F,w(in)} + \frac{Q_{F,HEAT} \sum R_{F,LOSS}}{A_{F,ABS(up)} f_{F,HEAT}} \left(1 - \frac{f_{F,HEAT}}{G_{F,HEAT}} \right) \quad (7.1)$$

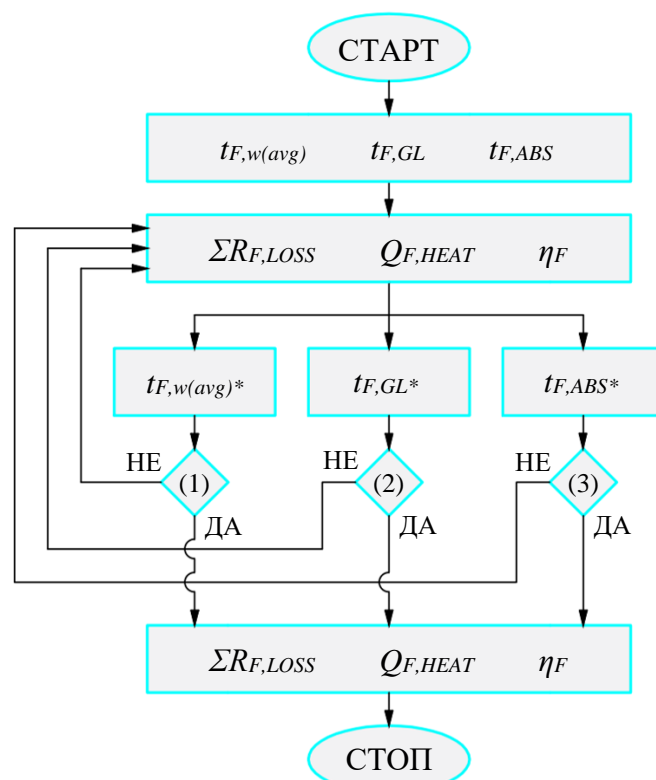
^{VII-1)} Microsoft Excel, Fortran, итд.

^{VII-2)} Поглавље 7.5.

$$T_{F,GL} = T_{F,ABS} - \frac{U_{F,GL}(T_{F,ABS} - T_{air})}{h_{F,ABS-GL(rad)} + h_{F,ABS-GL(con)}} \quad (7.2)$$

$$T_{F,ABS} = T_{F,w(in)} + \frac{Q_{F,HEAT}(1 - f_{F,HEAT}) \sum R_{F,LOSS}}{f_{F,HEAT}} \quad (7.3)$$

У првој итерацији коришћена је (Јед. 7.1) [14, 15, 149, 150, 152] да би се одредила нова вредност $t_{F,w(avg)*}$. Нова вредност средње температуре воде била би поређена са њеном претходно израчунатом вредношћу. Прва фаза итеративног поступка била би завршена када би се испунио следећи услов: $|t_{F,w(avg)*} - t_{F,w(avg)}| \leq 0,01$. Друга фаза, уз примену (Јед. 7.2) [14, 15, 149, 150, 152], користила је исту методу, која би трајала док се не достигне $|t_{F,GL*} - t_{F,GL}| \leq 0,01$. Последња итерација подразумевала је примену (Јед. 7.3) [14, 15, 149, 150, 152], све док апсолутно одступање $|t_{F,ABS*} - t_{F,ABS}|$ не би достигло исту граничну вредност ($\leq 0,01$).



Слика 7.1 – РСП прорачунски алгоритам [149]

Испуњавањем сва три услова, вршило се коначно исписивање $\Sigma R_{F,LOSS*}$, $Q_{F,HEAT*}$ и η_F^* . Тиме би итеративни поступак, а самим тим и теоријски прорачун термичких перформанси РСП, био окончан (Сл. 7.1).

7.1.1.2 Соларни прорачунски алгоритам за РтАСП

Троструки (тростепени) итеративни поступак прорачуна термичких перформанси РтАСП, аналогно РСП, приказан је на слици (Сл. 7.2).

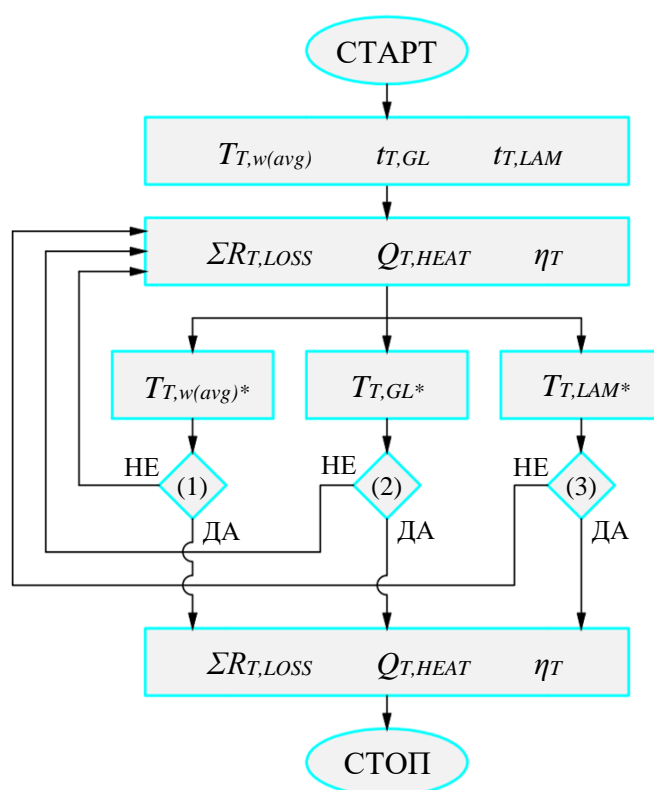
Исти алгоритам (Сл. 7.2), уз одговарајуће словне индексне ознаке, коришћен је и приликом теоријског прорачуна РтАСП термичких перформанси. У овом случају,

трострука итерација базирана је на примени (Јед. 7.4-7.6) [14, 15, 150, 152], све до испуњавања добро познатих услова: $|t_{T,w(avg)}^* - t_{T,w(avg)}| \leq 0,01$ (Јед. 7.4), $|t_{T,GLT}^* - t_{T,GLT}| \leq 0,01$ (Јед. 7.5) и $|t_{T,LAM}^* - t_{T,LAM}| \leq 0,01$ (Јед. 7.6).

$$T_{T,w(avg)} = T_{T,w(in)} + \frac{Q_{T,HEAT} \sum R_{T,LOSS}}{A_{T,LAM(up)} f_{T,HEAT}} \left(1 - \frac{f_{T,HEAT}}{G_{T,HEAT}} \right) \quad (7.4)$$

$$T_{T,GLT} = T_{T,LAM} - \frac{(T_{T,LAM} - T_{air})}{A_{T,LAM(up)} (h_{T,LAM-GLT(rad)} + h_{T,LAM-GLT(con)}) \sum R_{T,LOSS}} \quad (7.5)$$

$$T_{T,LAM} = T_{T,w(in)} + \frac{Q_{T,HEAT} (1 - f_{T,HEAT}) \sum R_{T,LOSS}}{f_{T,HEAT}} \quad (7.6)$$



Слика 7.2 – PtASP прорачунски алгоритам

7.1.2 Тест модел

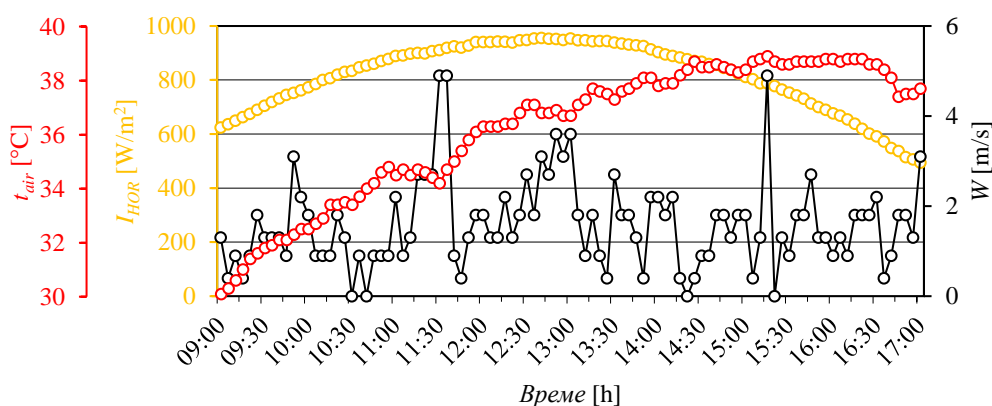
7.1.2.1 Временски фајлови

На наредним сликама, за два летња дана у 2021. години (29. јун, Сл. 7.3 и 30 јун, Сл. 7.4), приказани су коришћени временски фајлови (петоминутни корак мерења у оквиру осмочасовног периода^{VII-3)} са акцентом на три важна метеоролошка^{VII-4)} параметра:

^{VII-3)} Поглавље 7.5.1.

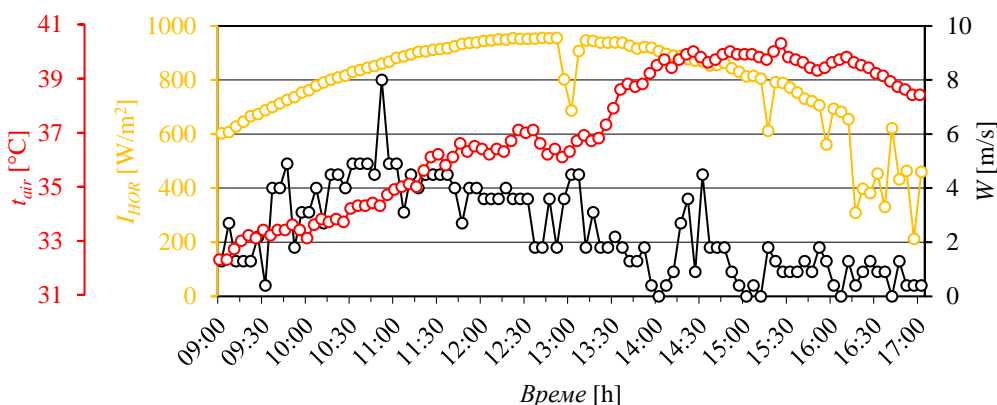
^{VII-4)} Метеоролошки подаци преузети су са метеоролошке станице која постоји у склопу Факултета (поглавље 7.5.2).

соларно зрачење на хоризонталну површину, температура околног (амбијенталног) ваздуха и брзина ветра.



Слика 7.3 – Временски фајл за 29. јун 2021. год. [149]

Крива соларног зрачења (29. јун, Сл. 7.3) имала је приближно правилан параболични облик, без већих изобличења, што је одлика ведрога дана. Интензитет соларног зрачења био је најјачи у 12:40 h (956 W), док се просечна дневна вредност кретака око 814 W. Брзина ветра била је веома варијабилна, са максималним пиковима (сви по 5 m/s) у 11:30 h, 11:35 h и 15:15 h. Средња брзина ветра била је у границама 1,5-1,6 m/s. Истог дана, забележени су тренуци без присуства ваздушних струја (10:30 h, 10:40 h, 14:20 h и 15:20 h). Температура ваздуха (просечна дневна 36,2°C) била је најнижа у 09:00 h (30,1°C). Са друге стране, највиша дневна амбијентална температура била је у 15:15 h (38,9°C) [149].

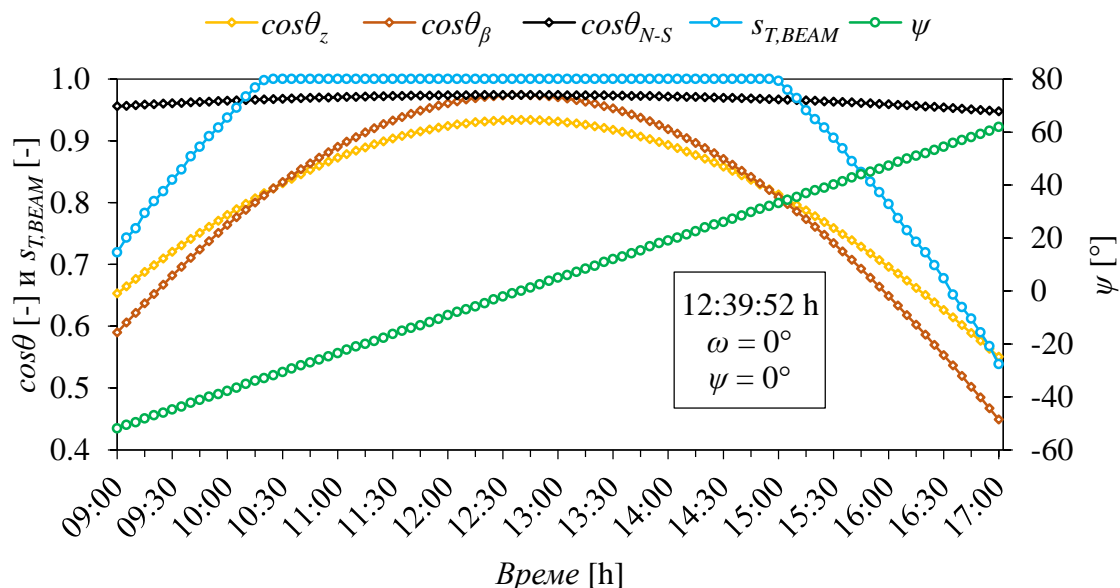


Слика 7.4 – Временски фајл за 30. јун 2021. год. [149]

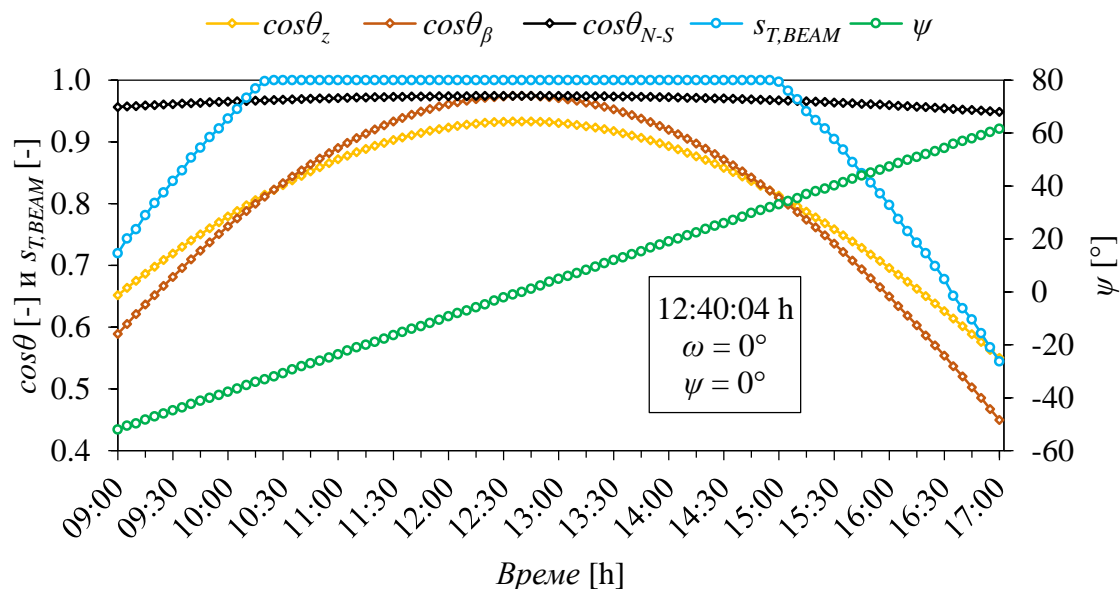
Током већег дела дана, соларна парабола (30. јун, Сл. 7.4) говорила је да се ради о сунчаном дану, са краћим дисконтинуитетима (облачним периодима) током следећих интервала: 12:50-13:10 h, 15:05-15:20 h, 15:50-16:00 h и 16:10-17:00 h. Просечне, максималне и минималне вредности соларног зрачења биле су, редом: 789 W, 956 W (12:40 h и 12:50 h) и 212 W (16:55 h). Током преподневних ветровитих сати (просечне брзине ветра биле су око 3,7 m/s) забележен је тренутак максималне брзине ветра (8 m/s, 10:50 h). За температуру околног ваздуха може се рећи да је имала растући тренд (са 32,3°C, 09:00 h на 38,4°C, 17:00 h) [149].

7.1.2.2 Соларна геометрија

На (Сл. 7.5, Сл. 7.6) приказане су дневне флукуације карактеристичних соларних упадних углова^{VII-5)} током поменутих тест дана (29. јун, Сл. 7.5 и 30. јун, Сл. 7.6): $\cos\theta_\beta$ (фиксна нагнута површина СП за угао β у правцу С-Ј око осе И-3, тј. за РСП) и $\cos\theta_{N-S}$ (површина СП са ЈОП у правцу И-3 око нагнуте С-Ј осе за угао β , тј. за РтАСП). На истим сликама приказане су и криве соларних упадних углова које одговарају хоризонтално постављеним површинама СП ($\cos\theta_z$), да би се јасније уочиле предности и недостаци коришћења разних начина за максимизирање прикупљања соларне енергије.



Слика 7.5 – РСП и РтАСП соларне геометријске перформансе за 29. јун 2021. год.



Слика 7.6 – РСП и РтАСП соларне геометријске перформансе за 30. јун 2021. год.

^{VII-5)} Поглавље 6.2.3.

СП са ЈОП механизмима остварују далеко боље резултате од фиксних СП по питању „хватања“ Сунчевих зрака. Од СП са ЈОП, једина боља опција су СП са ДОП, што и потврђује постојање слободног простора изнад $\cos\theta_{N-S}$ криве (Сл. 7.5, Сл. 7.6) – простор за додатно побољшање перформанси СП. Како су одабрани летњи тест дани доста блиски летњој дугодневници^{VII-6}), фиксна нагнута површина има благу предност коришћења над фиксном хоризонталном површином током поднева (10:30-14:55 h, 29. јун и 10:25-14:55 h, 30. јун), док је ситуација обратна током преподневних (до 10:25 h, 29. јун, односно до 10:20 h, 30. јун) и послеподневних (од 15:00 h, 29. јун, 30. јун) сати.

Тангирање $\cos\theta_{\beta}$ криве са $\cos\theta_{N-S}$ кривом (Сл. 7.5, Сл. 7.6) могуће је једино у тренутку соларног поднева^{VII-7}) (12:40 h, Сл. 7.5, Сл. 7.6), захваљујући углу β . Када би, рецимо, $\beta=0^{\circ}$, тада би постојало тангирање $\cos\theta_{N-S}$ криве и $\cos\theta_z$ криве.

Максималне вредности соларних упадних углова за 29. јун редом су (Сл. 7.5): $\cos\theta_{\beta}=\cos\theta_{N-S}=0,974$ и $\cos\theta_z=0,934$. Сличне вредности поменутих величина важе и за 30. јун (Сл. 7.6): $\cos\theta_{\beta}=\cos\theta_{N-S}=0,975$ и $\cos\theta_z=0,933$.

Како конструкцију РтАСП, због постојања специфичног рЈОП механизма^{VII-8}), одликује и једна негативна карактеристика – соларно сенчење, на (Сл. 7.5, Сл. 7.6) приказане су дневне промене коефицијента соларног сенчења^{VII-9}) ST_{BEAM} , који је у директној функционалној зависности од угла ротирања (закретања^{VII-7}) ψ .

За унапред дефинисане геометријске димензије^{VII-9}), ^{VII-10}) ($D_{T,GLT(o)}$, $D_{T,GLT(i)}$, $D_{T,LAM}$, $r_{T,GLT(o)}$, $r_{T,GLT(i)}$, $r_{T,LAM}$ и $C_{T,GLT}$), РтАСП је у потпуности изложен директном соларном зрачењу у периоду од 10:25-14:55 h (29. јун, Сл. 7.5), и то у износу који одговара $\cos\theta_{N-S}$. У тренуцима потпуне соларне осунчаности, угао ψ кретао се у границама $-31,9^{\circ} \leq \psi \leq 32^{\circ}$. У јутарњим сатима (09:00-10:20 h, 29. јун), РтАСП није у могућности да оствари свој пуни потенцијал, јер ламеле међусобно релативно мењају положај у распону $-52^{\circ} < \psi < -33^{\circ}$, што одговара коефицијенту соларног сенчења $0,72 < ST_{BEAM} < 0,99^{\circ}$. Током вечерњих сати (15:00-17:00 h, 29. јун, Сл. 7.5), јавља се исти негативни ефекат, и то при следећим угловима закретања: $33,1^{\circ}$ ($ST_{BEAM}=0,99$) $< \psi < 61,9^{\circ}$ ($ST_{BEAM}=0,54$).

Како је РтАСП током 30. јуна (Сл. 7.6) у потпуности (100%) био изложен директном соларном зрачењу током временског интервала као и 29. јуна, коефицијент ST_{BEAM} узимао је следеће вредности: -52° (09:00 h, $ST_{BEAM}=0,72$) $< \psi < -33^{\circ}$ (10:20 h, $ST_{BEAM}=0,99$), $-31,9^{\circ}$ (10:25 h) $< \psi$ ($ST_{BEAM}=1$) $< 32^{\circ}$ (14:55 h) и $33,1^{\circ}$ (15:00 h, $ST_{BEAM}=0,99$) $< \psi < 61,6^{\circ}$ (17:00 h, $ST_{BEAM}=0,54$).

7.1.2.3 Теоријски термички индикатори

Теоријске вредности специфичних топлотних снага^{VII-11}) за РСП (Јед. 7.7) [14, 15, 149, 150, 152] и РтАСП (Јед. 7.8) [14, 15, 150, 152], током дводневне (29. јун и 30. јун) тест фазе, приказане су на наредним сликама (Сл. 7.7, Сл. 7.8).

^{VII-6}) Ова разлика се (целодневно гледано) повећава у корист фиксне нагнуте површине са одмицањем од летње дугодневнице, па је у тренутку зимске краткодневнице највећа.

^{VII-7}) Поглавље 6.2.1.

^{VII-8}) Поглавље 4, поглавље 5.3.

^{VII-9}) Поглавље 6.5.2.

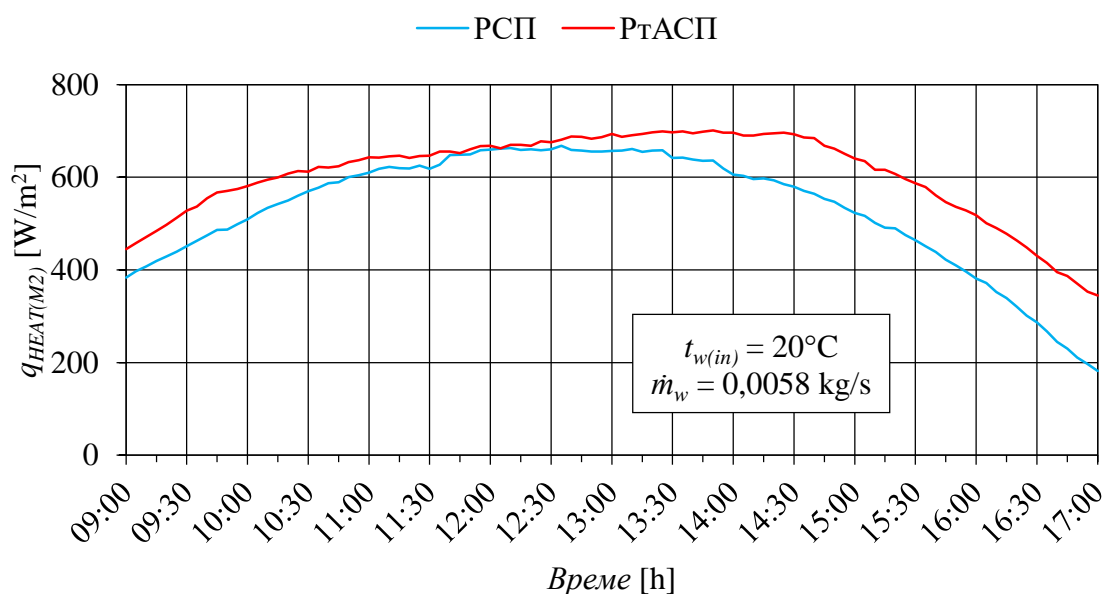
^{VII-10}) Поглавље 5.3.

^{VII-11}) РСП и РтАСП теоријске специфичне топлотне снаге одређене су модификованим М2 методама: (Јед. 6.109) за РСП (поглавље 6.4.1) и (Јед. 6.121) за РтАСП (поглавље 6.4.2).

$$q_{F,HEAT(M2)} = \frac{Q_{F,HEAT(M2)}}{A_{F,ABS(up)}} = \frac{f_{F,HEAT} \left(A_{F,ABS(up)} I_{F,TOT} - \frac{T_{F,w(in)} - T_{air}}{\sum R_{F,LOSS}} \right)}{A_{F,ABS(up)}} \quad (7.7)$$

$$q_{T,HEAT(M2)} = \frac{Q_{T,HEAT(M2)}}{A_{T,LAM(up)}} = \frac{f_{T,HEAT} \left(A_{T,LAM(up)} I_{T,TOT} - \frac{T_{T,w(in)} - T_{air}}{\sum R_{T,LOSS}} \right)}{A_{T,LAM(up)}} \quad (7.8)$$

Поменути изрази (Јед. 7.7, Јед. 7.8) примењени у интензивном^{VII-12)} облику обезбеђују квалитативно поређење РСП и РтАСП соларних конструкција, што је у складу са основним принципима Термодинамике.



Слика 7.7 – РСП и РтАСП теоријске специфичне топлотне снаге за 29. јун 2021. год. [149]

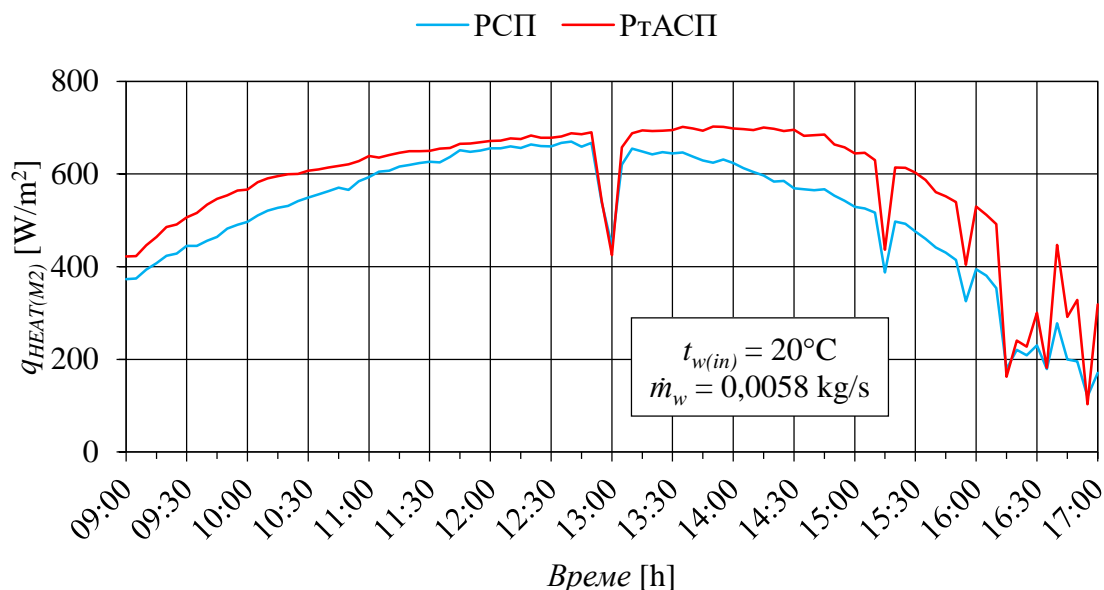
Према овом критеријуму, за целодневне константне вредности масених протока ($\dot{m}_{F,w} = \dot{m}_{T,w} = 0,0058 \text{ kg/s}$) и улазних температура воде ($t_{F,w(in)} = t_{T,w(in)} = 20^\circ\text{C}$), просечна дневна теоријска специфична топлотна снага за РСП током првог тест дана (29. јун, Сл. 7.7) износила је $531,14 \text{ W/m}^2$, што је за 13,85% лошије од РтАСП ($604,7 \text{ W/m}^2$). Други тест дан (30. јун, Сл. 7.8), уз мало другачију расподелу ($q_{F,HEAT(M2)} = 516,2 \text{ W/m}^2$ и $q_{T,HEAT(M2)} = 580,32 \text{ W/m}^2$), такође је био на страни РтАСП (за 12,42%).

Резултати почетних теоријских истраживања (Сл. 7.7, Сл. 7.8) указали су на две занимљиве појаве:

- „Већу“ конкавност РСП функција топлотних снага у односу на РтАСП функције топлотних снага;
- „Тангентност“ РСП и РтАСП функција у тренутку достизања њихових максималних вредности.

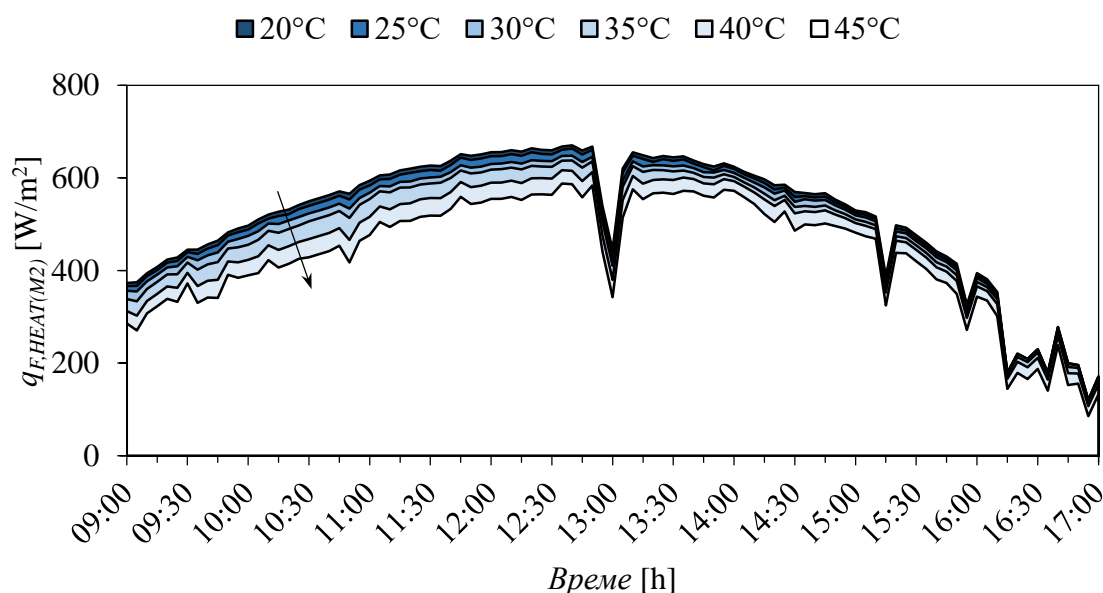
^{VII-12)} Интензивне величине стања не зависе (у овом случају) од вредности активних површина ($A_{F,ABS(up)}$ [m^2] за РСП и $A_{T,LAM(up)}$ [m^2] за РтАСП) за прикупљање соларне енергије.

Прва појава јављала се у преподневним и послеподневним сатима и одговорна је за повећање разлика међу СП (у корист РтАСП). Са друге стране, другу појаву могуће је било уочити око соларног поднева, што је за резултат имало анулирање истих.

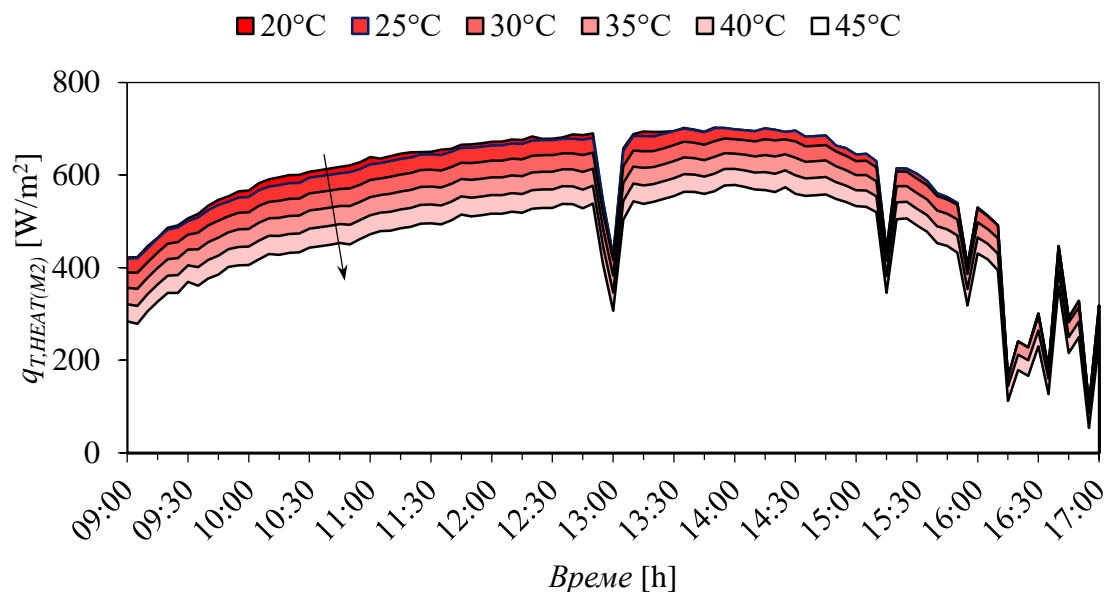


Слика 7.8 – РСП и РтАСП теоријске специфичне топлотне снаге за 30. јун 2021. год. [149]

Поменуте појаве у ствари су последице примене специфичног рЈОП механизма на конструкцију РтАСП. Овај механизам, у првом случају, и поред ефекта соларног сенчења, обезбеђује веће прикупљање соларне енергије. Други случај био је могућ јер су све ламеле у конструкцији РтАСП једном дневно долазиле у једну заједничку раван, која је паралелна равни апсорбера РСП.



Слика 7.9 – Промена РСП теоријске специфичне топлотне снаге у зависности од улазне температуре воде за 30. јун 2021. год.



Слика 7.10 – Промена РТАСП теоријске специфичне топлотне снаге у зависности од улазне температуре воде за 30. јун 2021. год.

Познато је да се са променама улазних температура радних флуида, термичке перформансе (топлотна снага и топлотни губици) СП мењају. Исто важи и за конструкције (РСП и РТАСП) анализираних у оквиру ове докторске дисертације.

Међутим, са повишењем улазних температура воде (пример 30. јун 2021. год.) уочена је једна занимљива појава, а то је „већа збијеност топлотних година“ у случају РСП (Сл. 7.9), него код РТАСП (Сл. 7.10). Овај податак у ствари говори да је негативна промена градијента топлотне снаге (позитивна промена градијента топлотних губитака) у случају РТАСП (са $580,32 \text{ W/m}^2$ за $t_{T,w(in)}=20^\circ\text{C}$ на $447,59 \text{ W/m}^2$ за $t_{T,w(in)}=45^\circ\text{C}$) бржа од промене РСП градијента топлотне снаге (са $516,2 \text{ W/m}^2$ за $t_{F,w(in)}=20^\circ\text{C}$ на $434,07 \text{ W/m}^2$ за $t_{F,w(in)}=45^\circ\text{C}$).

Овом методом може се одредити тзв. критична тачка примене РТАСП, након које РСП добија предност коришћења, иако РТАСП прати кретање положаја Сунца током дана.

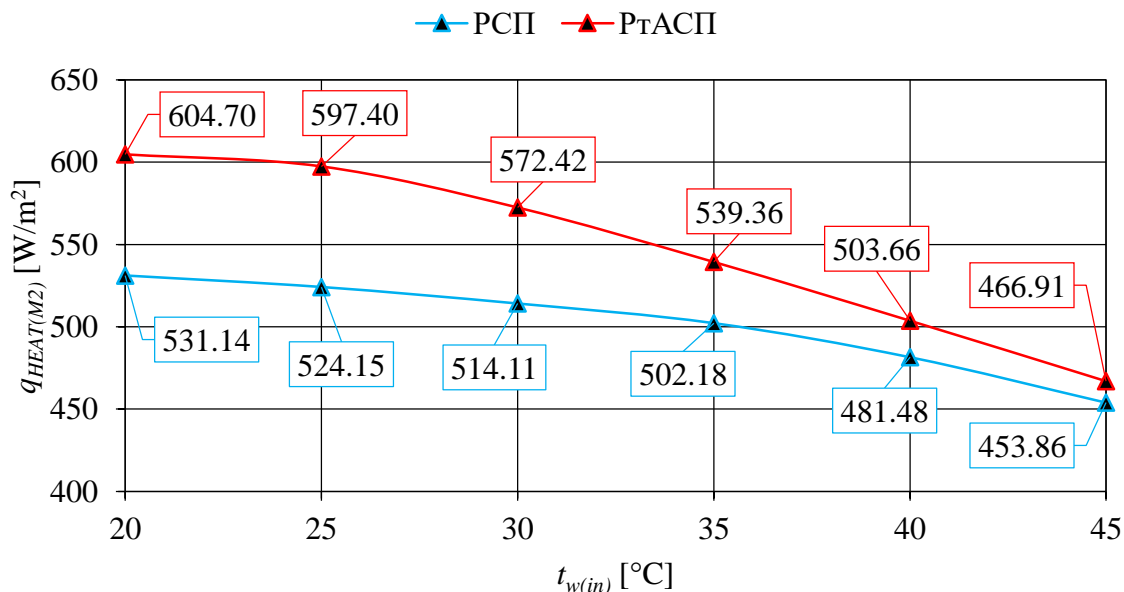
Током првог тест дана (29. јун, Сл. 7.11) одређене су следеће вредности просечних дневних теоријских специфичних топлотних снага за РСП: $531,14 \text{ W/m}^2$ ($t_{F,w(in)}=20^\circ\text{C}$), $524,15 \text{ W/m}^2$ ($t_{F,w(in)}=25^\circ\text{C}$), $514,11 \text{ W/m}^2$ ($t_{F,w(in)}=30^\circ\text{C}$), $502,18 \text{ W/m}^2$ ($t_{F,w(in)}=35^\circ\text{C}$), $481,48 \text{ W/m}^2$ ($t_{F,w(in)}=40^\circ\text{C}$) и $453,86 \text{ W/m}^2$ ($t_{F,w(in)}=45^\circ\text{C}$).

Просечне дневне теоријске специфичне топлотне снаге за РТАСП за исти дан (29. јун, Сл. 7.11) биле су: $604,7 \text{ W/m}^2$ ($t_{T,w(in)}=20^\circ\text{C}$), $597,4 \text{ W/m}^2$ ($t_{T,w(in)}=25^\circ\text{C}$), $572,42 \text{ W/m}^2$ ($t_{T,w(in)}=30^\circ\text{C}$), $539,36 \text{ W/m}^2$ ($t_{T,w(in)}=35^\circ\text{C}$), $503,66 \text{ W/m}^2$ ($t_{T,w(in)}=40^\circ\text{C}$) и $466,91 \text{ W/m}^2$ ($t_{T,w(in)}=45^\circ\text{C}$).

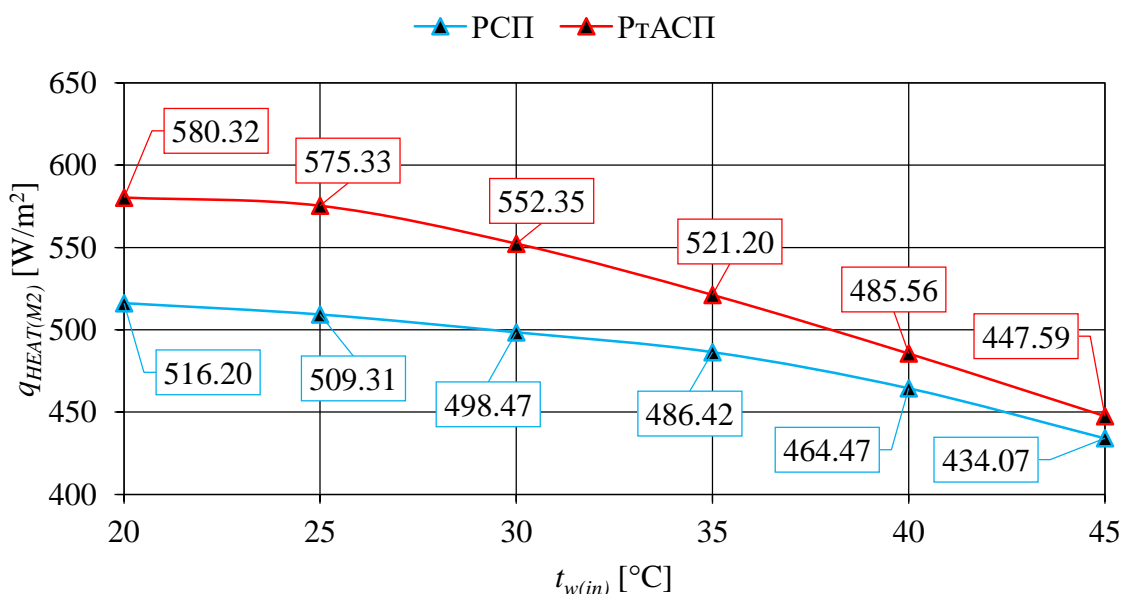
Лако се може доћи до закључка (Сл. 7.11) да се термичке разлике између РСП и РТАСП крећу од 13,85% ($t_{w(in)}=20^\circ\text{C}$) до 2,88% ($t_{w(in)}=45^\circ\text{C}$).

Током другог тест дана (30. јун, Сл. 7.12) РСП просечне дневне теоријске специфичне топлотне снаге биле су ниже због облачних периода током дана: $516,2 \text{ W/m}^2$ ($t_{F,w(in)}=20^\circ\text{C}$), $509,31 \text{ W/m}^2$ ($t_{F,w(in)}=25^\circ\text{C}$), $498,47 \text{ W/m}^2$ ($t_{F,w(in)}=30^\circ\text{C}$), $486,42 \text{ W/m}^2$ ($t_{F,w(in)}=35^\circ\text{C}$), $464,47 \text{ W/m}^2$ ($t_{F,w(in)}=40^\circ\text{C}$) и $434,07 \text{ W/m}^2$ ($t_{F,w(in)}=45^\circ\text{C}$).

Насупрот конструкције РСП, РТАСП показао је следеће резултате (Сл. 7.12): $580,32 \text{ W/m}^2$ ($t_{T,w(in)}=20^\circ\text{C}$), $575,33 \text{ W/m}^2$ ($t_{T,w(in)}=25^\circ\text{C}$), $552,35 \text{ W/m}^2$ ($t_{T,w(in)}=30^\circ\text{C}$), $521,2 \text{ W/m}^2$ ($t_{T,w(in)}=35^\circ\text{C}$), $485,56 \text{ W/m}^2$ ($t_{T,w(in)}=40^\circ\text{C}$) и $466,91 \text{ W/m}^2$ ($t_{T,w(in)}=45^\circ\text{C}$).



Слика 7.11 – PCП и PтАСП просечне дневне теоријске топлотне снаге у зависности од улазних температура воде за 29. јун 2021. год.



Слика 7.12 – PCП и PтАСП просечне дневне теоријске топлотне снаге у зависности од улазних температура воде за 30. јун 2021. год.

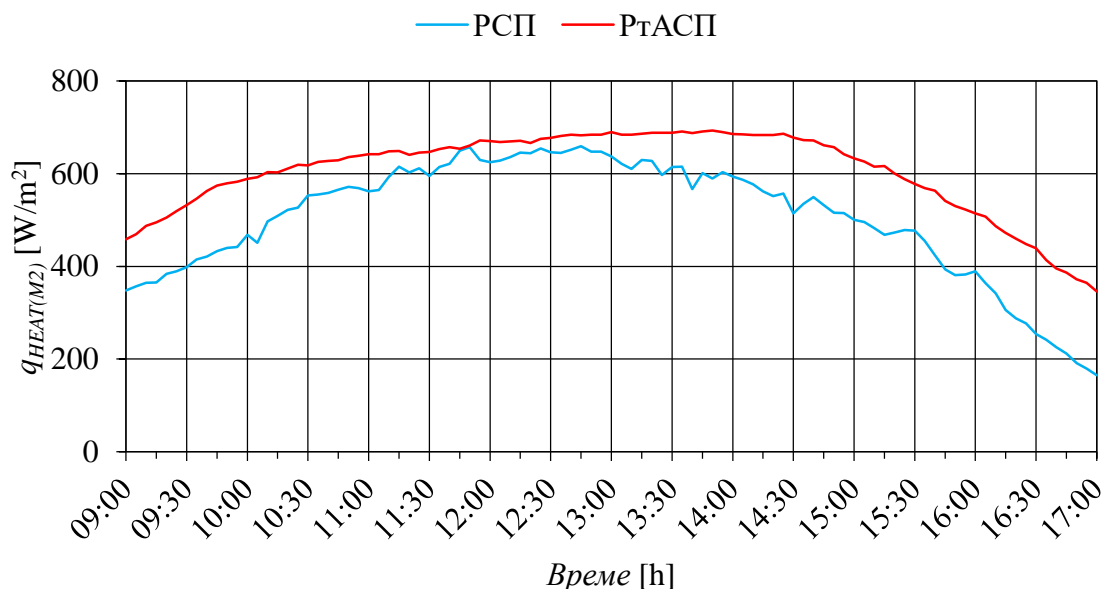
У овом случају (Сл. 7.12), предност коришћења PтАСП опада са 12,42% ($t_{w(in)}=20^{\circ}\text{C}$) на 3,11% ($t_{w(in)}=45^{\circ}\text{C}$).

7.1.3 Резултати теоријског истраживања

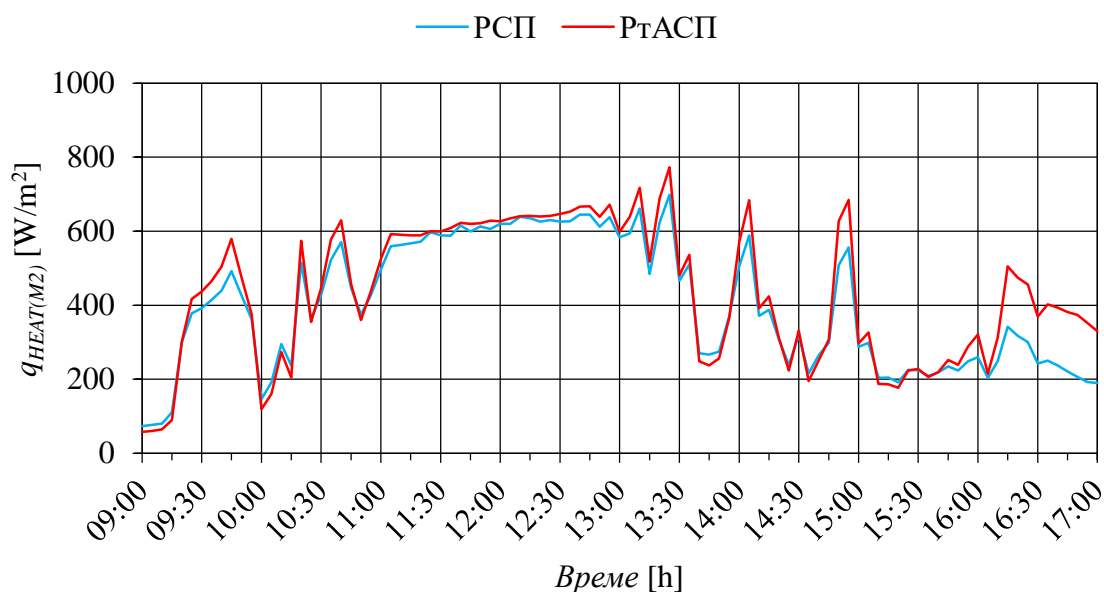
7.1.3.1 Теоријска специфична топлотна снага

Поређење PCП и PтАСП теоријских специфичних топлотних снага, током четворомесечног периода, приказано је на наредним дијаграмима: 15. јул (Сл. 7.13), 29. јул (Сл. 7.14), 16. август (Сл. 7.15), 10. септембар (Сл. 7.16) и 4. октобар (Сл. 7.17).

Теоријско четворомесечно истраживање $q_{F,HEAT(M2)}$ и $q_{T,HEAT(M2)}$ спроведено је употребом одговарајућих РСП и РтАСП алгоритама^{VII-13)}, измерених^{VII-14)} вредности масених протока и улазних температура воде, као и реалних^{VII-15)} метеоролошких (временских) датотека.



Слика 7.13 – РСП и РтАСП теоријске специфичне топлотне снаге за 15. јул 2021. год.



Слика 7.14 – РСП и РтАСП теоријске специфичне топлотне снаге за 29. јул 2021. год.

Криве $q_{F,HEAT(M2)}$ и $q_{T,HEAT(M2)}$ (Сл. 7.14) показале су да РСП и РтАСП имају сличне топлотне снаге у тренуцима када је соларно зрачење слабијег интензитета, односно када

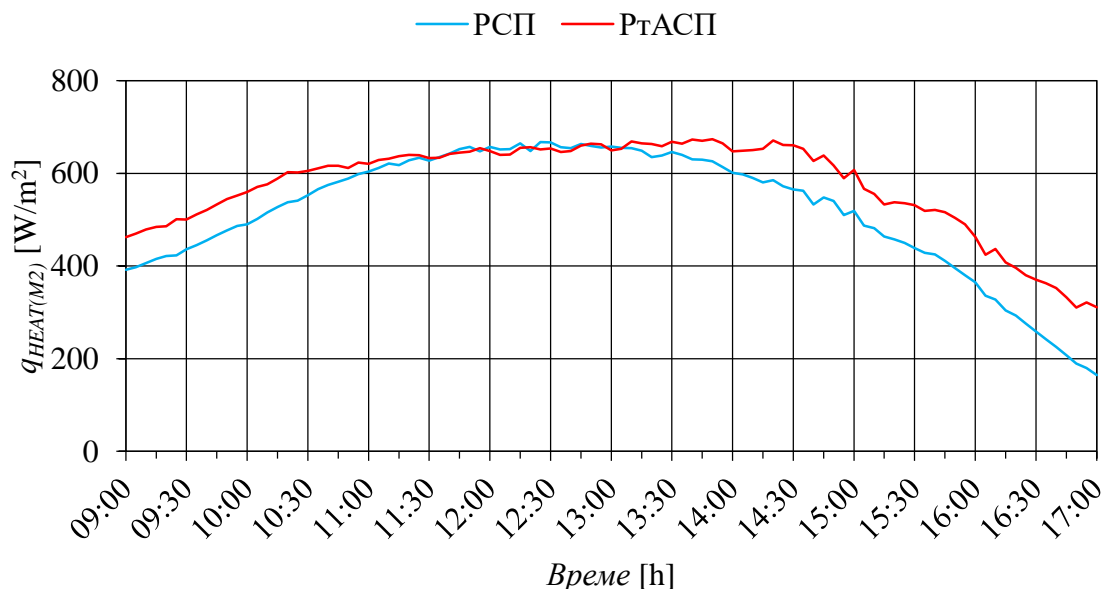
^{VII-13)} Поглавље 7.1.1 (Сл. 7.1, Сл. 7.2).

^{VII-14)} Поглавље 7.5.1.2 (Таб. 7.8).

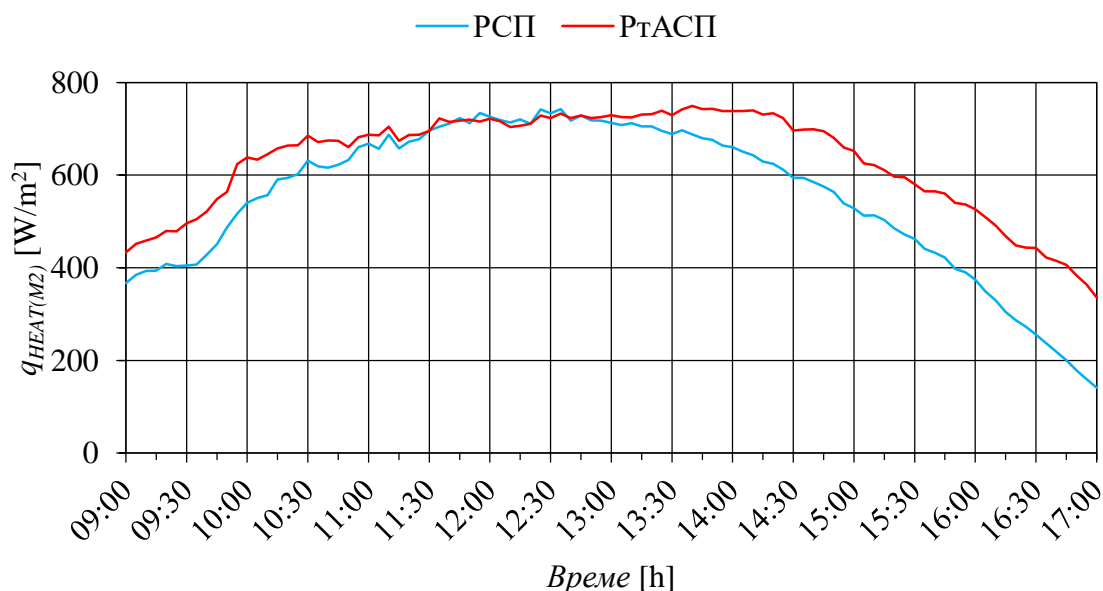
^{VII-15)} Поглавље 7.5.2

је удео дифузног соларног зрачења у укупном соларном износу већи од удела директне компоненте (29. јул): 09:00-09:20 h, 09:55-10:00 h, 10:10 h, 10:25-10:30 h, 10:45-11:00 h, 13:30-13:55 h, 14:10 h, 14:20-14:45 h, 15:00-15:50 h и 16:05 h.

Чим се ова ситуација промени у корист директне соларне компоненте, $R_{тАСП}$ топлотна снага постаје већа од РСП (Сл. 7.14): 17,75% (09:45 h), 11,53% (10:20 h), 10,64% (10:35 h), 10,66% (13:25 h), 16,14% (14:05 h), 23,49% (14:50 h) и 25,47% (16:10 h).

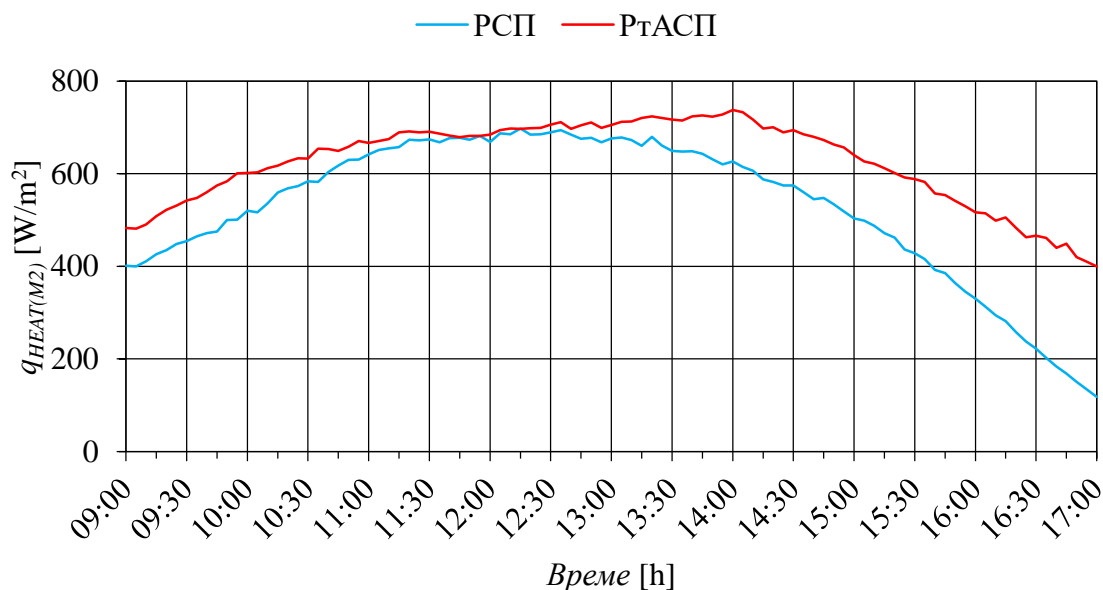


Слика 7.15 – РСП и RтАСП теоријске специфичне топлотне снаге за 16. август 2021. год.



Слика 7.16 – РСП и RтАСП теоријске специфичне топлотне снаге за 10. септембар 2021. год.

Просечне дневне вредности $q_{F,HEAT(M2)}$ за приказане датуме биле су (Сл. 7.13-7.17): 504,14 W/m² (15. јул), 399,4 W/m² (29. јул), 520,02 W/m² (16. август), 553,95 W/m² (10. септембар) и 529,22 W/m² (4. октобар).



Слика 7.17 – РСП и РтАСП теоријске специфичне топлотне снаге за 4. октобар 2021. год.

Просечне дневне вредности $q_{T,HEAT(M2)}$ биле су веће од $q_{F,HEAT(M2)}$ вредности за (Сл. 7.13-7.17): 19,78% ($603,88 \text{ W/m}^2$, 15. јул), 7,96% ($431,18 \text{ W/m}^2$, 29. јул), 10,4% ($574,09 \text{ W/m}^2$, 16. август), 13,72% ($629,94 \text{ W/m}^2$, 10. септембар) и 18,14% ($625,25 \text{ W/m}^2$, 4. октобар).

7.1.3.2 Мапирање соларног сенчења

Процентуална изложеност РтАСП активне површине (ламела, тј. апсорбера) директном соларном зрачењу, за разлику од математичког приступа^{VII-16)}, може бити одређена (са задовољавајућом тачношћу) доста брже и лакше употребом одговарајућих дијаграма.

У ту сврху, на слици (Сл. 7.18), разрађена је и представљена мапа соларног сенчења, која, у овом случају, одговара четворомесечном истраживачком периоду конструкције РтАСП, са следећим геометријским карактеристикама: ($D_{T,GLT(o)}=110 \text{ mm}$, $D_{T,GLT(i)}=104 \text{ mm}$, $D_{T,LAM}=100 \text{ mm}$ и $C_{T,GLT}=125 \text{ mm}$).

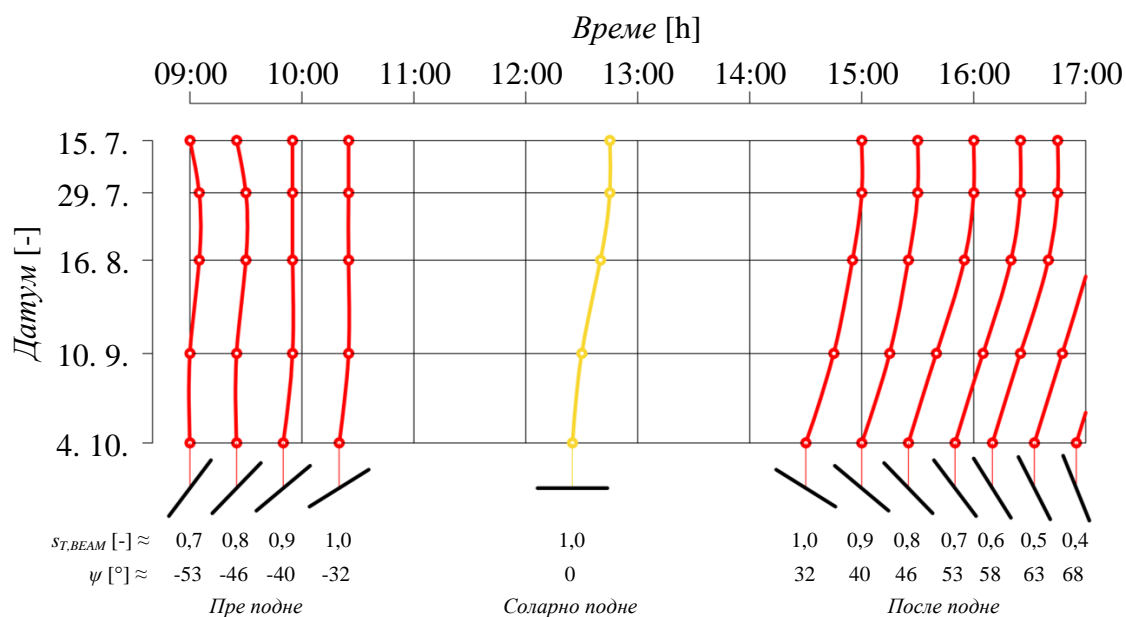
Овај дијаграм (Сл. 7.18) може се користити само за РтАСП у оквиру ове докторске дисертације, али се по угледу на њега могу разрадити сличне мапе соларног сенчења и за друге СП које карактерише поменути (негативни) ефекат. Тада у обзир треба узети и одговарајуће геометријске специфичности анализираних соларних конструкција.

На апсисној оси (са горње стране) приказани су временски интервали са једночасовним кораком у складу са експерименталним условима истраживања РтАСП. Из истих разлога, у одговарајућој размени, на ординатној оси уцртани су следећи датуми: 15. јул, 29. јул, 16. август, 10. септембар и 4. октобар.

Жутом бојом представљена је нулта изосенка – тренутак соларног поднева ($\omega=0^\circ$) када је (доња апсиса): $\psi=0$ и $ST_{BEAM}=1$. Црвене изосенке одговарају следећим вредностима коефицијента ST_{BEAM} (доња апсиса, Сл. 7.18): пре подне (од 0,7 до 1,0) и после подне (0,4 до 1). Овим вредностима ST_{BEAM} приближно одговарају следеће вредности ψ (Сл. 7.18): -53° ($ST_{BEAM}=0,7$), -46° ($ST_{BEAM}=0,8$), -40° ($ST_{BEAM}=0,9$), -32°

^{VII-16)} Поглавље 6.5.2

($ST_{BEAM}=1,0$), 32° ($ST_{BEAM}=1,0$), 40° ($ST_{BEAM}=0,9$), 46° ($ST_{BEAM}=0,8$), 53° ($ST_{BEAM}=0,7$), 58° ($ST_{BEAM}=0,6$), 63° ($ST_{BEAM}=0,5$) и 68° ($ST_{BEAM}=0,4$).



Слика 7.18 – РТАСП мапа соларног сенчења

Примера ради, послеподневна изосенка $ST_{BEAM}=0,8$, апсису 15. јул сече у 16:00 h, у исто време сече апсису 29. јул, док апсису 10. септембар сече у 15:40 h.

Вредности других коефицијената ST_{BEAM} , за било које дане између 15. јула и 4. октобра, налазе се у пресеку жељених еквидистантних изосенки и ордината датума. У том случају треба водити рачуна о размери, да би прочитана вредност била што прецизнија.

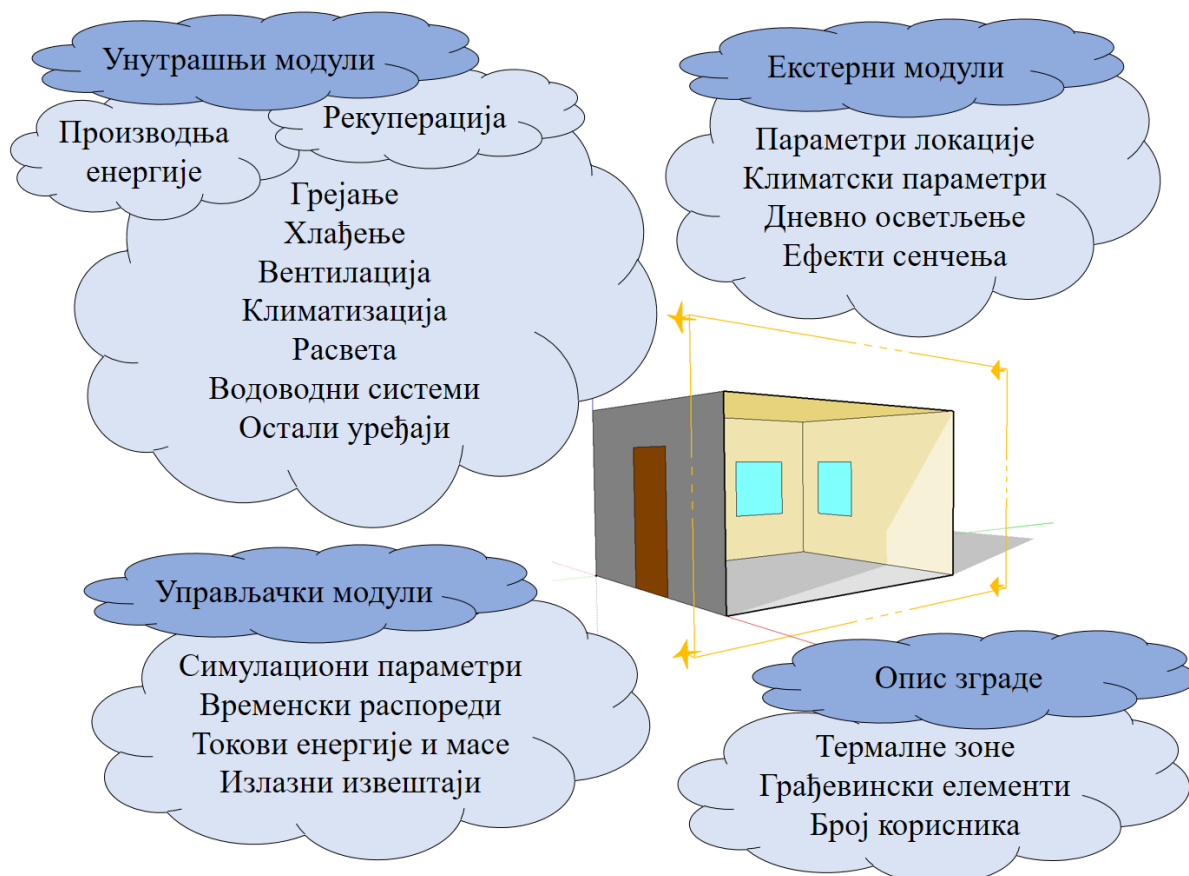
7.2 *EnergyPlus* истраживање РСП и РтАСП

Иако су у оквиру ове докторске дисертације развијени и представљени одговарајући РСП и РтАСП математички модели и прорачунски алгоритми, инжењерска струка је развила велики број специјализованих софтверских алата за предвиђање понашања најразличитијих термо-енергетских система и уређаја.

EnergyPlus софтверски пакет налази велику практичну примену приликом енергетског билансирања зграда разних намена. Међутим, његове могућности су у овом (конкретном) случају, до сада, биле ограничене, јер симулирање покретних соларних конструкција, попут РтАСП, није било могуће. Аутор је ту баријеру заобишао, па се нада да ће овај део докторске дисертације читаоцима бити посебно интересантан због начина на који је то урађено.

7.2.1 *EnergyPlus* софтвер

Софтвер *EnergyPlus* [198] веома је користан алат намењен симулирању енергетског и еколошког понашања зграда (Сл. 7.19) разних намена^{VII-17}.



Слика 7.19 – *EnergyPlus* програмска шема [199]

^{VII-17} Стамбене зграде [200], индустријска постројења [201], школске установе [202], канцеларијски простор [203], спортске дворане [204], угоститељски објекти [205], интернати и домови [206], итд.

Захваљујући имплементирању великог броја модула подељених у четири велике групе (Сл. 7.19), жељени модел зграде, претходно креиран^{VII-18)} од стране корисника, може бити подвргнут разним термичким прорачунима са веома детаљним излазним извештајима, при чему симулациони корак може бити мањи од часовног.

EnergyPlus своје корене има у *BLAST*^{VII-19)} [208] и *DOE-2* [209] програмима, који су развијени у касним седамдесетим и раним осамдесетим годинама XX века, са наступањем велике светске нафтне кризе.

EnergyPlus се, због низа предности (Сл. 7.19), временом усталио у ширим научним круговима. То потврђује и велики број научних радова у којима су *EnergyPlus* нумерички модели прошли експерименталне провере, чиме је извршена њихова верификација.

7.2.2 *EnergyPlus* нумеричка поставка

7.2.2.1 *EnergyPlus* сценарио симулација

Нумеричко истраживање РТАСП у програму *EnergyPlus*, у правом смислу те речи, није могуће из следећих разлога:

- Графичко ограничење (*Google SketchUp*) – Платформа *Legacy OpenStudio* не дозвољава креирање цилиндричних форми, попут СЦ;
- Симулационо ограничење (*EnergyPlus*) – Софтвер не поседује модул који пружа могућност термичке анализе соларних уређаја са механизмама за праћење положаја Сунца, већ само модул за непокретне, тј. фиксне^{VII-20)} соларне конструкције.

Узимајући у обзир поменута графичка и симулациона ограничења, у овој фази нумеричких истраживања, ипак су развијена три специфична модела СП, истих^{VII-21)} апсорберских површина (Сл. 7.20, Таб. 7.1) [111]:

- Сценарио 1 (С1) – РСП^{VII-22)} (класичан непокретан раван СП са нагнутом С-Ј осом, Сл. 7.20а);
- Сценарио 2 (С2) – РСП са аЈОП^{VII-23)} (раван СП са нагнутом С-Ј осом и апсолутним једноосним праћењем кретања Сунца у правцу И-З, Сл. 7.20б);
- Сценарио 3 (С3) – РСП са рЈОП^{VII-24)} (раван СП са нагнутом С-Ј осом и релативним једноосним праћењем кретања Сунца у правцу И-З, Сл. 7.20в).

^{VII-18)} За креирање 3D геометрије најчешће се користи софтвер *Google SketchUp* [207], који са софтвером *EnergyPlus* комуницира преко платформе *Legacy OpenStudio*.

^{VII-19)} *Building Loads Analysis and System Thermodynamics*.

^{VII-20)} Соларни пријемници (СП, и то РСП), фотонапонски пријемници (ФНП) и хибридни соларни пријемници (ХСП).

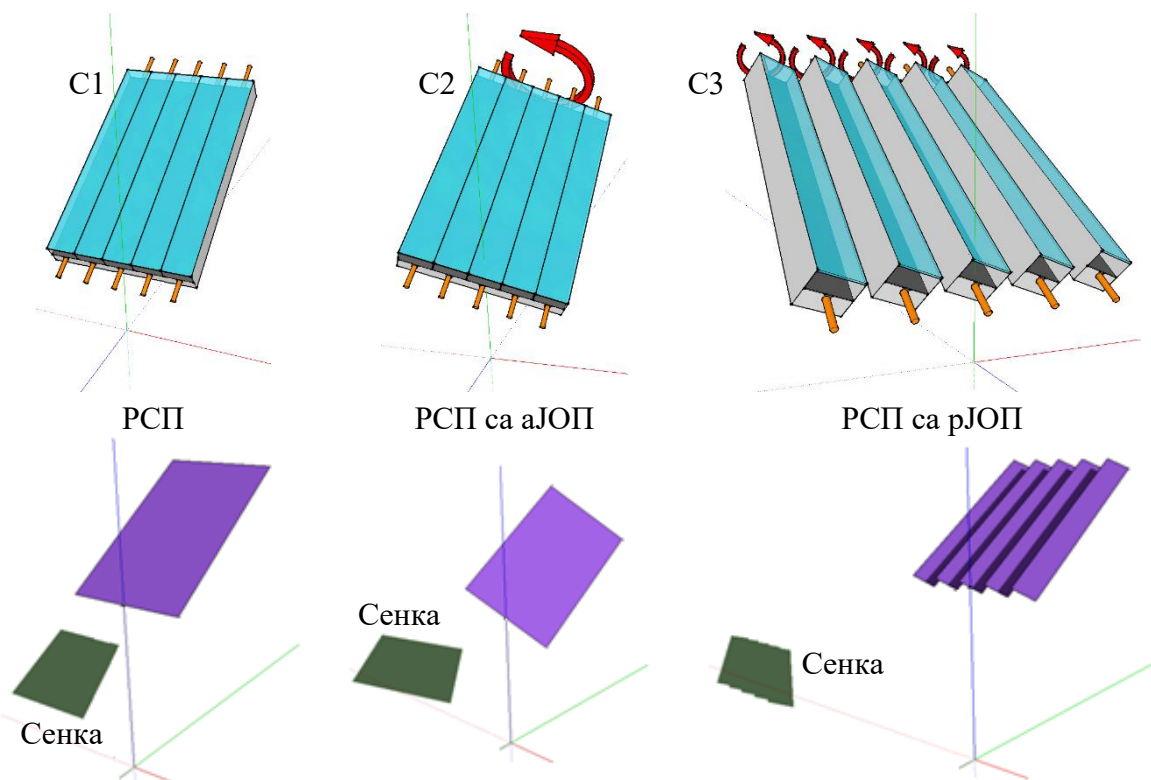
^{VII-21)} Апсорберске површине (раван СП, РСП са аЈОП и РСП са рЈОП) дефинисане су у складу са теоријским (поглавље 6, поглавље 7.1) и експерименталним (поглавље 5.3, поглавље 7.5) истраживањима РСП и РТАСП конструкција у оквиру ове докторске дисертације.

^{VII-22)} Овај модел апроксимира конструкцију РСП теоријски (поглавље 6, поглавље 7.1) и експериментално (поглавље 5.3, поглавље 7.5) истражене у оквиру ове докторске дисертације.

^{VII-23)} Овај модел би апроксимирао конструкцију РСП са интегрисаним механизмом за апсолутно праћење кретања положаја Сунца током дана.

^{VII-24)} Овај модел би апроксимирао елементарне (са једном апсорберском плочом) РСП, паралелно низане, са појединачним интегрисаним механизмима за релативно праћење кретања положаја Сунца током дана и централном (заједничком) управљачком јединицом.

Геометрије поменутих СП (Сл. 7.20) дефинисане су у програму *Google SketchUp*, и то алатом *New EnergyPlus Shading Group*, из платформе *Legacy OpenStudio*.



Слика 7.20 – *EnergyPlus* нумерички анализирани модели СП [111]
а) РСП; б) РСП са аЈОП; в) РСП са рЈОП

Табела 7.1 – Геометријске карактеристике *EnergyPlus* нумерички анализираних модела СП [111]

Сценарио	РСП	β [°]	n_{ABS} [-]	$L_{ABS(1)}$ [mm]	L_{ABS} [mm]	u_{ABS} [mm]	e_{ABS} [mm]	ASO [m ²]	TSO [m ²]	VO [m ³]
C1	Фиксни									-
C2	аЈОП	34	5	100	500	800	700	0,4	0,4	0,157
C3	рЈОП	[10]			600*				0,48	0,0314

* Растојање између апсорберских плоча је 25 mm.

Симулациона ограничења, у случају РСП са аЈОП (Сл. 7.20б) и РСП са рЈОП (Сл. 7.20в), превазиђена су вештачким (корак по корак^{VII-25)} креирањем услова, који су опонашали механизме за праћење кретања положаја Сунца, чиме је извршено позитивно померање лимита коришћења програма *EnergyPlus*.

За сваки минут^{VII-26)} током трајања обданице, за сваки угао ротације^{VII-27)} ψ , вршен је прорачун укупног долазног^{VII-28)} соларног зрачења на површине анализираних СП (Сл.

^{VII-25)} Енгл. *step-by-step*.

^{VII-26)} Софтверски лимит.

^{VII-27)} Од -90° до 90°, при чему корак закретања, тј. ротирања износи 1°.

^{VII-28)} Почетна нумеричка истраживања, тј. одређивање укупног долазног соларног зрачења на површине РСП и РСП са аЈОП презентовано је у [210].

7.20), да би се одредиле њихове топлотне снаге^{VII-29)}. Максимална вредност топлотне снаге (важи за све СП) у датом временском тренутку, учествовала је у коначном формирању одговарајуће СП дневне криве топлотне снаге.

Термичке перформансе свих СП треба сагледати из више углова, што подразумева употребу различитих поредбених индикатора. У овом случају, уведена су три простора (2D и 3D) индикатора, посебно занимљива у случају покретних соларних конструкција (**Таб. 7.1**) [111]:

- ASO [m^2] – Активна површинска заузетост^{VII-30)} (служи за прикупљање соларне енергије која одговара површини $A_{F,ABS(up)}$);
- TSO [m^2] – Укупна површинска заузетост^{VII-31)} (узима у обзир и празан 2D простор између апсорберских плоча, који постоји да би се обезбедило њихово неометано ротирање, тј. закретање);
- VO [m^3] – Укупна запреминска заузетост^{VII-32)} (узима у обзир 3D простор који се обезбеђује за неометано функционисање покретних соларних система).

7.2.2.2 *EnergyPlus* модел термичког понашања соларног пријемника

Нумерички модел за одређивање термичке ефикасности СП (у овом случају РСП, РСП са аЈОП и РСП са рЈОП), у оквиру софтвера *EnergyPlus*, прилично је једноставан и базира се на примени квадратне^{VII-33)} корелације (**Јед. 7.9**) [199]:

$$\eta_F^{e+} = c_{01} + c_{02} \frac{T_{F,w(in)} - T_{air}}{I_{F,TOT}^{e+}} + c_{03} \frac{(T_{F,w(in)} - T_{air})^2}{I_{F,TOT}^{e+}} \quad (7.9)$$

где су [199]: η_F^{e+} [-] термички степен корисности за СП, c_{01} [-] нулти коефицијент квадратне корелације за СП, c_{02} [-] примарни коефицијент квадратне корелације за СП, c_{03} [-] секундарни коефицијент квадратне корелације за СП и $I_{F,TOT}^{e+}$ [W/m^2] укупно долазно соларно зрачење на површине анализираних СП.

Преко параметра η_F^{e+} и укупног долазног соларног топлотног флукса за СП $Q_{F,SUN}^{e+}$ [W] ($Q_{F,SUN}^{e+} = A_{F,ABS(up)} I_{F,TOT}^{e+}$) може се одредити топлотна снага СП (**Јед. 7.10**) $Q_{F,HEAT}^{e+}$ [W] [199]:

$$Q_{F,HEAT}^{e+} = \eta_F^{e+} Q_{F,SUN}^{e+} = \eta_F^{e+} A_{F,ABS(up)} I_{F,TOT}^{e+} \quad (7.10)$$

Након одређивања $Q_{F,SUN}^{e+}$, за унапред познате вредности ($\dot{m}_{F,w}$, c_p и $T_{F,w(in)}$), може се одредити температура воде на излазу из СП $T_{F,w(out)}$ [K] (**Јед. 7.11**) [199]:

^{VII-29)} *EnergyPlus* нумерички прорачуни базирани су на пуштању преко 540 (180×3) симулација.

^{VII-30)} Енгл. *active surface occurance*.

^{VII-31)} Енгл. *total surface occurance*.

^{VII-32)} Енгл. *volume occurance*.

^{VII-33)} За СП чија је активна површина за прикупљање соларне енергије мања од 1 m^2 , коефицијенти квадратне корелације су [199]: $c_{01}=0,6$, $c_{02}=-3,8665$ и $c_{03}=0,0015$.

$$T_{F,w(out)} = \frac{Q_{F,HEAT}^{e+}}{\dot{m}_{F,w} c_p} + T_{F,w(in)} \quad (7.11)$$

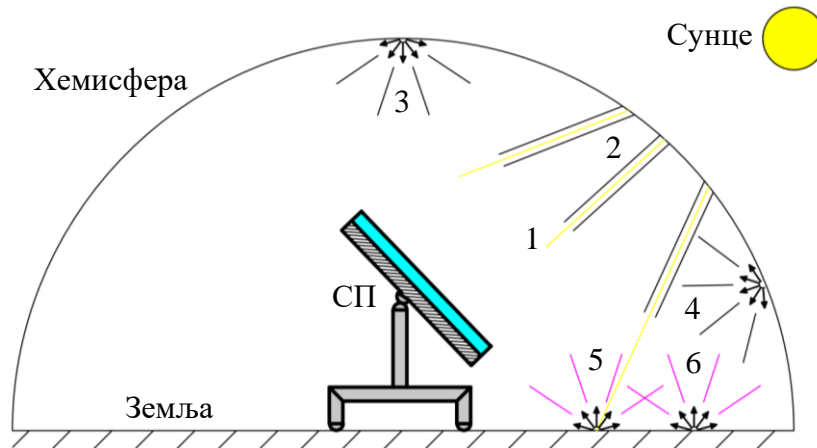
Величина укупног долазног соларног зрачења $I_{F,TOT}^{e+}$ (Јед. 7.12, Сл. 7.21), на површину, било ког СП, софтверски се рачуна као збир долазног директног $I_{F,BEAM}^{e+}$ [W/m^2], долазног дифузног $I_{F,DIFF}^{e+}$ [W/m^2] (Јед. 7.13) и долазног рефлектованог $I_{F,REFL}^{e+}$ [W/m^2] (Јед. 7.14) долазног соларног зрачења [199]:

$$I_{F,TOT}^{e+} = I_{F,BEAM}^{e+} + I_{F,DIFF}^{e+} + I_{F,REFL}^{e+} \quad (7.12)$$

$$I_{F,DIFF}^{e+} = I_{F,DIFF-CIR}^{e+} + I_{F,DIFF-SD}^{e+} + I_{F,DIFF-SH}^{e+} \quad (7.13)$$

$$I_{F,REFL}^{e+} = I_{F,REFL-GRO}^{e+} = I_{F,REFL-GRO(BEAMtoBEAM)}^{e+} + I_{F,REFL-GRO(BEAMtoDIFF)}^{e+} \quad (7.14)$$

где су [199]: $I_{F,DIFF-CIR}^{e+}$ [W/m^2] укупно долазно дифузно соларно зрачење на површину СП пореклом из уске области око директног соларног зрачења, $I_{F,DIFF-SD}^{e+}$ [W/m^2] укупно долазно дифузно соларно зрачење на површину СП пореклом из небеске куполе, $I_{F,DIFF-SH}^{e+}$ [W/m^2] укупно долазно дифузно соларно зрачење на површину СП пореклом из небеског свода, $I_{F,REFL-GRO}^{e+}$ [W/m^2] укупно долазно рефлектовано (од земље) соларно зрачење на површину СП, $I_{F,REFL-GRO(BEAMtoBEAM)}^{e+}$ [W/m^2] укупно директно-директно долазно рефлектовано (од земље) соларно зрачење на површину СП и $I_{F,REFL-GRO(BEAMtoDIFF)}^{e+}$ [W/m^2] укупно директно-дифузно долазно рефлектовано (од земље) соларно зрачење на површину СП.



Слика 7.21 – EnergyPlus модел укупног долазног соларног зрачења на површину СП

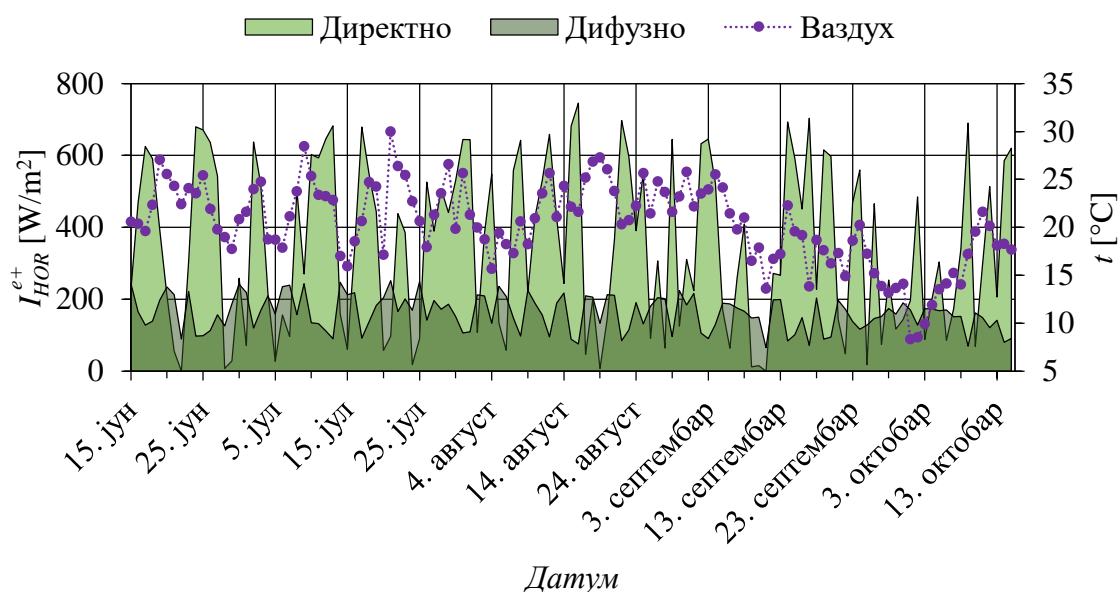
1 – $I_{F,BEAM}^{e+}$; 2 – $I_{F,DIFF-CIR}^{e+}$; 3 – $I_{F,DIFF-SD}^{e+}$; 4 – $I_{F,DIFF-SH}^{e+}$; 5 – $I_{F,REFL-GRO(BEAMtoBEAM)}^{e+}$;

6 – $I_{F,REFL-GRO(BEAMtoDIFF)}^{e+}$

7.2.2.3 EnergyPlus локацијски и климатски параметри

Крагујевац (44,02°N и 20,92°E) је главни град Шумадијског округа у централном делу Србије. Смештен је на реци Лепеници, око 100 km јужно од престонице Београда (часовна зона +1 h). Просечна надморска висина на којој се Крагујевац налази је 209 m. Клима је умерено континентална, са израженим годишњим добима. Лета су топла (до 37°C) и влажна. Са друге стране, зиме су хладне (испод -12°C) и са снегом [111, 198].

На дијаграму (Сл. 7.22), током четворомесечног^{VII-34)} периода (од 15. јуна до 15. октобра), приказане су просечне дневне вредности директног и дифузног соларног зрачења на хоризонталну површину, као и просечне дневне вредности температуре околног ваздуха [111, 198].



Слика. 7.22 – EnergyPlus климатски параметри за град Крагујевац за четворомесечни период од 15. јуна до 15. октобра [111, 198]

Просечне дневне вредности директног соларног зрачења на хоризонталну површину, током анализираниог периода, кретале су се до максималних 746 W/m^2 (16. август, Сл. 7.22). Максималне и минималне просечне дневне вредности дифузног соларног зрачења, током истог периода, биле су, респективно: 252 W/m^2 (21. јул) и 65 W/m^2 (11. септембар). Температура ваздуха (такође просечна дневна) била је најнижа 1. октобра (8,3°C), док је највиша ($\approx 30^{\circ}C$) забележена 21. јула [111, 198].

7.2.3 Резултати EnergyPlus истраживања

Просечне дневне топлотне снаге нумерички (EnergyPlus) анализираних СП (РСП, РСП са рЈОП и РСП са аЈОП) током четворомесечног периода (од 15. јуна до 15. октобра), приказане су на (Сл. 7.23).

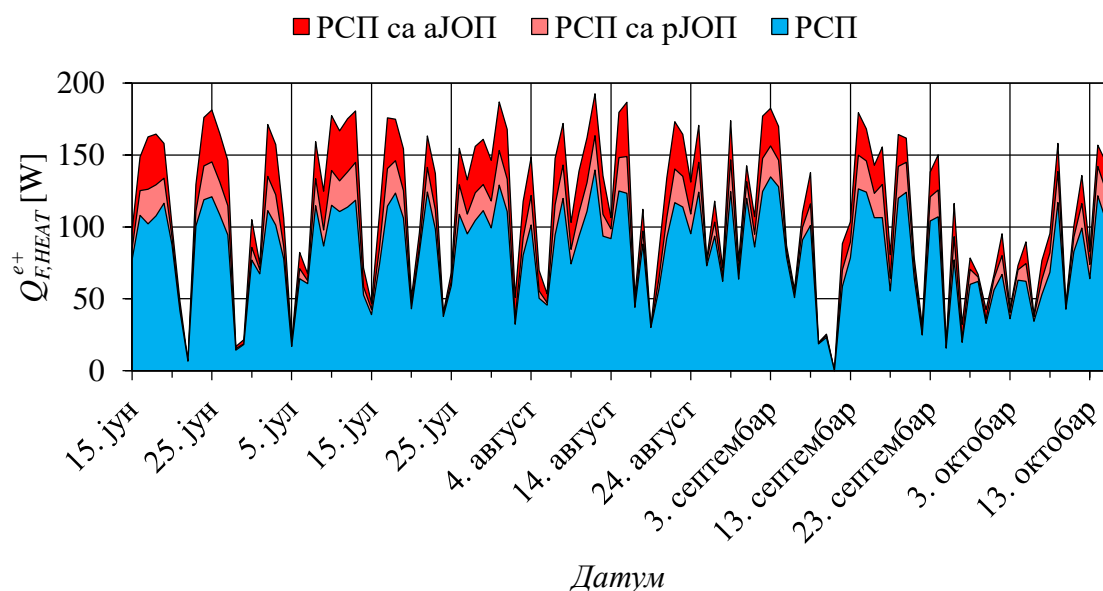
Нумеричке термичке анализе извршене су за следеће полазне параметре: $\dot{m}_{F,w}=0,006$ kg/s [5] и $t_{F,w(in)}=30^{\circ}C$.

^{VII-34)} Поглавље 11.1.2.

Просечне сезонске вредности нумеричких топлотних снага за РСП, РСП са рЈОП и РСП са аЈОП, редом су (Сл. 7.23): 83,13 W, 95,95 W и 114,1 W. Просечна сезонска нумеричка топлотна снага РСП са рЈОП за 15,43% већа је од РСП. Просечна сезонска нумеричка топлотна снага РСП са аЈОП већа је од РСП са рЈОП за 18,92%, односно за 37,26% од РСП [111].

Највећа просечна дневна нумеричка топлотна снага за РСП током поменутог четворомесечног периода била је 139,58 W (12. август, Сл. 7.23). Током овог дана, топлотна снага РСП са рЈОП била је 163,47 W, док је топлотна снага РСП са аЈОП износила 192,61 W.

Са друге стране, најниже^{VII-35)} вредности просечних дневних нумеричких топлотних снага забележене су током 22. јуна ($I_{F,TOT}^{e+}=89,59 \text{ W/m}^2$): 6,63 W (РСП), 6,66 W (РСП са рЈОП) и 6,7 W (РСП са аЈОП). У случају неповољних временских прилика ($I_{F,TOT}^{e+}<70 \text{ W/m}^2$, $t_{air}=14^\circ\text{C}$, 11. септембар, Сл. 7.23), за задате радне параметре, анализирани СП се не могу користити [111].



Слика 7.23 – Просечне дневне нумеричке (*EnergyPlus*) топлотне снаге анализираних СП током четворомесечног периода од 15. јуна до 15. октобра [111]

Пошто РСП спада у групу фиксних СП, соларни упадни угао узима различите вредности током дана, па је и принос соларне енергије током дана варијабилан.

За разлику од РСП, површина РСП са аЈОП нормална је на правац Сунчевих зрака у попречној равни током дана (у било ком временском тренутку), па је принос соларне енергије ове соларне конструкције доста већи него у случају класичног (фиксног) РСП.

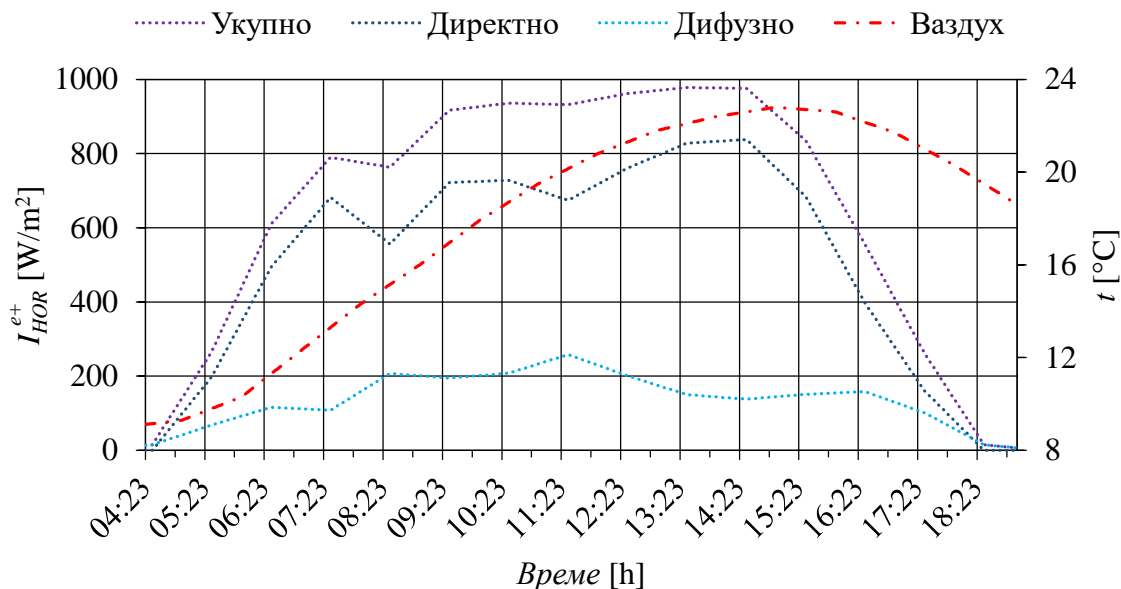
Соларни потенцијал РСП са рЈОП мањи је у поређењу са РСП са аЈОП, због ефекта соларног сенчења. Овај ефекат настаје као последица примене специфичног механизма за праћење кретања положаја Сунца, који подразумева да апсорберске плоче међусобно мењају положај једна у односу на другу [111].

Још једна појава се може уочити са (Сл. 7.23), а то је да сви анализирани СП дају приближно исте топлотне снаге, када је удео компоненте $I_{F,DIFF}^{e+}$ у $I_{F,TOT}^{e+}$ доста већи од

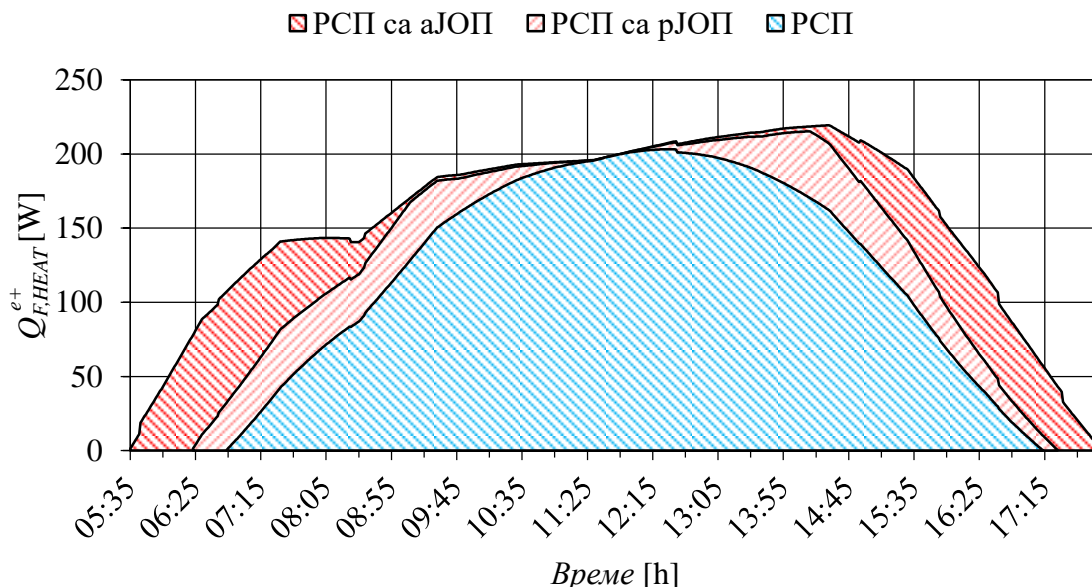
^{VII-35)} Поглавље 10.1.2.3 (Сл. 10.4).

компоненте $I_{F,BEAM}^{e+}$. Разлог томе је смер простирања $I_{F,DIFF}^{e+}$, јер оно из свих праваца, готово у идентичним износима, доспева на све анализирани СП, без обзира на њихову оријентацију у простору [111].

На слици (Сл. 7.24) приказани су нумерички метеоролошки параметри за произвољно одабран дан (26. јул), да би се на (Сл. 7.25) извршило нумеричко поређење топлотних снага анализираних типова СП на дневном нивоу [111].



Слика 7.24 – EnergyPlus метеоролошки параметри за град Крагујевац за 26. јул [111]



Слика 7.25 – Дневне промене нумеричких (EnergyPlus) топлотних снага анализираних СП за 26. јул [111]

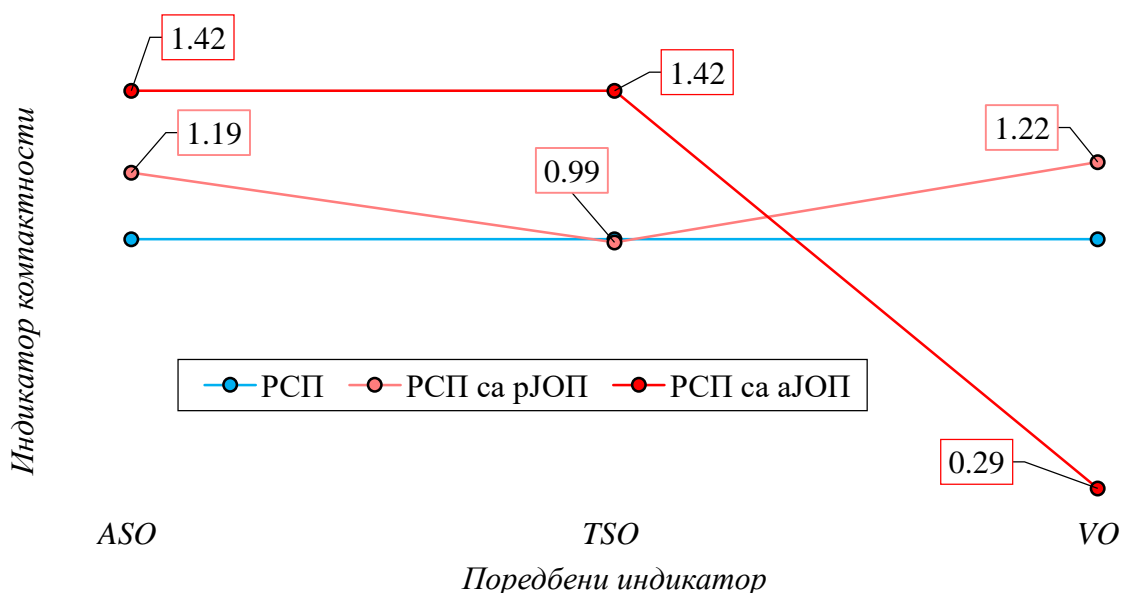
Иако Сунце излази у 04:23 h, а залази у 19:03 h (26. јул, Сл. 7.24), РСП користи Сунчеву енергију само у периоду од 06:49 h до 17:14 h (Сл. 7.25). Разлози за то су следећи: технички захтеви ($\dot{m}_{F,w}=0,006 \text{ kg/s}$ и $t_{F,w(in)}=30^\circ\text{C}$), интензитет соларног зрачења (у јутарњим и вечерњим сатима је доста слабијег интензитета, Сл. 7.24) и соларни

упадни угао. Применом аЈОП механизма на РСП (РСП са аЈОП), соларни упадни угао се „модификује“, прикупљање соларне енергије се повећава (у јутарњим и вечерњим сатима и до неколико пута), а радно време ове соларне конструкције се продужава (Сл. 7.25), и то за 74 минута ујутру (почетак рада у 05:35 h), односно за 44 минута увече (крај рада у 17:58 h). Због ефекта соларног сенчења, РСП са рЈОП може допринети производњи топлотне енергије у периоду од 06:23 h до 17:25 h, што ову соларну конструкцију, по питању термичких перформанси, сврстава између РСП криве и РСП са аЈОП криве (Сл. 7.25) [111].

Са (Сл. 7.25) може се приметити да током кратког временског периода, сва три типа СП имају исте топлотне снаге ($Q_{F,HEAT}^{e+}=198,49$ W). Ова топлотна равнотежа настаје у тренутку када Сунце достигне свој дневни зенитни положај (11:43 h), односно у тренутку када све апсорберске плоче (важи за све анализираних СП) заузму идентичне просторне положаје [111].

Соларно зрачење најинтензивније је у 13:30 h ($I_{HOR,TOT}^{e+}=978$ W/m², Сл. 7.24), али се због примене различитих ЈОП механизма, пуни капацитети СП достижу у различитим временским интервалима (Сл. 7.25): РСП (203,2 W, 12:30 h), РСП са рЈОП (215,3 W, 14:15 h) и РСП са аЈОП (219,4 W, 14:30 h). Наведеним максималним вредностима топлотних снага одговарале су следеће вредности $\Delta t_{F,w}=t_{F,w(out)}-t_{F,w(in)}$: 8,09°C (РСП, 12:30 h), 8,57°C (РСП са рЈОП, 14:15 h) и 8,73°C (РСП са аЈОП, 14:30 h) [111].

Иако су апсолутне бројке (резултати симулација) током анализираних периода на страни РСП са аЈОП (Сл. 7.23), ситуација се мења када се у обзир узму разни просторни поредбени индикатори (Таб. 7.1, Сл. 7.26). Компактност некада може бити од пресудног значаја за одабир типа соларног уређаја, зависно од локације (места) на којој се разматра могућност његовог инсталирања (имплементирања, тј. уградње).



Слика 7.26 – Индикатори компактности нумерички (*EnergyPlus*) анализираних СП током четворомесечног истраживања од 15. јуна до 15. октобра

Индикатор компактности $Q_{F,HEAT}^{e+}/ASO$ [W/m²] (Сл. 7.26) на страни је РСП са аЈОП (1,42× бољи од РСП), док се РСП са рЈОП налази на другом месту (између РСП са аЈОП

и РСП). Индикатор $Q_{F,HEAT}^{e+}/TSO$ [W/m²] (Сл. 7.26) даје незнатну предност РСП (над РСП са рЈОП), док РСП са аЈОП и даље држи прву позицију. За разлику од $Q_{F,HEAT}^{e+}/ASO$ и $Q_{F,HEAT}^{e+}/TSO$ индикатора, индикатор компактности $Q_{F,HEAT}^{e+}/VO$ [W/m³] (Сл. 7.26) показује да конструкцију РСП са рЈОП одликује мала запреминска заузетост, посебно наспрам конструкције РСП са аЈОП, која се у овом случају налази на зачењу листе [111].

Када се све наведено узме у обзир, закључује се да РСП са рЈОП постиже оптималну равнотежу између РСП (са једне стране) и РСП са аЈОП (са друге стране), комбинујући њихове предности: VO (од РСП) и термичке перформансе (од РСП са аЈОП) [111].

7.3 *Ansys Fluent* истраживање РСП и РтАСП

Ansys Fluent је, због низа својих предности над (рецимо) програмом *EnergyPlus*, други софтверски пакет коришћен приликом нумеричког истраживања РтАСП термичких перформанси. Захваљујући његовим могућностима, читаоцима ће бити омогућено да виде карактеристична поља апсорбованог долазног соларног зрачења и температурна поља, и то у ситуацијама када се јављају ефекти соларног сенчења, као последица примене специфичног рЈОП механизма.

7.3.1 *Ansys Fluent* софтвер

7.3.1.1 Рачунарска динамика флуида

Рачунарска динамика флуида^{VII-36)} је област механике флуида. Бави се нумеричким симулирањем (предвиђањем) понашања течности и гасова у реалним условима, притом строго уважавајући три основна Принципа конзервативности^{VII-37)} [211]:

- Закон одржања масе^{VII-38)} (Јед. 7.15);
- Закон одржања количине кретања^{VII-39)} (Јед. 7.16);
- Закон одржања унутрашње енергије^{VII-40)} (Јед. 7.17).

$$\frac{D}{Dt^t}(\rho dV) = 0 \quad (7.15)$$

$$\frac{D}{Dt^t}(\rho v dV) = \mathbf{f}^V dV + \mathbf{f}^A dA \quad (7.16)$$

$$\frac{DW_E}{Dt^t} + \frac{DQ_E}{Dt^t} = \frac{DU_E}{Dt^t} + \frac{DK_E}{Dt^t} \quad (7.17)$$

где су: t^t [s] време, ρ [kg/m³] густина, V [m³] запремина, v [m/s] брзина, \mathbf{f}^V [N/m³] специфична запреминска сила, \mathbf{f}^A [N/m²] специфична површинска сила, A [m²] површина, W_E [J] рад спољашњих сила, Q_E [J] топлотна енергија, U_E [J] унутрашња енергија и K_E [J] кинетичка енергија.

CFD анализа је, од тренутка настанка^{VII-41)}, веома брзо нашла примену у науци и привреди [211]: аеродинамици, хидродинамици, аутоиндустрији, хемијској индустрији, термодинамици, термотехници, постројењима за грејање, хлађење, вентилацију и климатизацију, хидрологији, метеорологији, биоинжењерингу, турбомашинама, итд.

^{VII-36)} Енгл. *Computational Fluid Dynamics (CFD)*.

^{VII-37)} Принципи конзервативности или закони одржања.

^{VII-38)} Током физичког процеса маса се не мења [211].

^{VII-39)} Промена количине кретања (убрзања) резултат је деловања спољашњих сила. Спољашње силе могу бити запреминске и површинске [211].

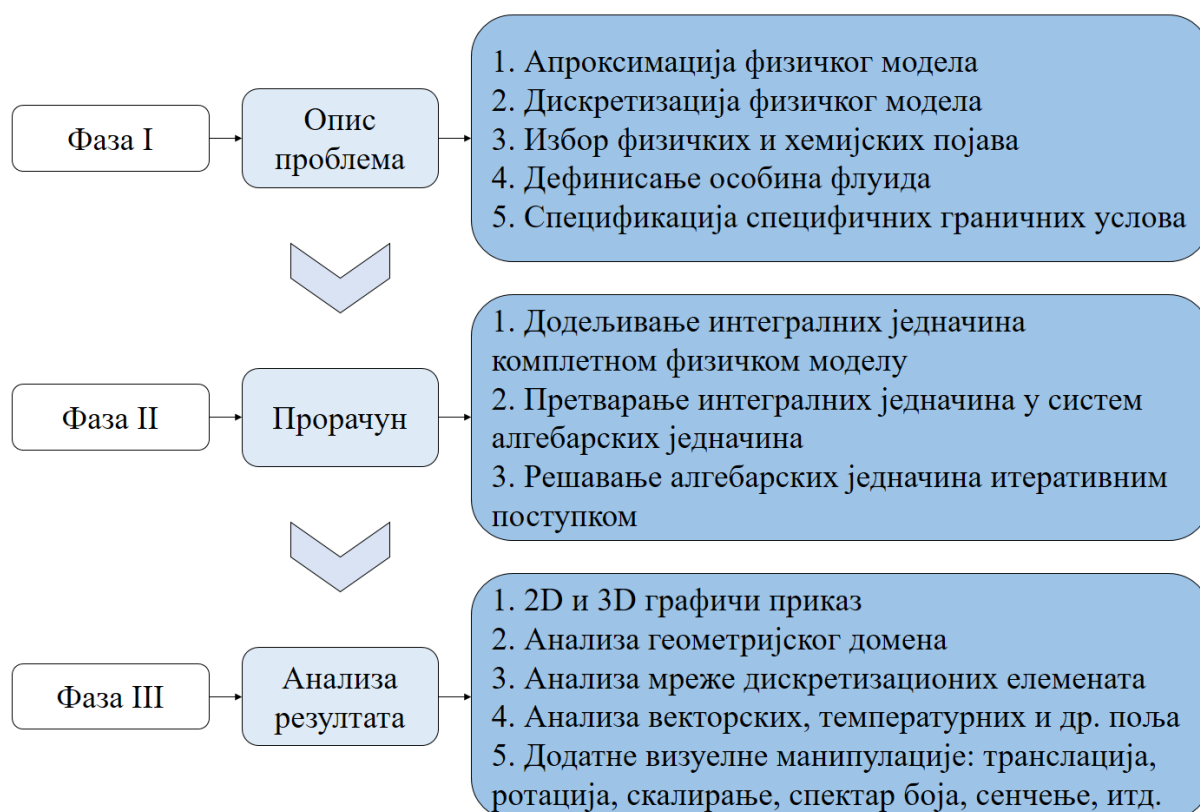
^{VII-40)} Промена унутрашње енергије резултат је трансфера топлоте [211].

^{VII-41)} *CFD* је настао током шездесетих година XX века [211].

7.3.1.2 Нумерички алгоритам

Сви *CFD* комерцијални нумерички пакети^{VII-42)} поседују кориснички интерфејс који функционише кроз трофазни нумерички алгоритам (Сл. 7.27) [211]:

- Фаза I – Опис проблема;
- Фаза II – Прорачун;
- Фаза III – Анализа резултата.



Слика 7.27 – Фазе нумеричког алгоритма [211]

У другој (прорачунској) фази *CFD* нумеричких анализа, посебно место заузима *Ansys Fluent*^{VII-43)} прорачунски код, који приликом формирања и решавања система алгебарских једначина користи методу коначних запремина.

7.3.2 *Ansys Fluent* нумеричка поставка

7.3.2.1 *Ansys Fluent* сценарио симулација

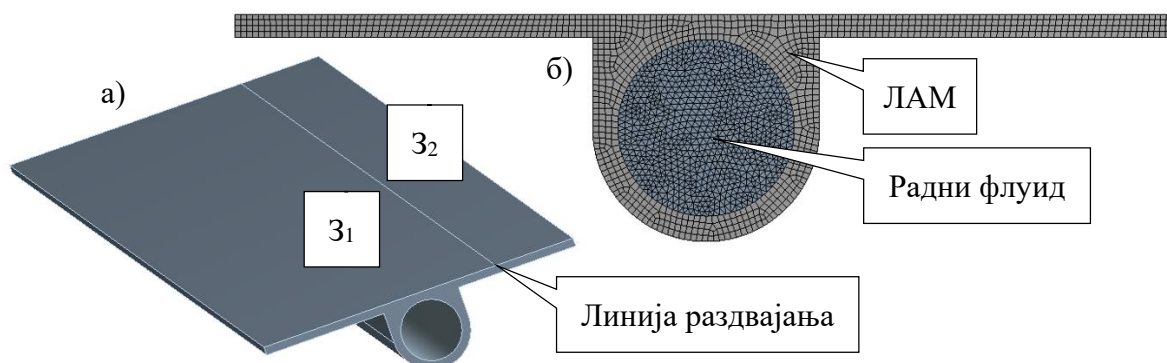
Ansys Fluent софтвер, за разлику од *EnergyPlus* софтвера, поседује веома широку лепезу геометријских и прорачунских манипулација, што га чини доста прикладнијим нумеричким алатом када су у питању РСП и РТАСП термичке анализе.

Почетне *Ansys Fluent* нумеричке термичке анализе (у стационарним условима), на примеру једне равне апсорберске плоче, тј. ламеле (Сл. 7.28), подразумевале су

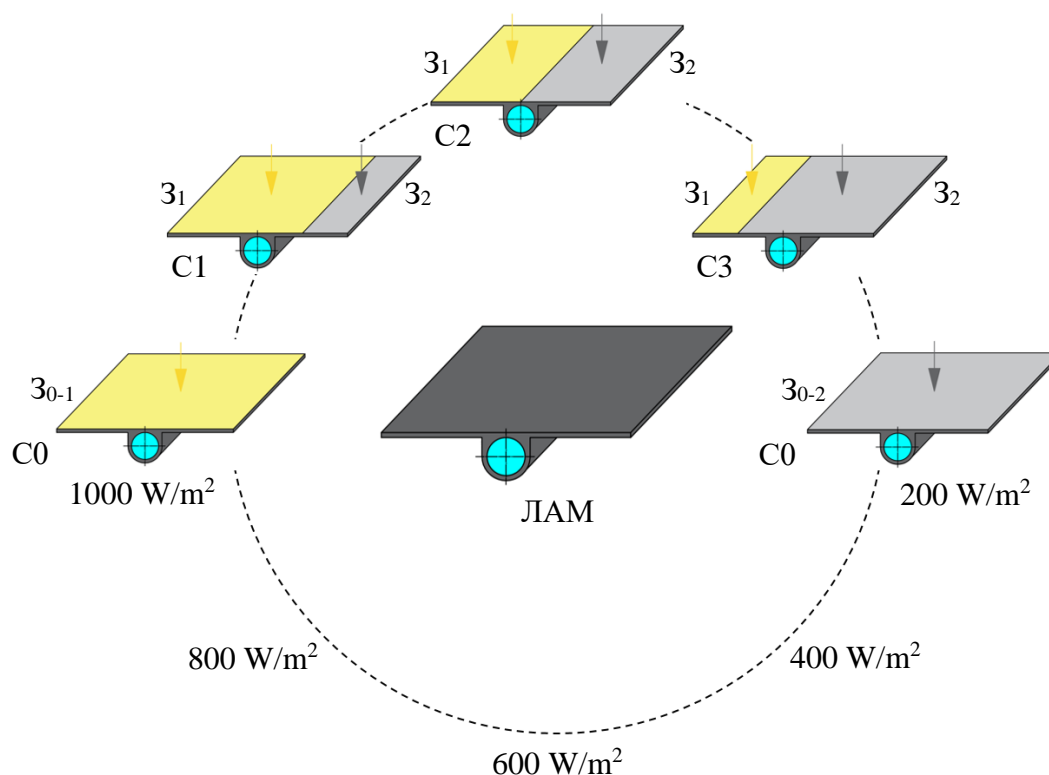
^{VII-42)} Међу којима је и *Ansys Workbench* [212].

^{VII-43)} Поред *Ansys Fluent* кода, примену су нашли и следећи: *Ansys CFX*, *PHOENICS* и *STAR-CD* [211].

дозирање интензитета долазног топлотног флукса $q_{LAM(1,up),HOR}^{AF}$ [W/m^2] са њене горње стране (Сл. 7.29, Таб. 7.2).



Слика 7.28 – Ansys Fluent нумерички модел ламеле
а) Апроксимација физичког модела; б) Дискретизација физичког модела



Слика 7.29 – Ansys Fluent сценарио нумеричког истраживања ламеле

Дозирање долазног специфичног топлотног флукса било је могуће јер је горња површина ламеле правом линијом била подељена на две зоне^{VII-44} (Сл. 7.28а, Сл. 7.29):

- Зона 1 (Z_1) – Принос топлотног флукса јачег интензитета;
- Зона 2 (Z_2) – Принос топлотног флукса слабијег интензитета.

Дискретизација физичког модела (геометријског домена, Сл. 7.28б) извршена је задавањем глобалних и локалних параметара мреже [211]. Глобални параметри мреже

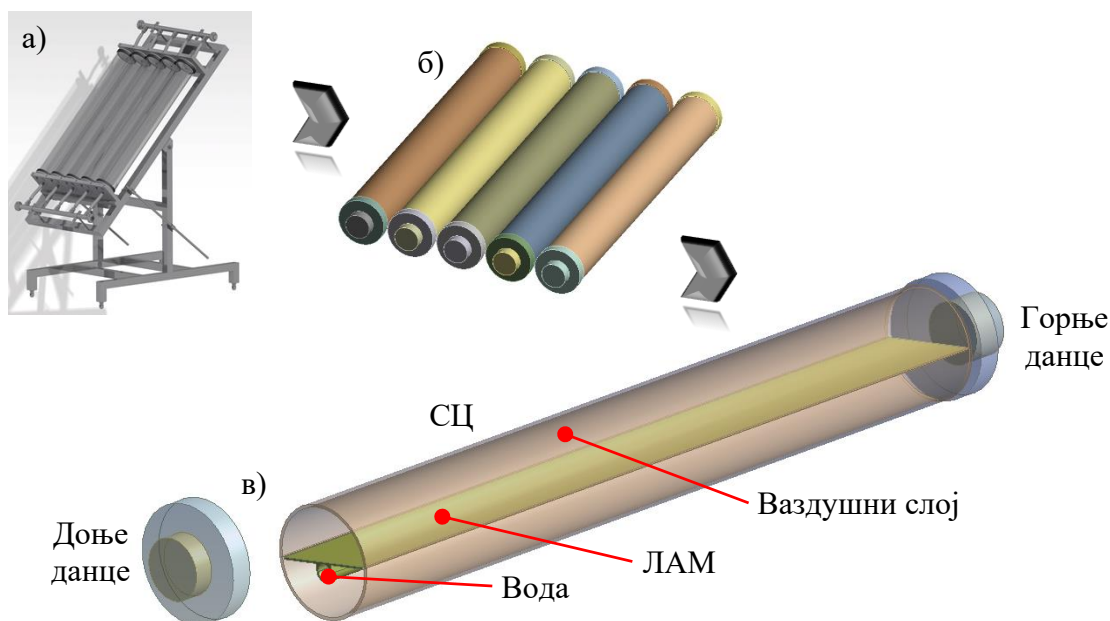
^{VII-44} Предиспитивање услова соларног сенчења.

дефинисани су *Physics Preference (CFD)* и *Solver Preference (Fluent)* алатима^{VII-45}. Од локалних параметара мреже, коришћени су хексаедарски^{VII-46} елементи (за ламелу) и тетраедарски^{VII-47} елементи (за воду) [211].

Табела 7.2 – Почетни *Ansys Fluent* гранични услови нумеричког истраживања ламеле

Сценарио		C0	C1		C2		C3	
Параметар	Јединица	Z ₀	Z ₁	Z ₂	Z ₁	Z ₂	Z ₁	Z ₂
$L_{LAM(1)}^{AF}$	[mm]	100	75	25	50	50	25	75
$q_{LAM(1,up),HOR}^{AF}$	[W/m ²]	200-1000, корак 200		1000 (за Z ₁) 200-1000, корак 200 (за Z ₂)				
$ASO_{LAM(1,up)}^{AF}$	[m ²]	0,08						
$h_{LAM-air(con)}^{AF}$	[W/m ² K]	2,8						
e_{LAM}^{AF}	[-]	0,9						
t_{air}^{AF}	[°C]	25						
$\dot{m}_{LAM,w}^{AF}$	[kg/s]	0,0012 [5, 111, 138, 149]						
$t_{LAM,w(in)}^{AF}$	[°C]	30						

Након почетних симулација, централно место *Ansys Fluent* нумеричких истраживања посвећено је истраживању РТАСП (Сл. 7.30).

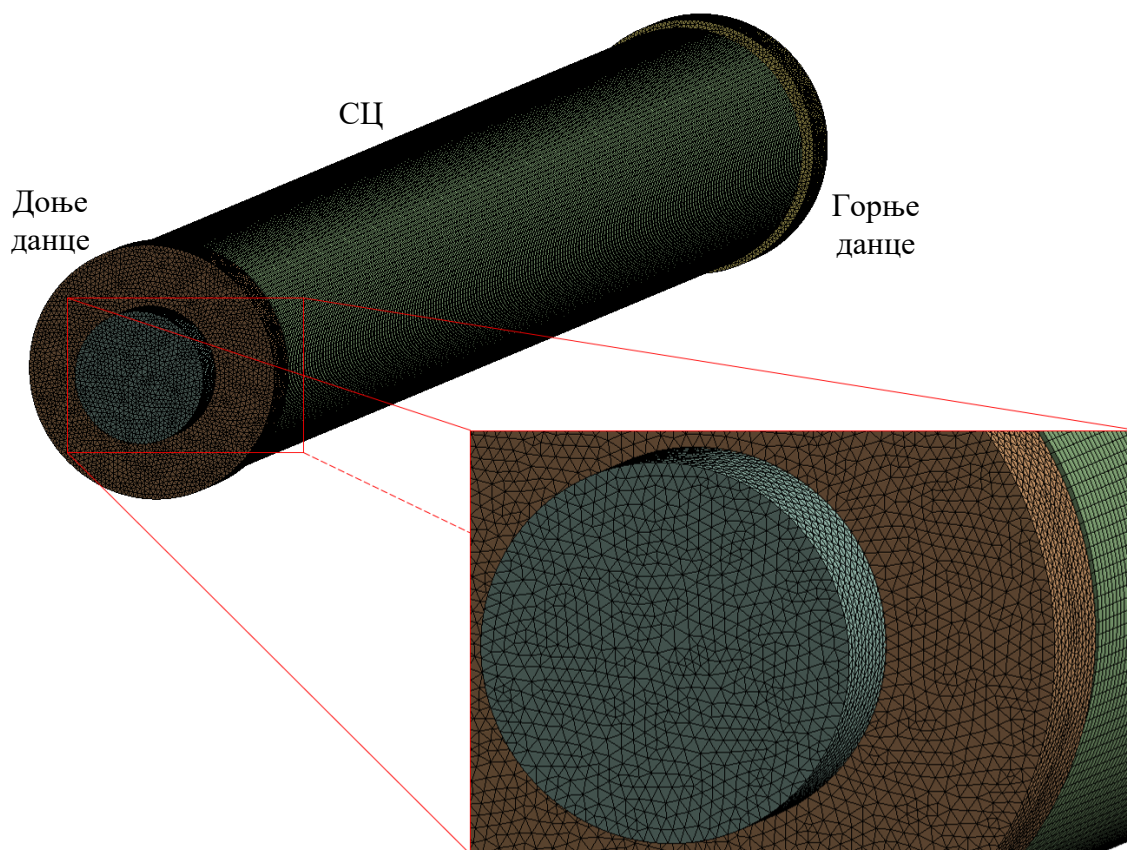


Слика 7.30 – Поступак апроксимације *Ansys Fluent* физичког модела РТАСП
а) Конструкција пре апроксимације; б) Конструкција након апроксимације; в) Детаљ конструкције након апроксимације

VII-45) Картица *Default* у оквиру платформе *Details of Mesh*.

VII-46) ЕНГЛ. *hexahedral mesh*.

VII-47) ЕНГЛ. *tetrahedral mesh*.



Слика 7.31 – Детаљ дискретизације *Ansys Fluent* физичког модела РтАСП

Термичке особине материјала^{VII-48)} од којих су израђене главне позиције РтАСП (Сл. 7.30, Сл. 7.31) описане су у (Таб. 7.3).

Табела 7.3 – Термичке карактеристике материјала коришћених приликом дефинисања *Ansys Fluent* нумеричког модела РтАСП

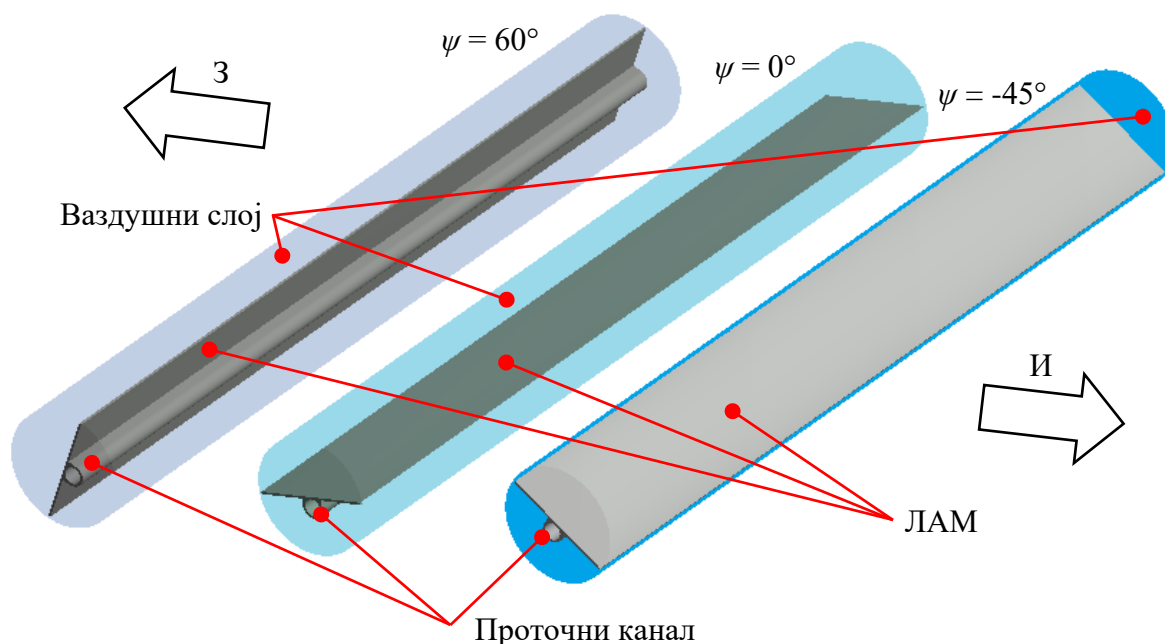
Материјал		ρ	c_p	k	μ	α	τ
Назив	Зона	[kg/m ³]	[J/kgK]	[W/mK]	[Pa·s]	[-]	[-]
Алуминијум	ЛАМ	2719	871	202,4	-	0,88	-
Вода	Радни флуид	998,2	4182	0,6	0,001003	-	-
Ваздух	Ваздушни слој	1,225	1006,43	0,0242	0,000018	-	-
Стакло	СЦ	2230	750	1,14	-	-	0,9
Полиамид	Данца (горње и доње)	1130	1700	0,27	-	0,29	-

У складу са расположивим ресурсима софтвера *Ansys Fluent*, на (Сл. 7.32) графички је приказан *Ansys Fluent* сценарио нумеричког истраживања РтАСП:

- Први случај – ефекти преподневне делимичне соларне осунчаности и осенчености ламела (када је $\psi = -45^\circ$);
- Други случај – ефекти потпуне соларне осунчаности ламела (када је $\psi = 0^\circ$);

^{VII-48)} Одабир материјала из *Ansys Fluent* базе вршен је према реалном, тј. физички реализованом моделу РтАСП (поглавље 5.3, Таб. 5.4).

- Трећи случај – ефекти послеподневне делимичне соларне осунчаности и осенчености ламела (када је $\psi=60^\circ$).



Слика 7.32 – *Ansys Fluent* сценарио нумеричког истраживања РтАСП

Избор физичких и хемијских појава са дефинисаним специфичним граничним условима (Таб. 7.4-7.6), за сва три анализирана случаја (Сл. 7.32), извршен је на основу метеоролошких података и експерименталних вредности главних РтАСП радних параметра, како и налаже *CFD* прорачунски алгоритам (Сл. 7.29).

Табела 7.4 – *Ansys Fluent* гранични услови нумеричког истраживања РтАСП током преподнева (када је $\psi=-45^\circ$)

Датум	2021				
	15. јул	29. јул	16. август	10. септембар	4. октобар
Време [h]	09:35	09:35	09:35	09:35	09:30
I_{HOR}^{AF} [W/m ²]	655	630	631	544	490
t_{air}^{AF} [°C]	29	32,8	31,6	22,7	18,4
W_{air}^{AF} [m/s]	0,9	0	0	4	0,4
$\dot{m}_{T,w}^{AF}$ [kg/s]	0,0062	0,0067	0,0059	0,0072	0,0069
$t_{T,w(in)}^{AF}$ [°C]	25,02	29,92	26,21	17,66	13,42

Табела 7.5 – *Ansys Fluent* гранични услови нумеричког истраживања РтАСП
током соларног поднева (када је $\psi=0^\circ$)

Датум	2021				
	15. јул	29. јул	16. август	10. септембар	4. октобар
Соларно подне [h]	12:40	12:40	12:40	12:35	12:25
I_{HOR}^{AF} [W/m ²]	944	883	867	875	738
t_{air}^{AF} [°C]	32,9	33,9	35,8	26,4	22,7
W_{air}^{AF} [m/s]	1,8	1,8	1,3	0	3,1
$\dot{m}_{T,w}^{AF}$ [kg/s]	0,0062	0,0067	0,0059	0,0072	0,0069
$t_{T,w(in)}^{AF}$ [°C]	27,32	31,39	29,89	21,02	17,01

Табела 7.6 – *Ansys Fluent* гранични услови нумеричког истраживања РтАСП
током послеподнева (када је $\psi=60^\circ$)

Датум	2021				
	15. јул	29. јул	16. август	10. септембар	4. октобар
Време [h]	16:55	16:55	16:50	16:35	16:20
I_{HOR}^{AF} [W/m ²]	473	463	434	359	220
t_{air}^{AF} [°C]	33,4	32,6	35,8	27,1	23,7
W_{air}^{AF} [m/s]	4,9	0	4,9	2,7	0,9
$\dot{m}_{T,w}^{AF}$ [kg/s]	0,0062	0,0067	0,0059	0,0072	0,0069
$t_{T,w(in)}^{AF}$ [°C]	32,06	32,18	34,61	25,4	21,04

7.3.2.2 *Ansys Fluent* модел термичког понашања соларног пријемника

7.3.2.2.1 Метода коначних запремина

Метода коначних запремина^{VII-49)} служи за трансформисање (претходно формираних кроз дискретизацију физичког модела) просторних (запреминских) интегралних једначина у систем алгебарских једначина [211].

Превођење једначина, из једног облика у други, врши се посредством *Gauss*-ове теореме^{VII-50)}, чиме се запремински интеграл са дивергентским члановима „разбијају“ на одговарајуће површинске интеграле. Дивергентски чланови се потом третирају као протоци^{VII-51)} на површинама сваке елементарне запремине (дискретизационог елемента). Пошто је проток на улазу у наредну елементарну запремину идентичан (исти) оном који је напустио претходну елементарну запремину, закључује се да се *FVM* метода заснива на конзервативним законима [211].

^{VII-49)} Енгл. *Finite Volume Method (FVM)*.

^{VII-50)} Укупан електрични флуks кроз било коју затворену површину једнак је количнику диелектричне константе и укупног наелектрисања унутар те површине.

^{VII-51)} Ток или флуks.

Општа формула конзервативних закона дефинише се као (Јед. 7.18) [211]:

$$\frac{D}{Dt'}(\rho\Phi) + \mathbf{div}(\rho\Phi\mathbf{u}) = \mathbf{div}(\Gamma\mathbf{grad}\Phi) + S_\Phi \quad (7.18)$$

где је Φ варијабла (променљива) у општем смислу.

Интегрална једначина примењена на једну елементарну, тј. контролну запремину ΔV је (Јед. 7.19) [211]:

$$\int_{\Delta V} \frac{D}{Dt'}(\rho\Phi)dV + \int_{\Delta V} \mathbf{div}(\rho\Phi\mathbf{u})dV = \int_{\Delta V} \mathbf{div}(\Gamma\mathbf{grad}\Phi)dV + \int_{\Delta V} S_\Phi dV \quad (7.19)$$

Као што је већ речено, применом *Gauss*-ове теореме на сваку контролну запремину формирају се одговарајући површински интегрални (Јед. 7.20) [211]:

$$\frac{D}{Dt'} \left(\int_{\Delta V} \rho\Phi dV \right) + \int_A \mathbf{n} \cdot (\rho\Phi\mathbf{u}) dA = \int_A \mathbf{n} \cdot (\Gamma\mathbf{grad}\Phi) dA + \int_{\Delta V} S_\Phi dV \quad (7.20)$$

где су: $\frac{D}{Dt'} \left(\int_{\Delta V} \rho\Phi dV \right)$ брзина повећања прираштаја варијабле Φ унутар контролне запремине, $\int_A \mathbf{n} \cdot (\rho\Phi\mathbf{u}) dA$ нето брзина смањења прираштаја варијабле Φ унутар контролне запремине услед конвективних губитака преко њених граничних површина, $\int_A \mathbf{n} \cdot (\Gamma\mathbf{grad}\Phi) dA$ нето брзина повећања прираштаја варијабле Φ унутар контролне запремине услед дифузионих процеса преко њених граничних површина и $\int_{\Delta V} S_\Phi dV$ нето брзина стварања прираштаја варијабле Φ унутар контролне запремине услед постојања унутрашњег извора.

Због својих позитивних особина, *FVM* метода велику примену налази у многим софтверским анализама, међу којима је и *CFD*.

7.3.2.2.2 Модел дискретног преноса соларног зрачења

Према моделу дискретног преноса (соларног) зрачења^{VII-52}, соларни сноп који пада на (граничну) површину СП може бити апроксимиран^{VII-53} на један зрак, што се математички може записати на следећи начин (Јед. 7.21) [213]:

$$\frac{DI}{DA} = -aI + \frac{a\sigma T^4}{\pi} \quad (7.21)$$

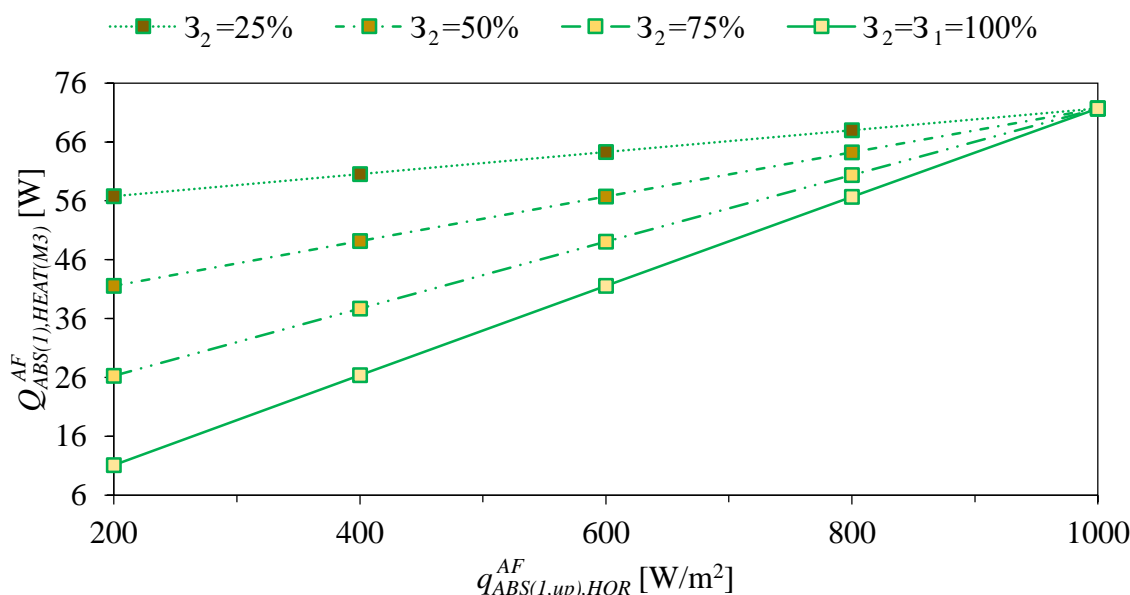
^{VII-52}) ЕНГЛ. *Discrete Transfer Radiation Model (DTRM)*.

^{VII-53}) Ово важи за недеформабилна тела, при чему правци простирања зрачења могу бити [213]: $0-2\pi$ (азимутни правац) и $0-\pi/2$ (за поларни правац).

Главна предност *DTRM* модела зрачења, над другим *Ansys Fluent* моделима^{VII-54}, огледа се у могућности испитивања ефеката сенчења, што је карактеристично за РтАСП соларну конструкцију.

7.3.3 Резултати *Ansys Fluent* истраживања

Промена топлотне снаге једне ламеле у зависности од зонског приноса долазног специфичног топлотног флукса, у нумерички (*Ansys Fluent*) креираним условима, графички је приказана на (Сл. 7.33).



Слика 7.33 – Промена нумеричке (*Ansys Fluent*) топлотне снаге једне ламеле у зависности од зонског приноса долазног специфичног топлотног флукса

Ако би једна четвртина^{VII-55} (уздужно гледано) горње површине ламеле било „у сенци“ (зона Z_2 , Сл. 7.29, Таб. 7.2), нумеричка (*Ansys Fluent*) топлотна снага ламеле зависила би од интензитета специфичног топлотног флукса у зони слабијег приноса (Сл. 7.33): 56,8 W (за $q_{LAM(1,up),HOR}^{AF}=200 W/m^2$), 60,53 W (за $q_{LAM(1,up),HOR}^{AF}=400 W/m^2$), 64,27 W (за $q_{LAM(1,up),HOR}^{AF}=600 W/m^2$) и 68,02 W (за $q_{LAM(1,up),HOR}^{AF}=800 W/m^2$).

Повећањем зоне Z_2 (са 25% на 50%, Сл. 7.33), нумеричка (*Ansys Fluent*) топлотна снага ламеле опада: са 56,8 W на 41,58 W (за $q_{LAM(1,up),HOR}^{AF}=200 W/m^2$), са 60,53 W на 49,15 W (за $q_{LAM(1,up),HOR}^{AF}=400 W/m^2$), са 64,27 W на 56,71 W (за $q_{LAM(1,up),HOR}^{AF}=600 W/m^2$) и са 68,02 W на 64,24 W (за $q_{LAM(1,up),HOR}^{AF}=800 W/m^2$).

Нумеричка топлотна снага ламеле још више опада са додатним повећањем процентуалног удела зоне Z_2 (са 50% на 75%): $Q_{LAM(1),HEAT(M3)}^{AF}=26,27 W$ (за $q_{LAM(1,up),HOR}^{AF}=200$

^{VII-54} Енгл.: *Surface-to-Surface (S2S), Discrete Ordinates (DO), P-1* и *Rosseland*.

^{VII-55} Остатак (75%) ламеле изложен је долазном специфичном топлотном флуксу у износу од 1000 W/m².

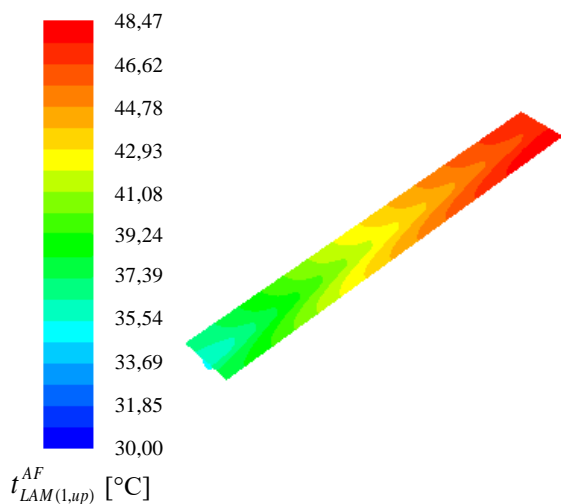
W/m^2), $Q_{LAM(1),HEAT(M3)}^{AF}=37,69$ W (за $q_{LAM(1,up),HOR}^{AF}=400$ W/m^2), $Q_{LAM(1),HEAT(M3)}^{AF}=49,05$ W (за $q_{LAM(1,up),HOR}^{AF}=600$ W/m^2) и $Q_{LAM(1),HEAT(M3)}^{AF}=60,4$ W (за $q_{LAM(1,up),HOR}^{AF}=800$ W/m^2).

Најниже вредности нумеричких (*Ansys Fluent*) топлотних снага ламеле измерене су у случају равномерног^{VII-56} (200-1000 W/m^2 , корак 200 W/m^2) излагања читаве њене горње површине (сценарио Z_0 , $Z_1=Z_2$, Сл. 7.29, Таб. 7.2) долазном специфичном топлотном флуксу: 11,12 W ($q_{LAM(1,up),HOR}^{AF}=200$ W/m^2), 26,4 W ($q_{LAM(1,up),HOR}^{AF}=400$ W/m^2), 41,56 W ($q_{LAM(1,up),HOR}^{AF}=600$ W/m^2) и 56,66 W ($q_{LAM(1,up),HOR}^{AF}=800$ W/m^2).

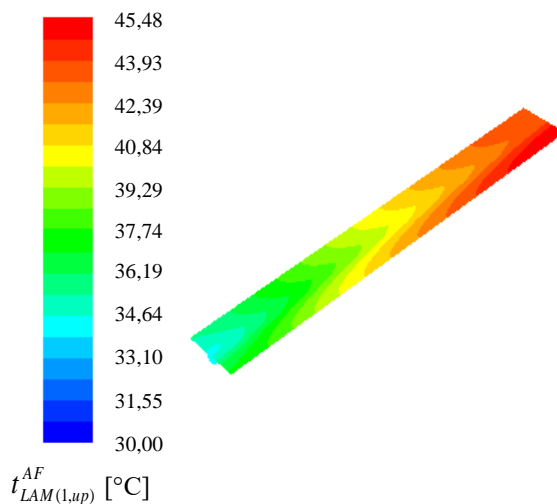
Почетна нумеричка истраживања показала су да се нагиб криве нумеричке (*Ansys Fluent*) топлотне снаге ламеле смањује заједно са смањењем зоне мањег приноса долазног специфичног топлотног флукса. То значи да ламела, у термичком смислу, свој пуни потенцијал може остварити једино када је њена горња површина у потпуности (100%) равномерно изложена максималним вредностима долазног специфичног топлотног флукса. У овом случају, вредност $q_{LAM(1,up),HOR}^{AF}$ лимитирана^{VII-57} је на 1000 W/m^2 , због чега вредност $Q_{LAM(1),HEAT(M3)}^{AF}=71,71$ W представља тачку пресека топлотних перформанси ламеле.

За сваку радну тачку (Сл. 7.33) графички се могу разрадити одговарајућа (*Ansys Fluent*) температурна поља горње површине ламеле.

На наредним сликама (Сл. 7.34-7.37) приказана су карактеристична температурна поља горње површине ламеле када је: $Z_2=25\%$ (Сл. 7.34), $Z_2=50\%$ (Сл. 7.35), $Z_2=75\%$ (Сл. 7.36) и $Z_2=100\%$ (Сл. 7.37). Принос долазног специфичног топлотног флукса исти је у свим случајевима (Сл. 7.34-7.37): $q_{LAM(1,up),HOR}^{AF}=1000$ W/m^2 за зону Z_1 и $q_{LAM(1,up),HOR}^{AF}=400$ W/m^2 за зону Z_2 .



Слика 7.34 – Графички приказ нумерички (*Ansys Fluent*) одређеног температурног поља горње површине ламеле ($Z_2=25\%$)

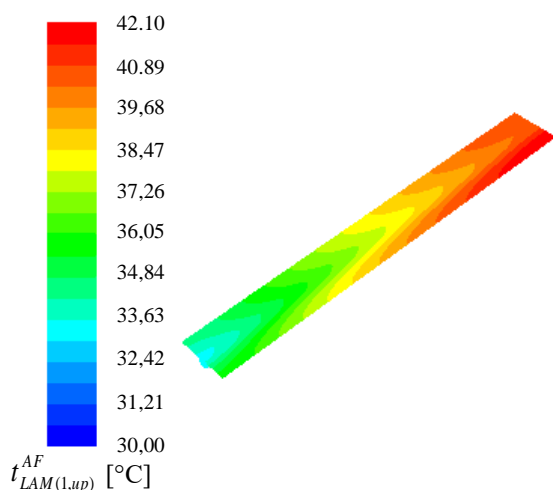


Слика 7.35 – Графички приказ нумерички (*Ansys Fluent*) одређеног температурног поља горње површине ламеле ($Z_2=50\%$)

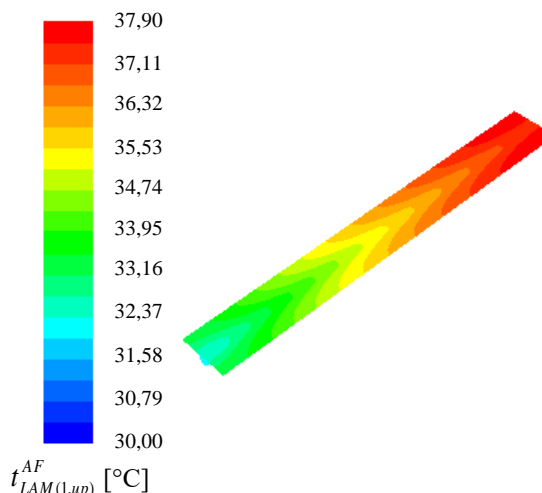
^{VII-56}) Симулитање потпуног сенчења ламеле.

^{VII-57}) Вредност долазног специфичног топлотног флукса лимитирана је у складу са експерименталним истраживањем РСП и РтАСП (поглавље 7.5.2).

На свим сликама (Сл. 7.34-7.37) могу се приметити изотермске површине „стреличастог“ облика које у ствари показују смер протицања радног флуида (воде). Такође се може уочити да су „кракови стрелица“ симетрични^{VII-58} једино на (Сл. 7.37), јер тада на читаву горњу површину ламеле равномерно доспева $q_{LAM(1,up),HOR}^{AF}=400 \text{ W/m}^2$. „Дужи кракови стрелица“ показују зону већег приноса долазног специфичног топлотног флукса, тј. зону где је $q_{LAM(1,up),HOR}^{AF}=1000 \text{ W/m}^2$.



Слика 7.36 – Графички приказ нумерички (Ansys Fluent) одређеног температурног поља горње површине ламеле (Z₂=75%)



Слика 7.37 – Графички приказ нумерички (Ansys Fluent) одређеног температурног поља горње површине ламеле (Z₂=Z₁=100%)

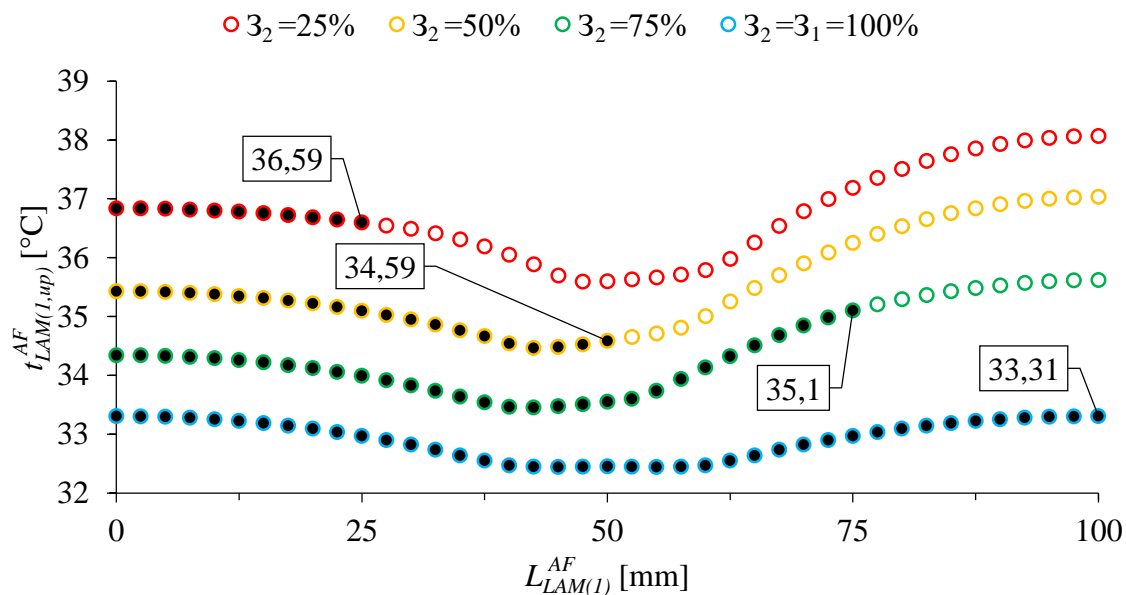
Када је Z₂=25% (Сл. 7.34), тада се на горњој површини ламеле формира изотермска област где је $t_{LAM(1,up),max}^{AF}=48,47^\circ\text{C}$. Када је Z₂=50% (Сл. 7.35), тада је $t_{LAM(1,up),max}^{AF}=45,48^\circ\text{C}$. Карактеристичне изотермске области у преосталим случајевима имају следеће максималне вредности: $t_{LAM(1,up),max}^{AF}=42,1^\circ\text{C}$ (Z₂=75%, Сл. 7.36) и $t_{LAM(1,up),max}^{AF}=37,9^\circ\text{C}$ (Z₂=Z₁=100%, Сл. 7.37). Из овога се јасно види да се изотерме са $t_{LAM(1,up),max}^{AF}$ полако „повлаче“ како се зона Z₂ повећава, што се одражава на средњу (просечну) температуру горње површине ламеле: $t_{LAM(1,up),avg}^{AF}=42,06^\circ\text{C}$ (Сл. 7.34), $t_{LAM(1,up),avg}^{AF}=39,79^\circ\text{C}$ (Сл. 7.35), $t_{LAM(1,up),avg}^{AF}=37,51^\circ\text{C}$ (Сл. 7.36) и $t_{LAM(1,up),avg}^{AF}=35,26^\circ\text{C}$ (Сл. 7.37).

Исти закључци могу бити изведени и на основу посматрања промене температуре горње површине ламеле у попречним равнима постављеним на улазу (Сл. 7.38), средини (Сл. 7.39) и излазу (Сл. 7.40) из проточног канала кружног попречног пресека.

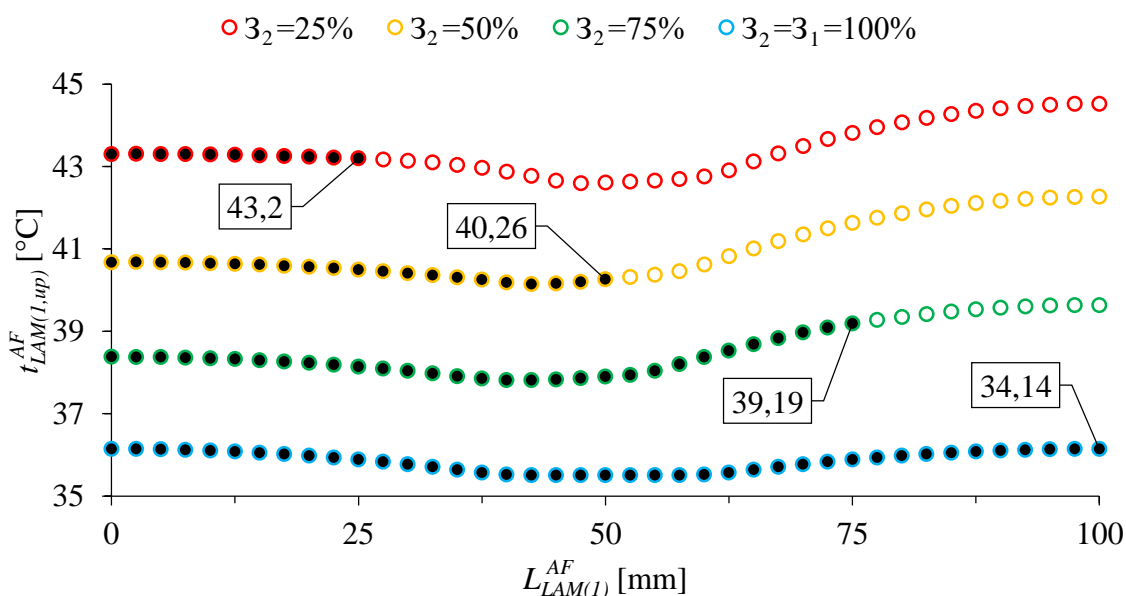
На поменутих дијаграмима (Сл. 7.38-7.40), поред наведеног, може се приметити и то да је промена температурног градијента израженија („бржа“) у зони већег приноса долазног специфичног топлотног флукса, без обзира на положај попречне равни (улаз, средина и излаз) и удела зоне мањег приноса долазног специфичног топлотног флукса (Z₂=25%, Z₂=50%, Z₂=75%).

^{VII-58}) У односу на осу проточног канала кружног попречног пресека испод равне плоче.

Температурне криве $z_2=z_1=100\%$ (Сл. 7.38-7.40), тј. њихова „симетричност“ у односу на осу која се налази у пресеку уздужне^{VII-59)} равни и горње површине ламеле ($L_{LAM(1)}^{AF}=50$ mm), на страни су температурног поља приказаног на (Сл. 7.37).



Слика 7.38 – Промена температуре горње површине ламеле у почетној попречној равни која садржи улазни отвор кружног попречног пресека ($u_{LAM}^{AF}=0$ mm)



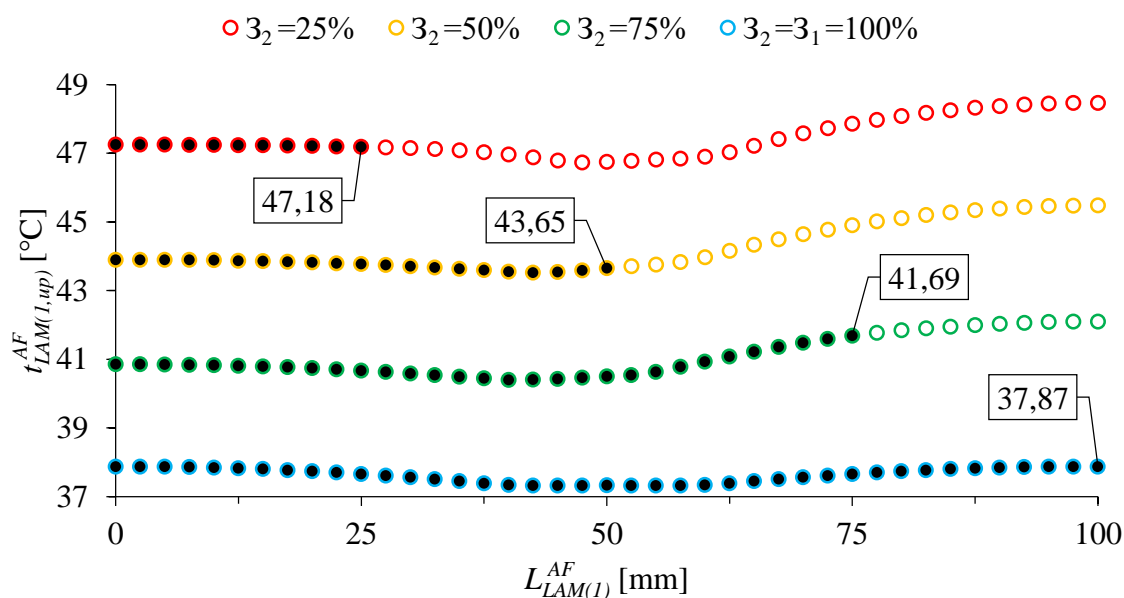
Слика 7.39 – Промена температуре горње површине ламеле у средишњој попречној равни на средини проточног канала кружног попречног пресека ($u_{LAM}^{AF}=400$ mm)

Температура горње површине ламеле у карактеристичним тачкама које се налазе у пресеку (улазних, средишњих и излазних) попречних равни и линије раздвајања (Сл.

^{VII-59)} Уздужна раван садржи осу проточног канала испод равне плоче.

7.28) су ($Z_2=25\%$): $36,59^\circ\text{C}$ (Сл. 7.38), $43,2^\circ\text{C}$ (Сл. 7.39) и $47,18^\circ\text{C}$ (Сл. 7.40). Ако је $Z_2=50\%$, вредности су ниже: $34,59^\circ\text{C}$ (Сл. 7.38), $40,26^\circ\text{C}$ (Сл. 7.39) и $43,65^\circ\text{C}$ (Сл. 7.40).

Најниже температуре постигнуте су у случају последња два симулациона сценарија (Сл. 7.38-7.40): $Z_2=75\%$ ($35,1^\circ\text{C}$, $39,19^\circ\text{C}$ и $41,69^\circ\text{C}$) и $Z_2=100\%$ ($33,31^\circ\text{C}$, $34,14^\circ\text{C}$ и $37,87^\circ\text{C}$). Уздужна промена температурног градијента од улазне до излазне попречне равни највећа је за $Z_2=25\%$ ($10,59^\circ\text{C}$). Са друге стране, када је $Z_2=Z_1=100\%$ ($q_{LAM(l,up),HOR}^{AF}$), ова разлика је најмања ($4,56^\circ\text{C}$).



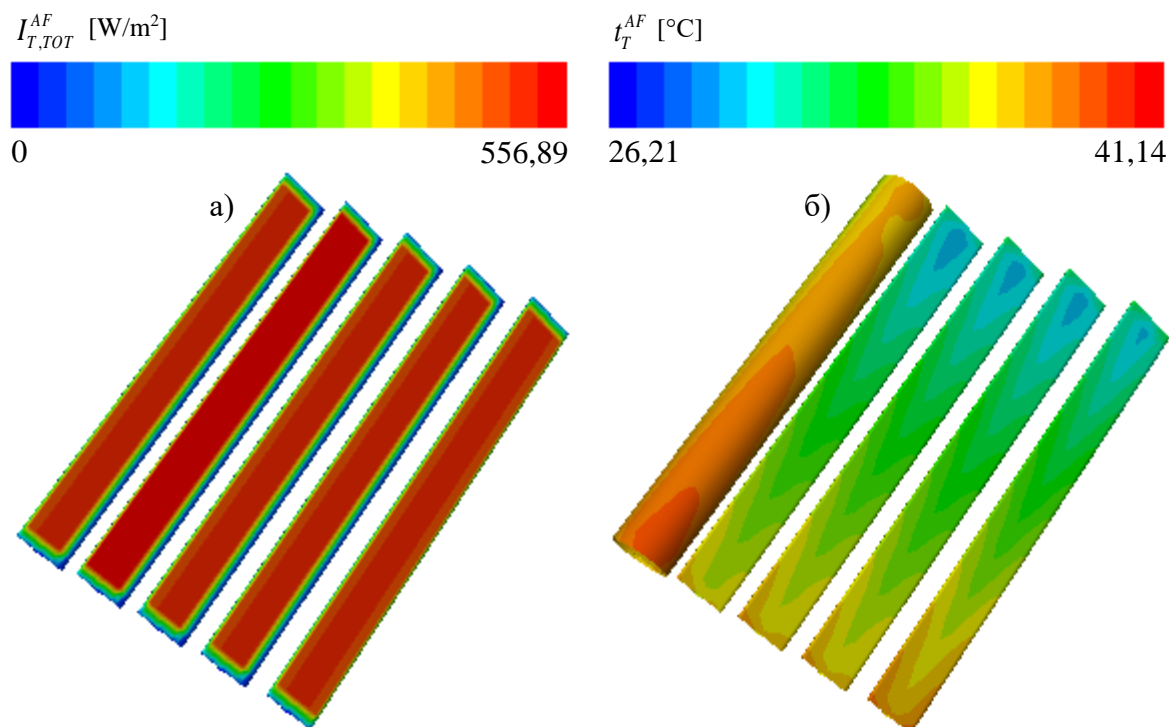
Слика 7.40 – Промена температуре горње површине ламеле у крајњој попречној равни која садржи излазни отвор кружног попречног пресека ($u_{LAM}^{AF}=800$ mm)

Сви дијаграми (Сл. 7.38-7.40) и све температурне криве приказане на њима показују још један занимљиви феномен – температурни дисконтинуитет који настаје у зони интензивне топлотне размене^{VII-60} (последица топлотног трансфера у смеру ка радном флуиду који струји кроз проточни канал).

За разлику од (почетних) нумеричких (*Ansys Fluent*) истраживања спроведених на примеру једне ламеле, слике у наставку (Сл. 7.41-7.43) представљају резултате истраживања комплетне (апроксимиране) конструкције РтАСП (Сл. 7.30).

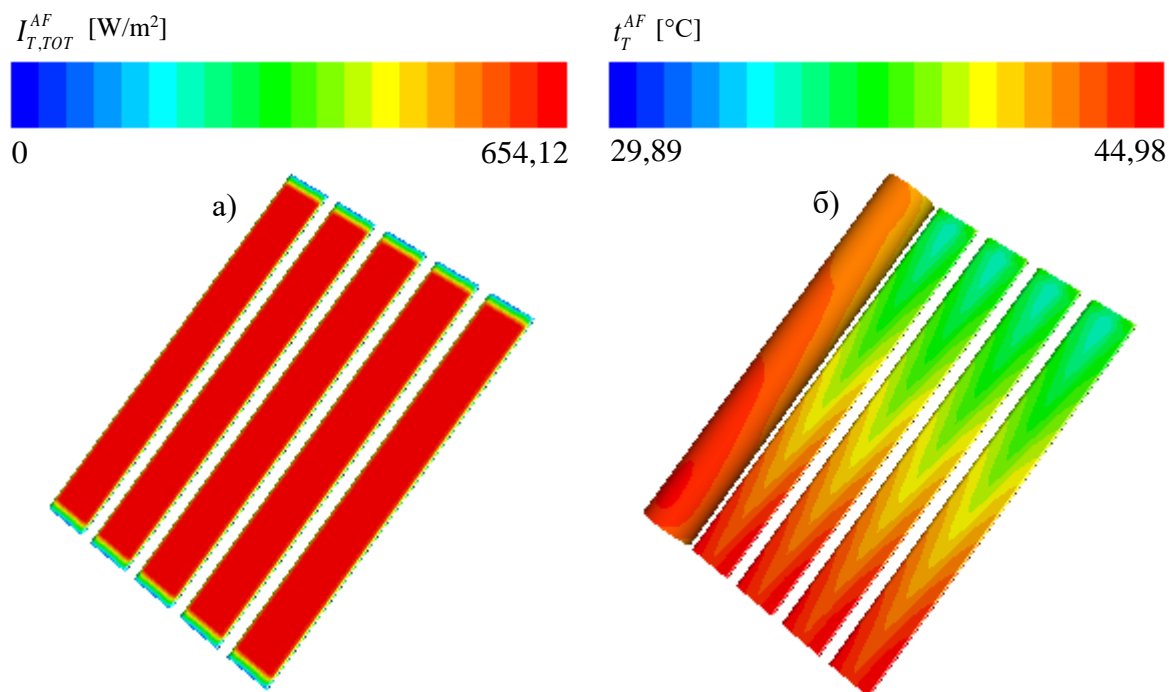
Поље апсорбованог соларног зрачења (Сл. 7.41а) и температурно поље на горњој површини ламеле и стаклене цеви (Сл. 7.41б) показују РтАСП термичке перформансе у преподневним сатима (09:35 h) током 16. августа (Сл. 7.32, Таб. 7.4). На преосталим сликама, разрађена су још два сценарија током истог дана (Сл. 7.32): РтАСП термичке перформансе у тренутку соларног поднева (12:40 h, Таб. 7.5, Сл. 7.42) и у послеподневним сатима (16:50 h, Таб. 7.6, Сл. 7.43).

^{VII-60} Ова зона одговара спољашњем пречнику проточног канала кружног попречног пресека (поглавље 5.1.2, Сл. 5.3, Сл. 5.4).



Слика 7.41 – Резултати нумеричког (*Ansys Fluent*) истраживања РТАСП за 16. август у преподневним сатима (09:35 h)

а) Поље апсорбованог долазног соларног зрачења; б) Температурно поље на гоњој површини ламела и стаклених цеви

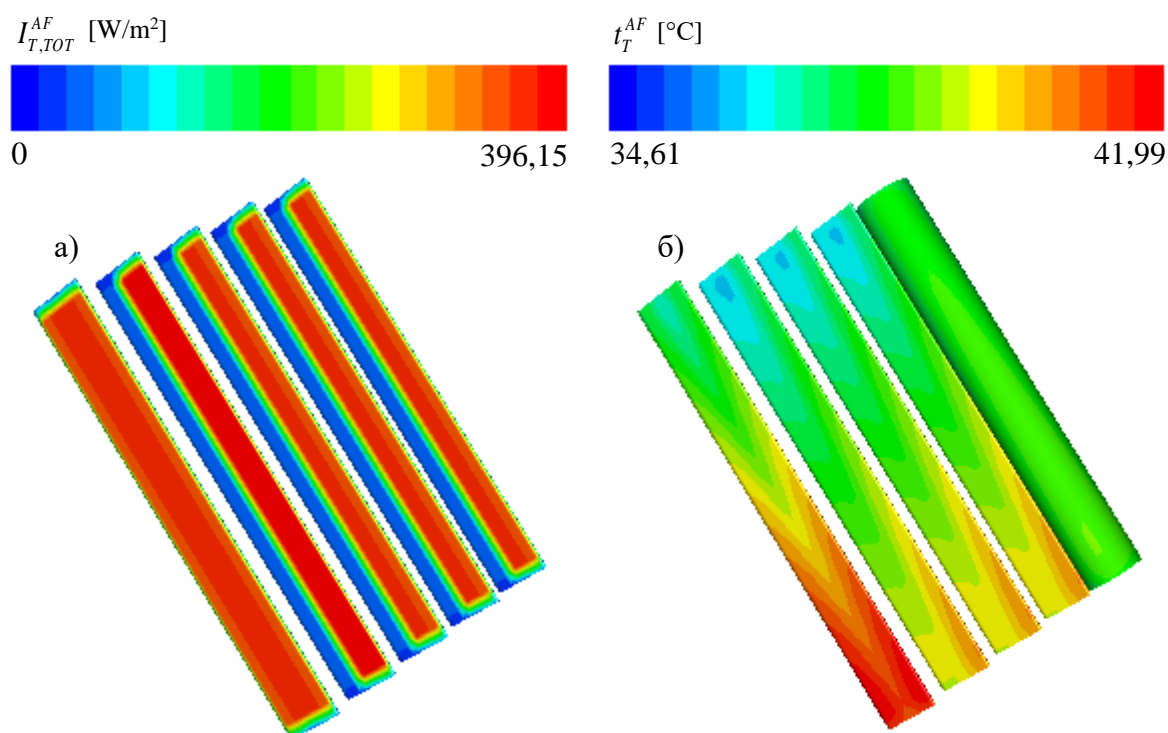


Слика 7.42 – Резултати нумеричког (*Ansys Fluent*) истраживања РТАСП за 16. август у тренутку соларног поднева (12:40 h)

а) Поље апсорбованог долазног соларног зрачења; б) Температурно поље на гоњој површини ламела и стаклене цеви

Сви РТА, у склопу РТАСП, су, током 16. августа у (преподневном) временском тренутку 09:35 h (Таб. 7.4, Сл. 7.41), оријентисани ка истоку, за угао $\psi = -45^\circ$. У том временском тренутку, једино је прва ламела (РТА) са десне стране у потпуности изложена директном соларном зрачењу, док се преостале налазе у њеној сенци (Сл. 7.41a). Коефицијент соларног сенчења, којим се овај ефекат описује, у овом конкретном случају износи 83% (Сл. 7.41a). Температурно поље (Сл. 7.41б) потврђује да прва ламела са десне стране има највећи топлотни прираштај. Температура стаклене цеви са спољашње стране, великим делом, одређена је коефицијентом конвективних топлотних губитака, који зависе од брзине ветра (Таб. 7.4).

У тренутку соларног поднева (16. август, 12:40 h, Таб. 7.5, Сл. 7.42), угао ротирања (закретања) износи $\psi = 0^\circ$, па на све ламеле пристиже иста количина соларне енергије (Сл. 7.42a). Из истих разлога, све ламеле деле и исти температурни спектар (Сл. 7.42б).



Слика 7.43 – Резултати нумеричког (*Ansys Fluent*) истраживања РТАСП за 16. август у
послеподневним сатима (16:50 h)

а) Поље апсорбованог долазног соларног зрачења; б) Температурно поље на гоњој
површини ламела и стаклене цеви

Ефекат соларног сенчења јавља се и током послеподневних сати. На (Сл. 7.43) приказан је овај ефекат у тренутку 16:50 h (Таб. 7.6), када ламеле заузимају просторни положај одређен углом $\psi = 60^\circ$, због чега је сада прва ламела (РТА) са леве стране у стопроцентном износу осунчана (Сл. 7.43a), док су наредне ламеле у делимичној сенци (56%). Сада је температура воде на излазу из прве ламеле са леве стране највиша, што прати и њено температурно поље (Сл. 7.43б).

7.4 SLR истраживање РСП и РтАСП

7.4.1 SLR метода

Једноставна линеарна регресија^{VII-61)} је нумеричка (статистичка) метода заснована на функционалној зависности следећих квантитативних величина (Јед. 7.22) [214]:

- Зависно променљиве y – излазни параметар који представља функцију циља;
- Независно променљиве x – полазни (почетни) параметар за предвиђање понашања функције циља.

$$y = kx + n \quad (7.22)$$

SLR је најједноставнији облик линеарне регресије који је широко примењен у разним научним сферама^{VII-62)} [214].

Функционална зависност између независно и зависно променљивих одређује се за унапред познате вредности регресионих параметара k и n . Ови параметри на самом почетку SLR нумеричког прорачуна нису познати, па се процењују на основу структуре самог узорка [214].

Функцију циља SLR нумеричке методе одликује и могућност графичког приказивања, преко тзв. линеарне регресионе линије [214].

7.4.2 SLR нумеричка поставка

У овом случају нумерички (SLR) модел коришћен је да би се направила функционална зависност између соларног зрачења на хоризонталну површину I_{HOR}^{SLR} (независна променљива) и РСП $q_{F,HEAT(M3)}^{SLR}$ и РтАСП $q_{T,HEAT(M3)}^{SLR}$ специфичних топлотних снага (зависне променљиве).

Вредности I_{HOR}^{SLR} (од 15. јуна 2021. год. до 15. октобра 2021. год.) прикупљала је метеоролошка станица^{VII-63)}, док се до вредности $q_{F,HEAT(M3)}^{SLR}$ и $q_{T,HEAT(M3)}^{SLR}$ долазило експерименталним мерењима уз примену одговарајућих једначина^{VII-64)}. Другим речима, у овом случају, SLR метода коришћена је да би се експериментално измерене вредности интензитета долазног соларног зрачења путем хоризонталног пиранометра повезале са експериментално измереним топлотним снагама РСП и РтАСП.

7.4.3 Резултати SLR истраживања

Функционална зависност између топлотних снага ($q_{F,HEAT(M3)}^{SLR}$, $q_{T,HEAT(M3)}^{SLR}$) и соларног зрачења на хоризонталну површину (I_{HOR}^{SLR}) за 15. јул 2021. год. приказана је на (Сл. 7.44).

^{VII-61)} Енгл. *Simple Linear Regression (SLR)*.

^{VII-62)} Друштвене науке, природне науке, бихевиористичке науке, инжењерске науке, итд.

^{VII-63)} Поглавље 7.5.2.

^{VII-64)} Експериментална МЗ метода: за РСП (поглавље 6.4.1, Јед. 6.119), за РтАСП (поглавље 6.4.2, Јед. 6.131).

На преосталим сликама (Сл. 7.45-7.48) исто је учињено за преостале дане (29. јул, 16. август, 10. септембар, 4. октобар) истраживања РСП и РтАСП топлотних снага.

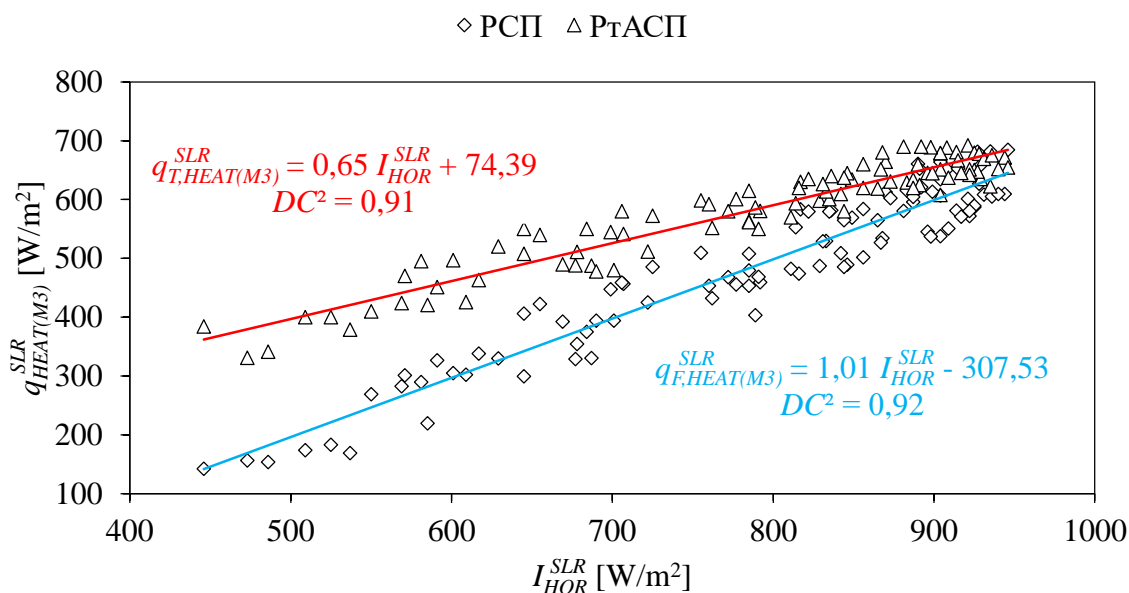
Прво што се на приложеним дијаграмима (Сл. 7.44-7.48) може уочити је слагање $q_{F,HEAT(M3)}^{SLR}$ и $q_{T,HEAT(M3)}^{SLR}$ вредности са вредностима I_{HOR}^{SLR} . О томе сведочи коефицијент детерминације DC^2 који је у свим анализираним случајевима већи од 0,9, како за РСП (0,92-0,96), тако и за РтАСП (0,91-0,95).

Такође се може приметити да је РтАСП функционална права увек изнад РСП функционалне праве (Сл. 7.44-7.48), као и то да РСП права има стрмији нагиб^{VII-65)} према апсиси од РтАСП праве.

За блажи нагиб РтАСП праве заслужан је рЈОП механизам. Као што је већ више пута напоменуто, он обезбеђује управност (у трансверзалној равни) директног долазног Сунчевог зрачења на површину свих РтА (ламела) у било ком временском тренутку током трајања обданице.

Ефекат праћења кретања положаја Сунца највише долази до изражаја ујутру и увече (пре и након соларног поднева). Иако је током јутарњих сати интензитет соларног зрачења слабији, РтАСП (и поред негативног ефекта соларног сенчења) може имати и до неколико пута већу топлотну снагу од конструкције РСП. Другим речима, при слабијим интензитетима соларног зрачења^{VII-66)} разлике између РтАСП и РСП у највеће, и то у корист РтАСП.

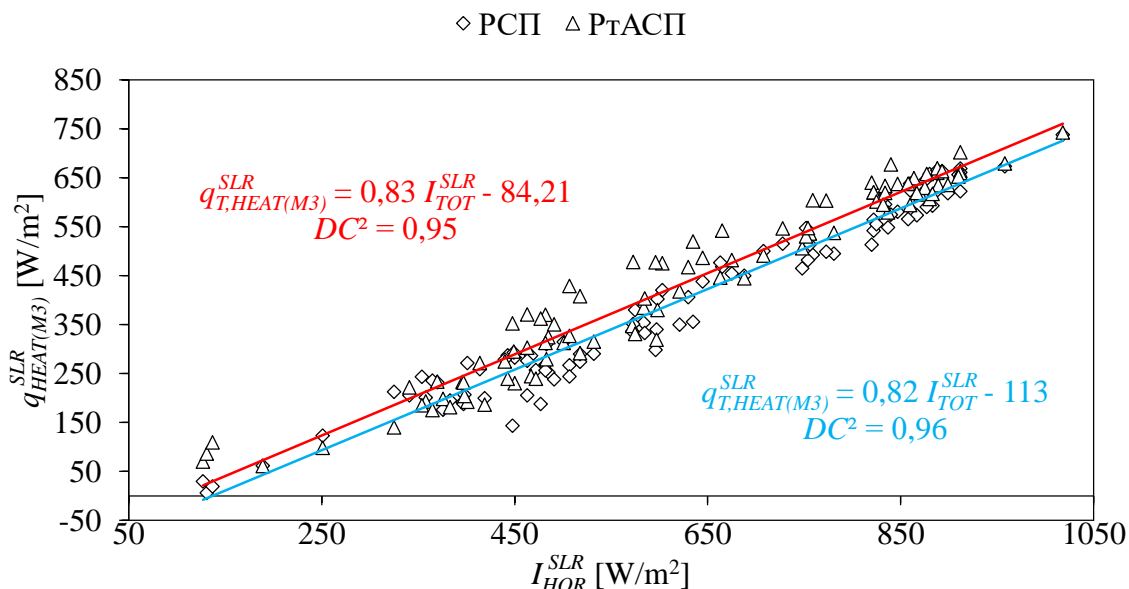
Ове разлике у топлотним снагама постепено се смањују како се приближава соларно подне (период најјачег соларног зрачења), да би у тим тренуцима биле готово „поништене“. Стога се тренутак соларног поднева може третирати и као тачка пресека РтАСП и РСП термичких перформанси. Ови феномени могу се очекивати при следећим пиранометарским вредностима интензитета соларног зрачења: $\geq 950 \text{ W/m}^2$ (Сл. 7.44), $\geq 1000 \text{ W/m}^2$ (Сл. 7.45), $\geq 850 \text{ W/m}^2$ (Сл. 7.46), $\geq 850 \text{ W/m}^2$ (Сл. 7.47) и $\geq 700 \text{ W/m}^2$ (Сл. 7.48).



Слика 7.44 – Функционална зависност између РСП и РтАСП нумеричких (SLR) топлотних снага и соларног зрачења на хоризонталну површину за 15. јул 2021. год.

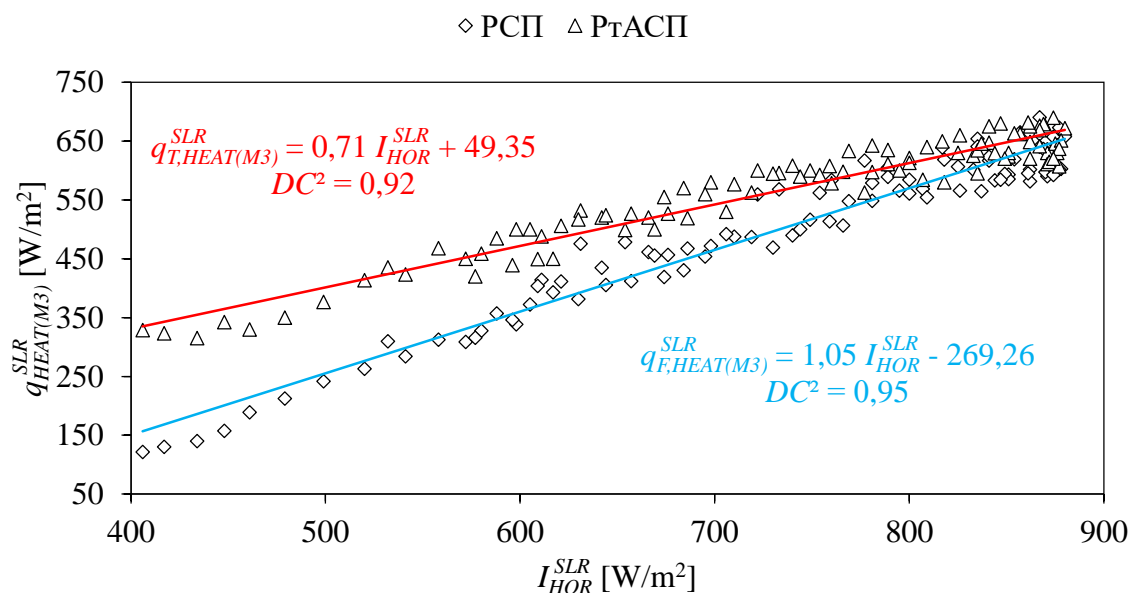
^{VII-65)} Не важи за облачне дане (Сл. 7.45).

^{VII-66)} До 600 W/m^2 (15. Јул, 16. август, 10. септембар), односно до 450 W/m^2 (4. октобар).

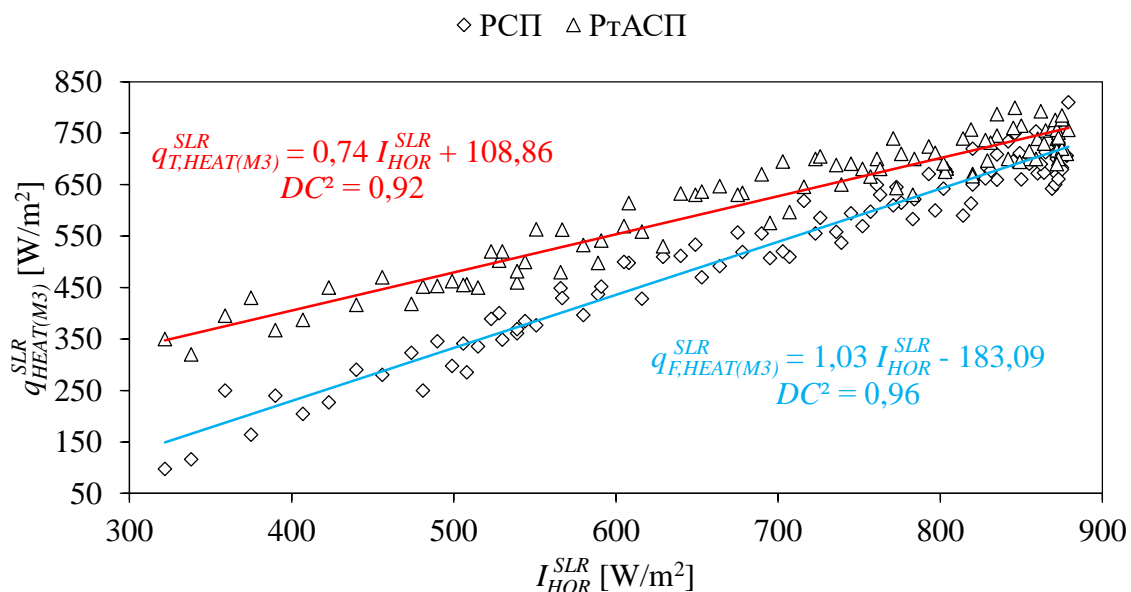


Слика 7.45 – Функционална зависност између РСП и РтАСП нумеричких (SLR) топлотних снага и соларног зрачења на хоризонталну површину за 29. јул 2021. год.

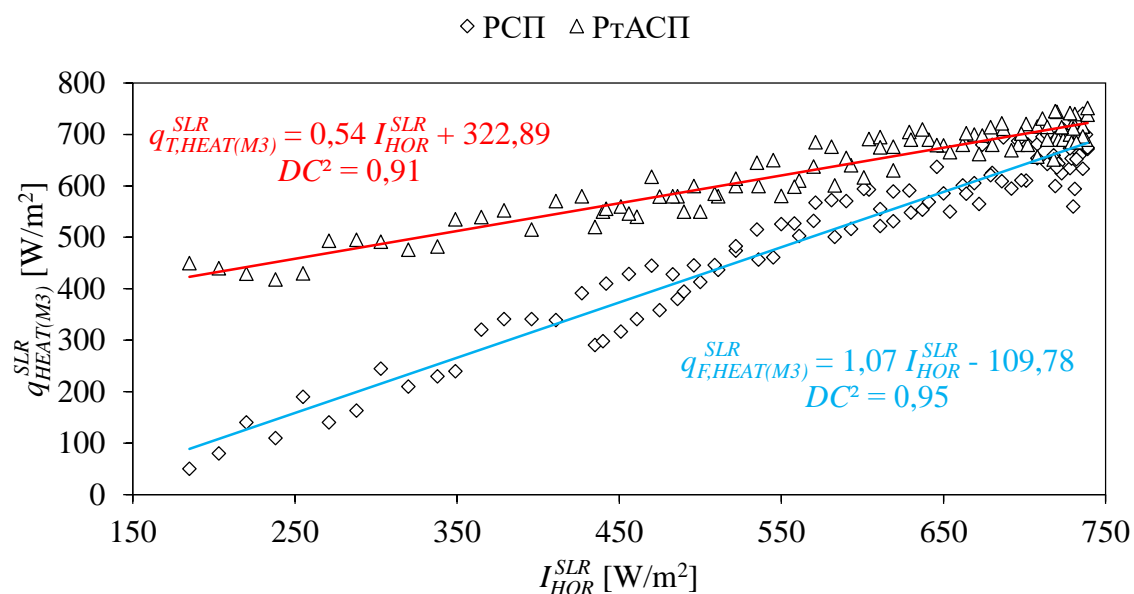
Током облачних дана (Сл. 7.45), интензитет директног долазног соларног зрачења драстично опада. Тада на површине ламела (за РтАСП) и апсорбера (за РСП) доспева искључиво дифузно соларно зрачење из свих праваца у „истим“ износима. Механизам за рЈОП праћење кретања положаја Сунца тада има незнатну предност над фиксним СП. Резултат свега наведеног је „паралелност“ („исти угао нагиба према апсисној оси“) РтАСП функционалне праве и РСП функционалне праве, уз малу међусобну удаљеност.



Слика 7.46 – Функционална зависност између РСП и РтАСП нумеричких (SLR) топлотних снага и соларног зрачења на хоризонталну површину за 16. август 2021. год.



Слика 7.47 – Функционална зависност између РСП и РтАСП нумеричких (SLR) топлотних снага и соларног зрачења на хоризонталну површину за 10. септембар 2021. год.



Слика 7.48 – Функционална зависност између РСП и РтАСП нумеричких (SLR) топлотних снага и соларног зрачења на хоризонталну површину за 4. октобар 2021. год.

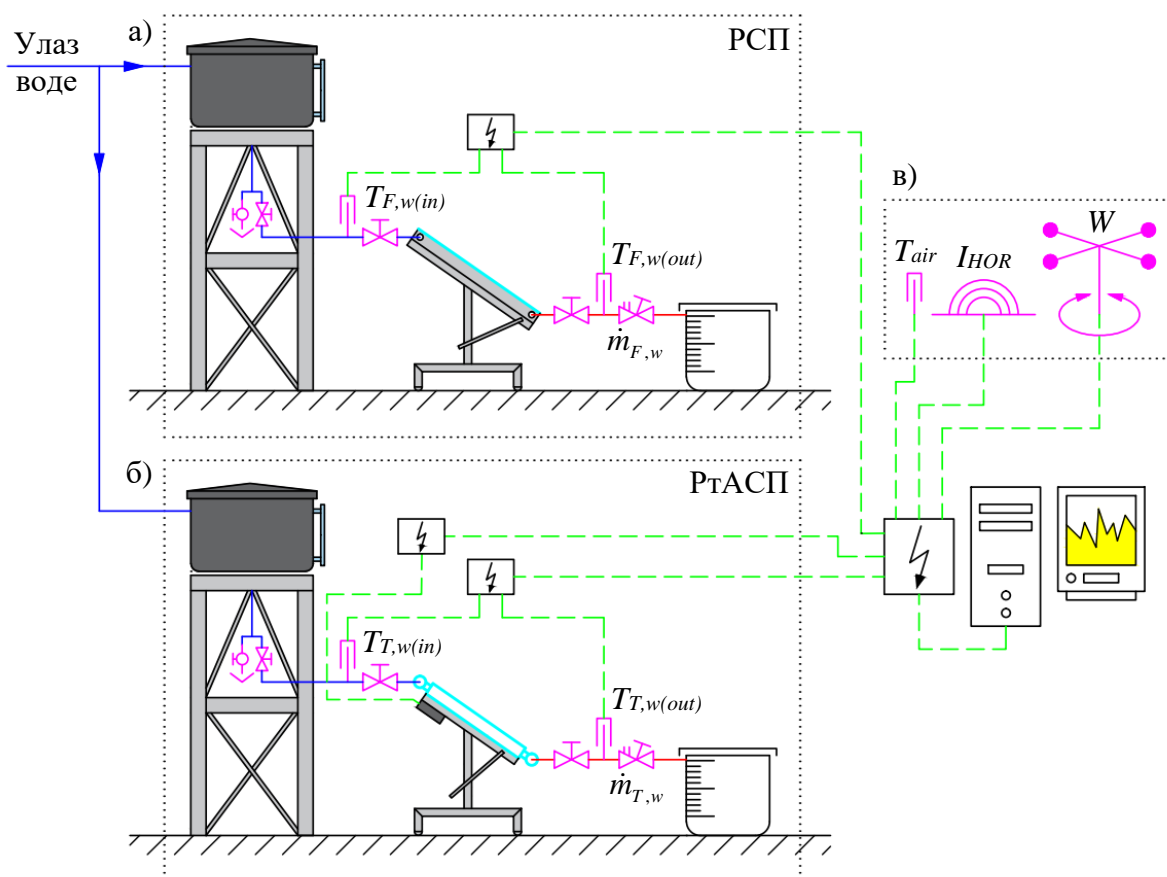
7.5 Експериментално истраживање РСП и РтАСП

7.5.1 Експериментална поставка

7.5.1.1 Мерни ланац

Мерни ланац (Сл. 7.49) формирале су следеће три независне целине (подсистема):

- Експериментална инсталација са РСП^{VII-67};
- Експериментална инсталација са РтАСП^{VII-68};
- Метеоролошка станица.



Слика 7.49 – Мерни ланац са припадајућим подсистемима и мерном опремом
[138, 149]

а) Експериментална инсталација са РСП; б) Експериментална инсталација са
РтАСП; в) Метеоролошка станица

Сваки подсистем поседовао је сопствену пратећу мерну опрему (Таб. 7.7) потребну за термичку анализу РСП и РтАСП.

^{VII-67}) Поглавље 5.2.2.

^{VII-68}) Поглавље 5.3.2.

Функционисање РСП и РтАСП, тј. комплетних експерименталних инсталација, са отвореним циркулационим круговима (без употребе циркулационих пумпи), базирало се на примени хидростатичког притиска^{VII-69}. То значи да је коришћена гравитациона енергија за савладавање свих отпора на релацији горњи резервоар – РСП – доњи резервоар, односно горњи резервоар – РтАСП – доњи резервоар.

Табела 7.7 – Мерни уређаји и њихова прецизност [138, 140, 149, 215]

Параметар	Назив уређаја	Прецизност
Соларно зрачење на хоризонталну површину	Пиранометар (Kipp & Zonen, SMP3)	<5%
	Регистратор података (Kipp & Zonen, METEON)	<0,1%
Температура воде	Температурна сонда Pt-100 (WZP-035, Ø5×50 mm)	±0,2°C

Улога горњег резервоара била је двострука: одржавање хидростатичког притиска у жељеним границама и обезбеђивање довољне количине воде за целодневно одвијање експеримента у случају неподвижених околности на систему водоснабдевања.

7.5.1.2 Услови истраживања

Комплетно четворомесечно експериментално истраживање трајало је од 15. јуна до 15. октобра 2021. године.

Оптимални угао нагиба према хоризонталу ($\beta=34^\circ$), како за РСП, тако и за РтАСП, одређен је према препорукама које је дао *Ђурђевић* [10].

Запремински проток воде ($\dot{m}_{w(spec)}=0,0015 \text{ kg/sm}^2$) кроз поменуте СП, одређен је према препорукама које је дао *Лукић* [5, 138, 149] (**Таб. 7.8**).

Табела 7.8 – Временски гранични услови [141]

Датум	2021				
	15. јул	29. јул	16. август	10. септембар	4. октобар
Излазак Сунца [h]	05:07:38	05:21:29	05:41:34	06:10:01	06:37:46
Соларно подне [h]	12:42:21	12:42:49	12:40:35	12:33:15	12:24:59
Залазак Сунца [h]	20:17:04	20:04:09	19:39:36	18:56:28	18:12:12
$\dot{m}_{T,w}$ [kg/s]	0,0062	0,0067	0,0059	0,0072	0,0069
$\dot{m}_{F,w}$ [kg/s]	0,0064	0,0071	0,0056	0,0061	0,0071

Праћење РСП и РтАСП термичких индикатора вршено је у периоду од 09:00-17:00 h, јер је у том периоду било могуће обезбедити идентичне временске услове^{VII-70}.

Током овог периода, пиранометар је бележио интензитет соларног зрачења на хоризонталну површину са петоминутним кораком. Исти корак мерења важио је и за

^{VII-69}) Хидростатички притисак се користио као погонска сила за одвијање протока кроз РСП и РтАСП.

^{VII-70}) РтАСП је у раним јутарњим сатима био у сенци помоћне просторије.

мерење температура воде на улазима и излазима из СП. За одређивање запреминских протока (**Таб. 7.8**) коришћена је волуметријска метода^{VII-71}).

На крају, вредности специфичних топлотних снага $q_{F,HEAT(M3)}$ [W/m^2] (**Јед. 7.23**) и $q_{T,HEAT(M3)}$ [W/m^2] (**Јед. 7.24**) одређене су (више пута поменутом) методом МЗ:

$$q_{F,HEAT(M3)} = \frac{Q_{F,HEAT(M3)}}{A_{F,ABS(up)}} = \frac{\dot{m}_{F,w} c_{p-w} (T_{F,w(out)} - T_{F,w(in)})}{A_{F,ABS(up)}} \quad (7.23)$$

$$q_{T,HEAT(M3)} = \frac{Q_{T,HEAT(M3)}}{A_{T,LAM(up)}} = \frac{\dot{m}_{T,w} c_{p-w} (T_{T,w(out)} - T_{T,w(in)})}{A_{T,LAM(up)}} \quad (7.24)$$

Механизам рЈОП (случај РтАСП) у потпуности је било аутоматизован у складу са временским подацима изласка и заласка Сунца (**Таб. 7.8**). Хибридни корачни серво мотор са припадајућим планетарним редуктором добијао је од управљача и логичког контролера^{VII-72}) сигнал на сваких 30 секунди. Након добијеног импулса, снага са корачног мотора и редуктора преносила се, прво са излазног вратила на погонски ланчаник, потом (путем ланчаног преноса) на гоњене ланчанике, и на крају на РтА.

Прикупљање и складиштење свих измерених података, пореклом из сва три подсистема у оквиру мерног ланца (**Сл. 7.49**), било је централизовано, тј. на посебном рачунару (**Сл. 7.50**). Централни рачунар био је смештен унутар просторије на крову зграде Факултета, која је током спровођења експеримента имала улогу привремене експерименталне лабораторије.



Слика 7.50 – Привремена експериментална лабораторија [138, 149]

7.5.2 Метеоролошки подаци

Као што је већ поменуто, експериментални део истраживања спроведен је на равном крову Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу. На крову Факултета лоцирана је и метеоролошка станица (**Сл. 7.51**), која је, између осталог, бележила температуру околног ваздуха, као и векторске карактеристике ветра (правац, смер и брзину).

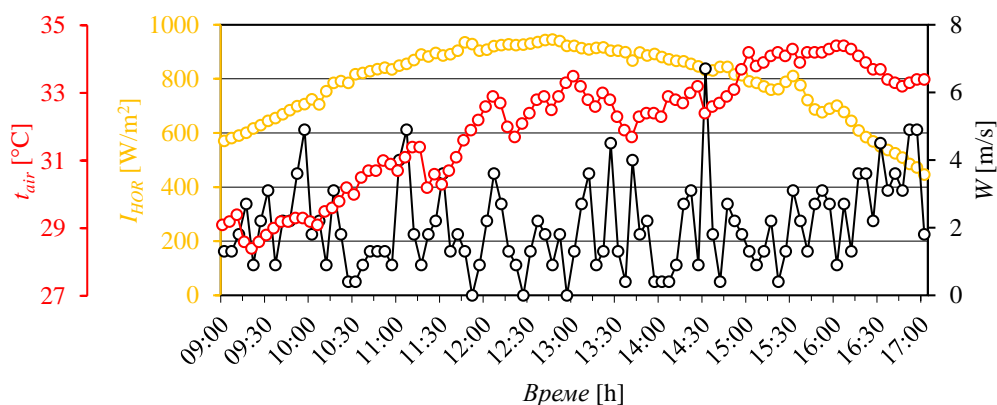
^{VII-71}) Волуметријска метода заснива се на примени штопернице којом се мери време пуњења (у овом случају) доњег резервоара (поглавље 5.2.2, поглавље 5.3.3).

^{VII-72}) Поглавље 5.3.2.



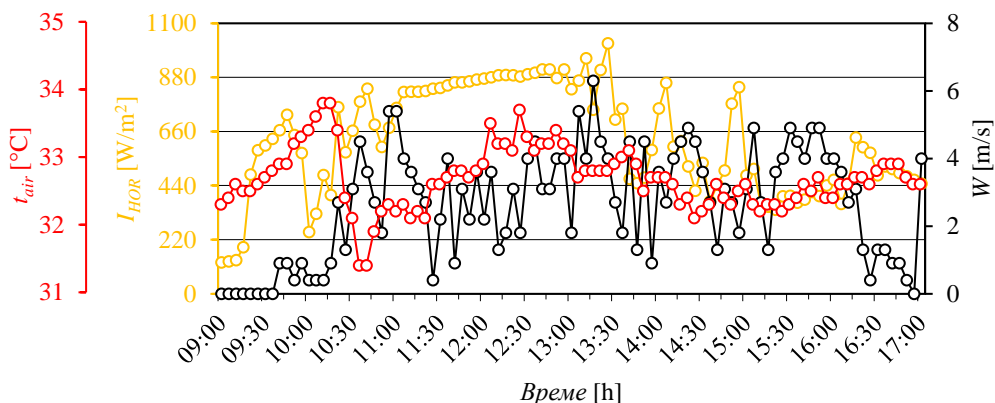
Слика 7.51 – Локације метеоролошке станице и експерименталне инсталације [216, 217]

Дневне флукуације (реалних) временских параметара, за локацију са (Сл. 7.51), приказане су на наредним сликама: 15. јул (Сл. 7.52), 29. јул (Сл. 7.53), 16. август (Сл. 7.54), 10. септембар (Сл. 7.55) и 4. октобар (Сл. 7.56).



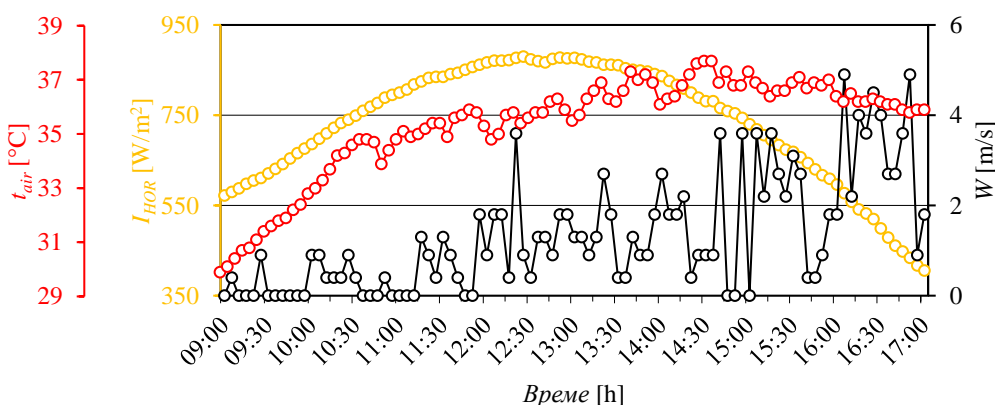
Слика 7.52 – Метеоролошки подаци за 15. јул 2021. год. [138, 149]

Просечни дневни интензитет соларног зрачења (у границама 446-946 W/m²), током 15. јула (Сл. 7.52), био је 787 W/m². Соларна парабола показала је и присуство благе облачности током појединих периода (10:05 h и 14:40-15:55 h). Максимална брзина ветра (7 m/s) достигнута је у 14:30 h, док се просечна вредност кретала око 2 m/s. Најнижа температура околног ваздуха забележена је у 09:00 h (28,4°C), а највиша у 16:00-16:05 h (34,4°C). Просечна вредност температуре околног ваздуха током овог дана износила је око 32°C.



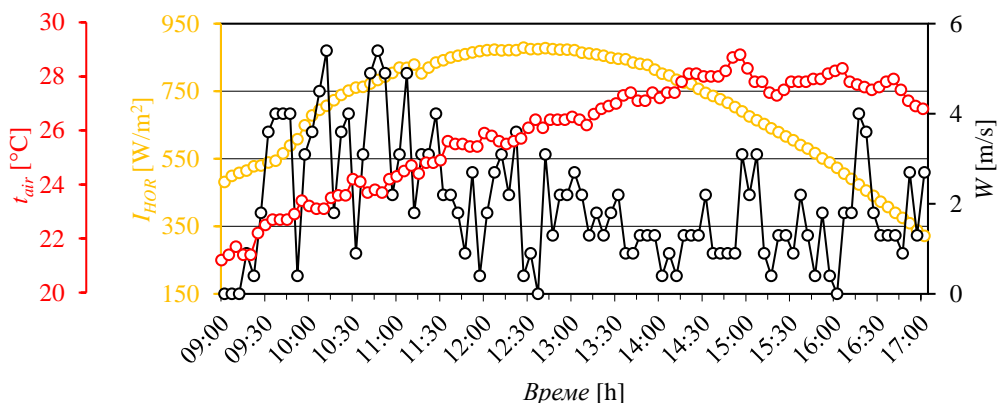
Слика 7.53 – Метеоролошки подаци за 29. јул 2021. год. [138, 149]

Током 29. јула (Сл. 7.53) примећена је „крезубост“ криве соларног зрачења, која доказује целодневно присуство облачности. Отуда је и око 50% соларног узорка било смештено у границама $220\text{--}660\text{ W/m}^2$. Дневни пик (1018 W/m^2) забележен је од стране хоризонталног пиранометра у 13:25 h. Мање присуство облачности примећено је једино између 10:55-13:55 h, када је зрачење имало растући тренд ($>675\text{ W/m}^2$). Соларну криву пратила је крива температуре околног ваздуха, јер је дневни температурни градијент био $2,4^\circ\text{C}$, тј. од $31,4^\circ\text{C}$ (10:35-10:40 h) до $33,8^\circ\text{C}$ (10:10-10:15 h), при чему је просечна дневна вредност била $32,68^\circ\text{C}$. Просечна дневна брзина ваздуха током овог (ветровитог) дана кретала се око $2,6\text{ m/s}$, уз достизање максималне дневне брзине ($6,3\text{ m/s}$) у 13:15 h.



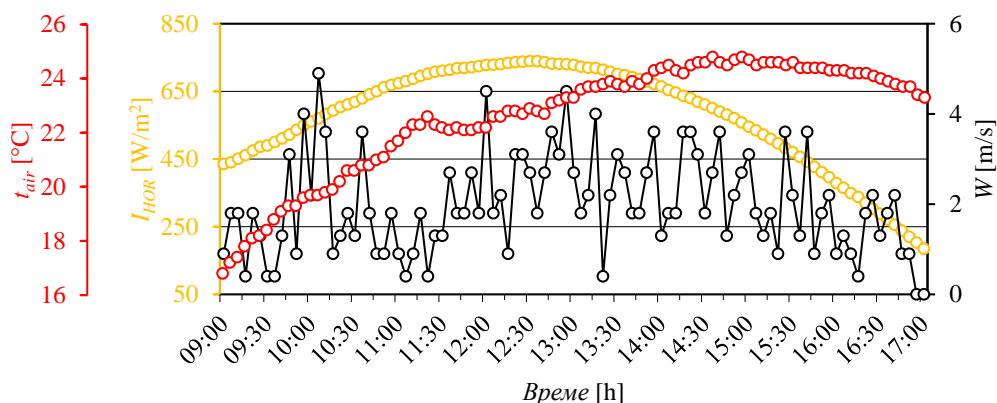
Слика 7.54 – Метеоролошки подаци за 16. август 2021. год. [138, 149]

Крива соларног зрачења (16. август, Сл. 7.54) приближно је имала облик правилне параболое, без већих изобличења, што је одлика ведрога дана. Интензитет соларног зрачења био је најјачи у 12:25 h (880 W/m^2), док се просечна дневна вредност кретала око 733 W/m^2 . Брзина ветра била је варијабилна. Максимални пикови (оба по $4,9\text{ m/s}$) забележени су у поподневним сатима (16:05 h и 16:50 h). Са друге стране, ваздушне струје биле су мирније током преподнева (до 11:50 h). Целодневно гледано, средња дневна брзина ветра кретала се у границама $1,3\text{--}1,4\text{ m/s}$. Температура ваздуха (просечна дневна износила је $35,3^\circ\text{C}$) била је најнижа у 09:00 h ($29,9^\circ\text{C}$), а највиша у 14:30 h ($37,7^\circ\text{C}$).



Слика 7.55 – Метеоролошки подаци за 10. септембар 2021. год. [138, 149]

Соларна крива (10. септембар, Сл. 7.55) показала је мањи дисконтинуитет током јутра (до 09:55 h). Просечне, максималне и минималне вредности соларног зрачења, редом су биле: 702 W/m², 879 W/m² (12:25 h) и 322 W/m² (17:00 h). Током ветровитог јутра (просечне брзине ветра кретале су се око 2,6 m/s), забележени су тренуци максималне брзине ветра, и то у износу од 5,4 m/s (10:10 h и 10:45 h). За температуру ваздуха може се рећи, да је, генерално гледано, имала растући тренд (са 21,2°C у 09:00 h, на 28,8°C у 14:55 h).



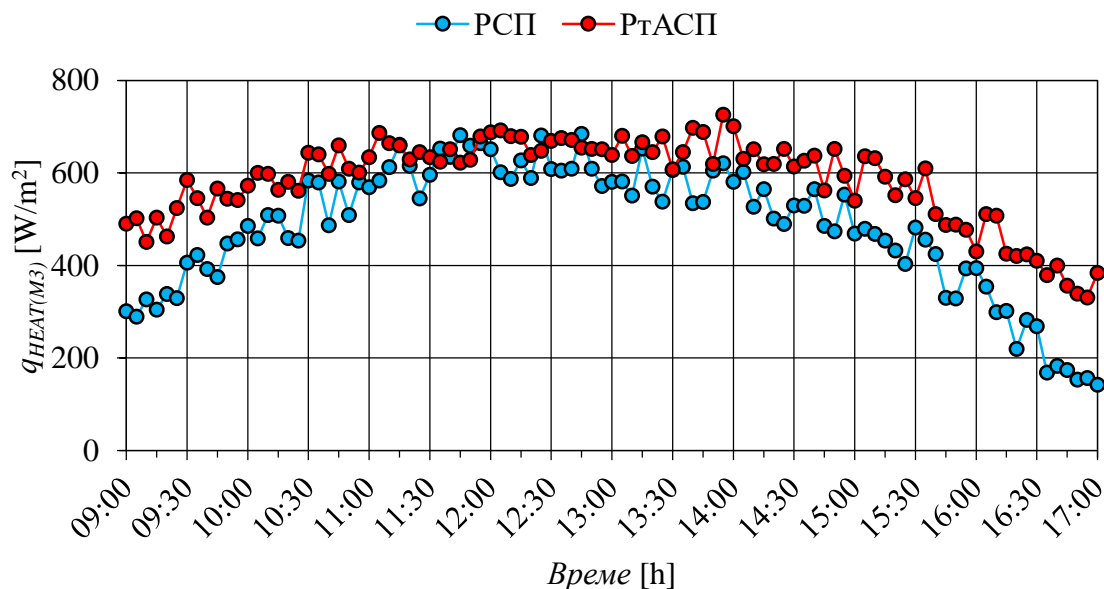
Слика 7.56 – Метеоролошки подаци за 4. октобар 2021. год. [138, 149]

Временски узорак током 4. октобра показао је следеће (Сл. 7.56): просечна вредност соларног зрачења (у границама 185-739 W/m²) била је 574 W/m², просечна брзина ветра (у распону од 0-4,9 m/s) износила је 2 m/s, док се просечна осмочасовна температура околног ваздуха (у дијапазону 16,8-24,8°C) кретала око вредности 22,6°C.

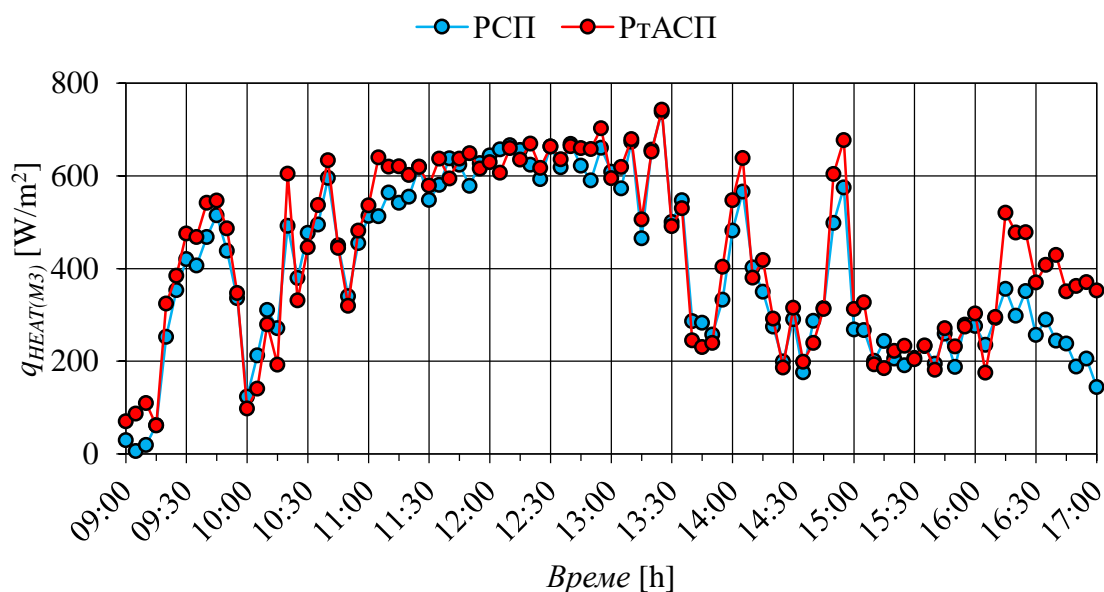
7.5.3 Резултати експерименталног истраживања

7.5.3.1 Експериментална специфична топлотна снага

Експерименталне вредности специфичних топлотних снага за РСП и РтАСП, током анализираниог периода, приказане су на наредним сликама (Сл. 7.57-7.61).



Слика 7.57 – PCП и PtACP експерименталне специфичне топлотне снаге за 15. јул 2021. год. [138]

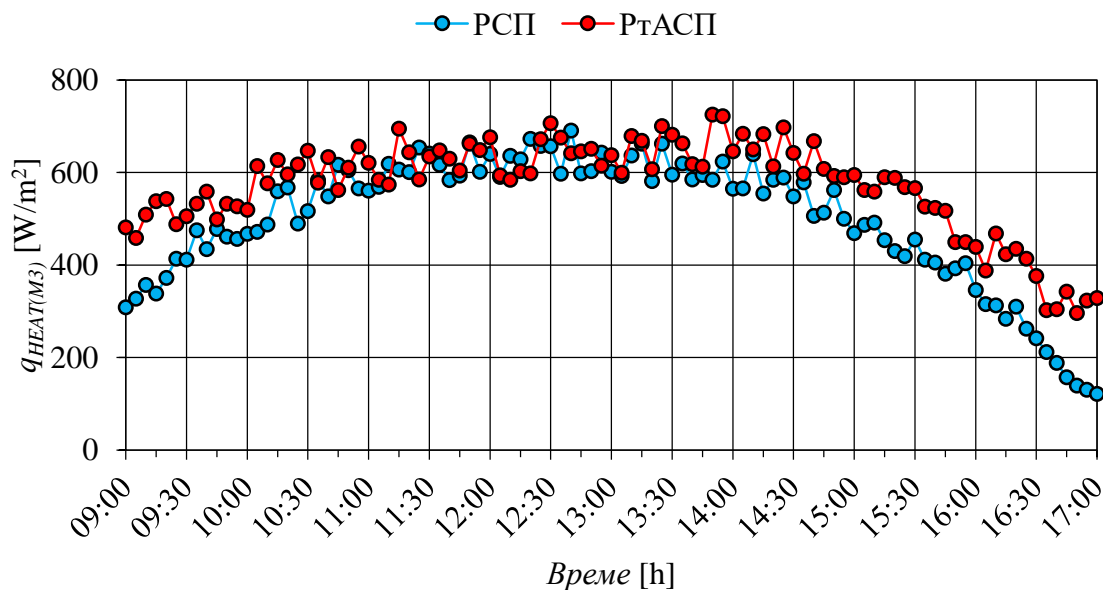


Слика 7.58 – PCП и PtACP експерименталне специфичне топлотне снаге за 29. јул 2021. год. [138]

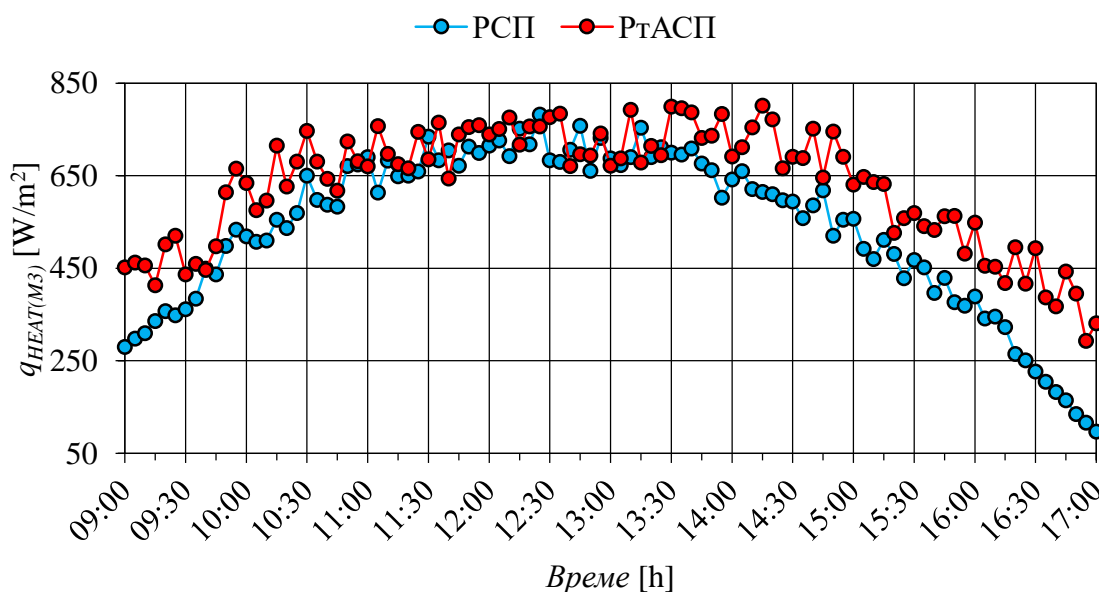
Просечне дневне вредности специфичне топлотне снаге за PCП, експериментално измерене током анализираниог периода, кретале су се у следећим границама [138]: 485,52 W/m² (15. јул, Сл. 7.57), 401,41 W/m² (29. јул, Сл. 7.58), 500,1 W/m² (16. август, Сл. 7.59), 538,25 W/m² (10. септембар, Сл. 7.60) и 509,29 W/m² (4. октобар, Сл. 7.61).

Просечне дневне вредности специфичне топлотне снаге за PtACP, током истог периода, биле су [138]: 584,23 W/m² (15. јул, Сл. 7.57), 433,8 W/m² (29. јул, Сл. 7.58), 572,42 W/m² (16. август, Сл. 7.59), 630,19 W/m² (10. септембар, Сл. 7.60) и 624,33 W/m² (4. октобар, Сл. 7.61).

Процентуално гледано, PtACP је показивао боље термичке перформансе, тј. већу специфичну топлотну снагу, респективно [138]: 20,33% (15. јул), 8,07% (29. јул), 14,46% (16. август), 17,08% (10. септембар) и 22,59% (4. октобар).



Слика 7.59 – РСП и РтАСП експерименталне специфичне топлотне снаге за 16. август 2021. год. [138]

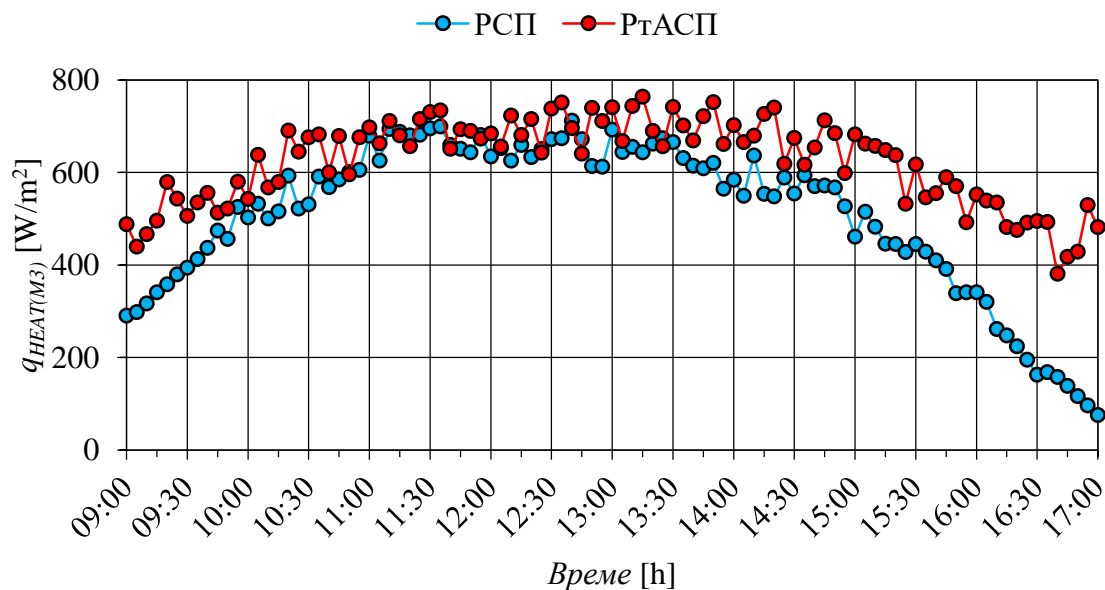


Слика 7.60 – РСП и РтАСП експерименталне специфичне топлотне снаге за 10. септембар 2021. год. [138]

Већа специфична топлотна снага, у корист РтАСП (8,07-22,59%, Сл. 7.57-7.61), резултат је минимизирања вредности соларног упадног угла у попречној равни, због коришћења специфичног рЈОП механизма^{VII-73)} [138].

Примена поменутог механизма за праћење кретања положаја Сунца долазила је до пуног изражаја у преподневним (09:00-11:00 h) и послеподневним (14:00-17:00 h) сатима, када је $q_{T,HEAT(M3)}$, и поред утицаја соларног сенчења, била и до преко 30% већа од $q_{F,HEAT(M3)}$ [138].

^{VII-73)} Поглавље 4.2.



Слика 7.61 – РСП и РтАСП експерименталне специфичне топлотне снаге за 4. октобар 2021. год. [138]

На истим дијаграмима (Сл. 7.57-7.61) може се приметити „преклапање“ РСП криве специфичне топлотне снаге са РтАСП кривом специфичне топлотне снаге. Минималне (незнатне) разлике у термичким перформансама између РСП и РтАСП, које су се јављале у периодима око соларног поднева (11:00-14:00 h), такође су последица примене специфичног рЈОП механизма, због низа пратећих ефеката који су већ описани^{VII-74)} [138]. Слични ефекти се јављају и када на површине оба СП доспевају слични износи долазног дифузног соларног зрачења, који у укупном соларном износу постају доминантна компонента у тренуцима присуства облачности (Сл. 7.58) [138]: 09:00-09:15 h, 10:00-10:15 h, 10:25-10:35 h, 10:45-11:00 h, 13:40-14:00 h, 14:10-14:50 h и 15:00-16:10 h.

7.5.3.2 Експерименталне вредности карактеристичних температура

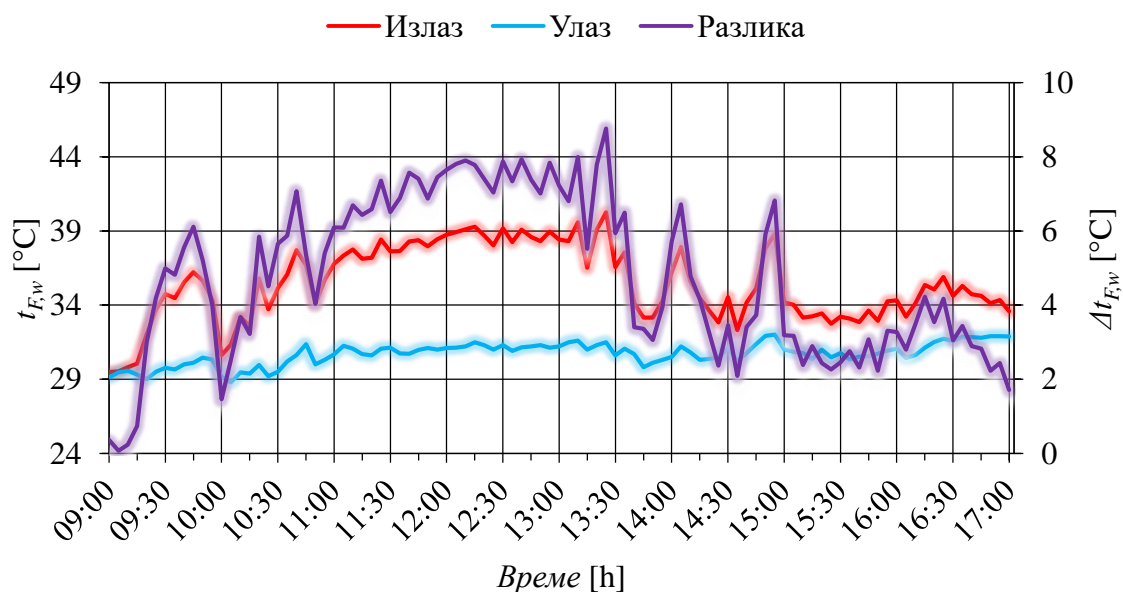
Улазне и излазне температуре воде из СП (РСП и РтАСП), као и њихове разлике, за 29. јул (облачан дан), графички су представљене на (Сл. 7.62) за РСП, односно (Сл. 7.63) за РтАСП. Исте температурне криве, за исте СП, за један ведар дан (16. август), приказане су на (Сл. 7.64, Сл. 7.65).

Иако је горњи резервоар био топлотно изолован^{VII-75)}, улазне температуре воде за РСП и РтАСП мењале су се са променама t_{air} и I_{HOR} ($Q_{F,SUN}$ и $Q_{T,SUN}$), због чега се може рећи да су $t_{F,w(in)}$ и $t_{T,w(in)}$ имале растући тренд целодневно гледано [138]: са 29,13°C на 31,88°C (РСП, 29. јул, Сл. 7.62), са 29,56°C на 32,23°C (РтАСП, 29. јул, Сл. 7.63), са 24,97°C на 34,2°C (РСП, 16. август, Сл. 7.64) и са 25,18°C на 34,7°C (РтАСП, 16. август, Сл. 7.65).

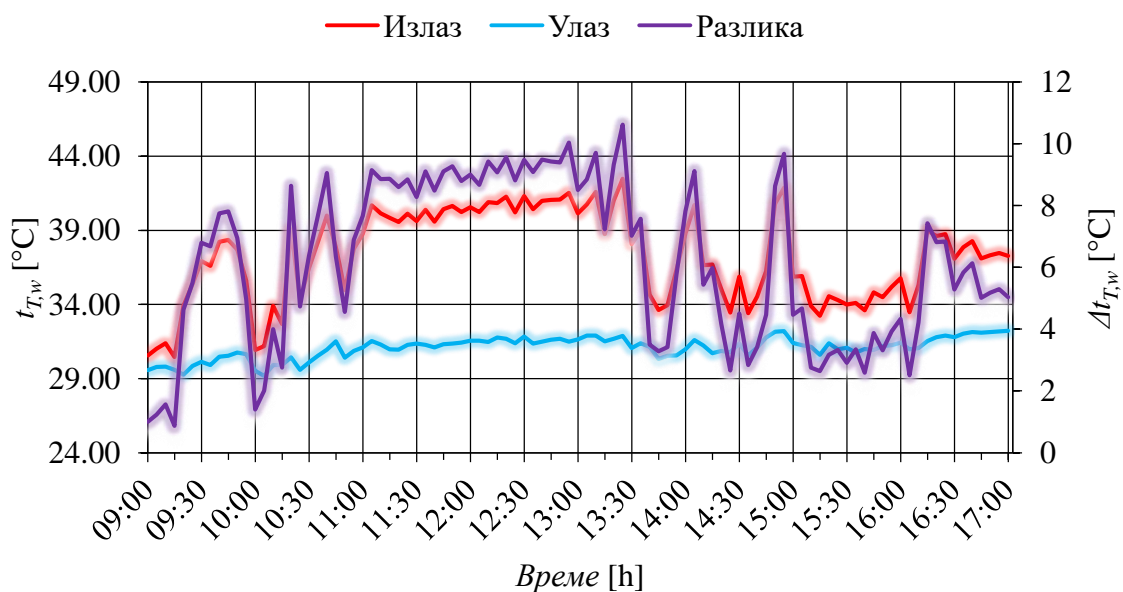
Када су у питању $t_{F,w(in)}$ и $t_{T,w(in)}$, и током других мерних дана (15. јул, 10. септембар и 4. октобар), забележене су сличне појаве попут оних приказаних на (Сл. 7.64), односно на (Сл. 7.65).

^{VII-74)} Поглавље 6.5.2.

^{VII-75)} Поглавље 5.3.3.



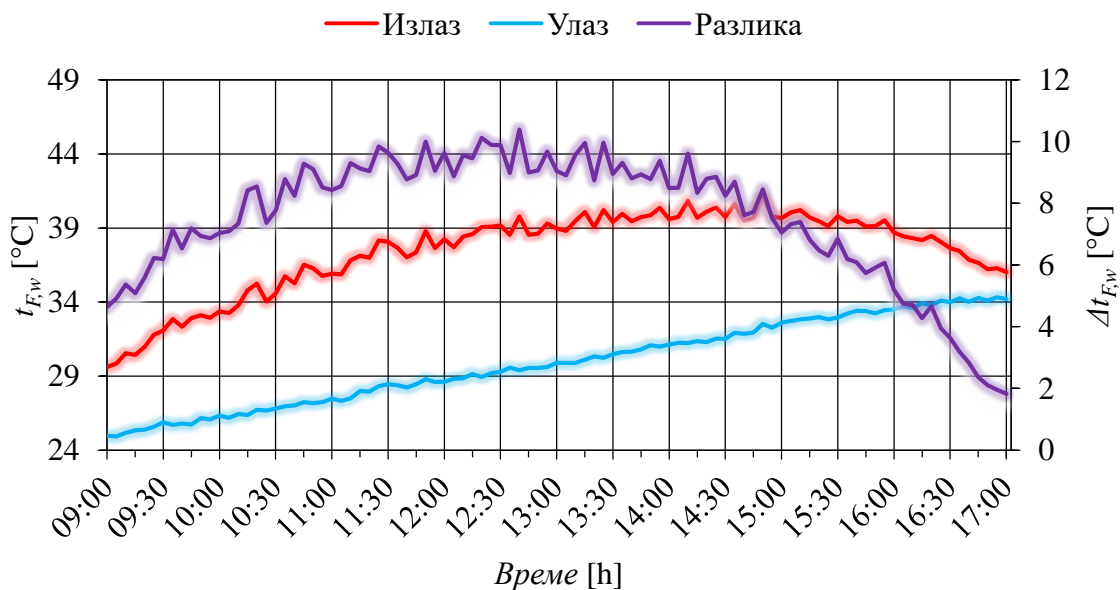
Слика 7.62 – РСП карактеристичне температурне криве радног флуида (воде) експериментално измерене за 29. јул 2021. год. [138]



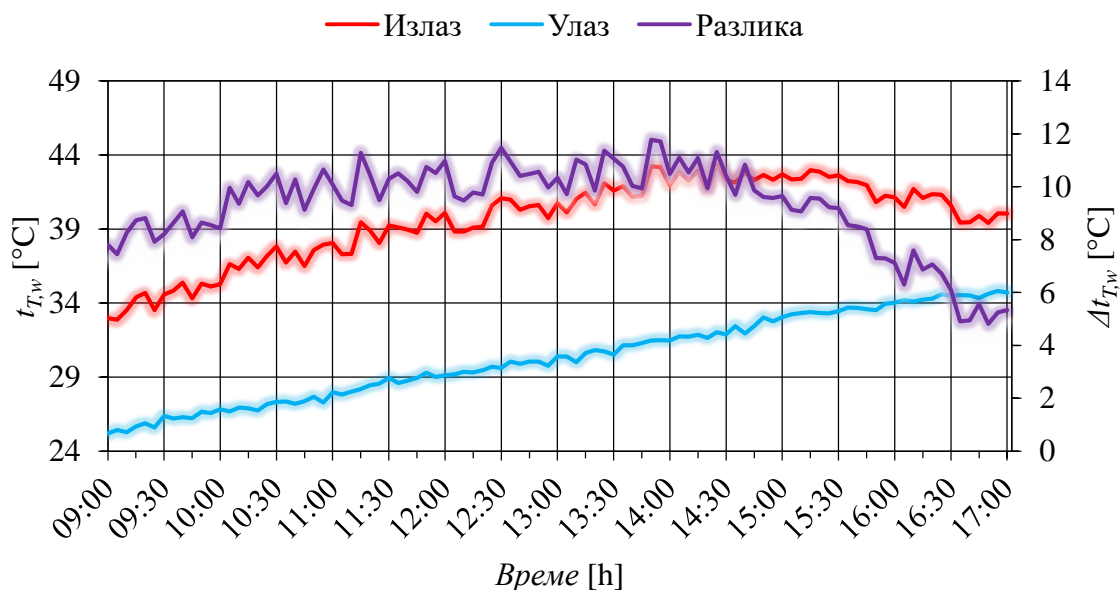
Слика 7.63 – РТАСП карактеристичне температурне криве радног флуида (воде) експериментално измерене за 29. јул 2021. год. [138]

Дневни пикови $t_{F,w(out)}$ и $t_{T,w(out)}$ забележени су током следећих временских интервала [138]: $t_{F,w(out)}=40,26^{\circ}\text{C}$ (13:25 h, 29. јул, Сл. 7.62), $t_{T,w(out)}=42,49^{\circ}\text{C}$ (13:25 h, 29. јул, Сл. 7.63), $t_{F,w(out)}=40,99^{\circ}\text{C}$ (14:50 h, 16. август, Сл. 7.64) и $t_{T,w(out)}=43,34^{\circ}\text{C}$ (14:25 h, 16. август, Сл. 7.65).

У истим временским тренуцима остварене су следеће температурне разлике $\Delta t_{F,w}$ и $\Delta t_{T,w}$ [138]: $\Delta t_{F,w}=8,76^{\circ}\text{C}$ (13:25 h, 29. јул, Сл. 7.62), $\Delta t_{T,w}=10,62^{\circ}\text{C}$ (13:25 h, 29. јул, Сл. 7.63), $\Delta t_{F,w}=8,46^{\circ}\text{C}$ (12:40 h, 16. август, Сл. 7.64) и $\Delta t_{T,w}=11,31^{\circ}\text{C}$ (14:25 h, 16. август, Сл. 7.65).



Слика 7.64 – РСП карактеристичне температурне криве радног флуида (воде) експериментално измерене за 16. август 2021. год. [138]



Слика 7.65 – РтАСП карактеристичне температурне криве радног флуида (воде) експериментално измерене за 16. август 2021. год. [138]

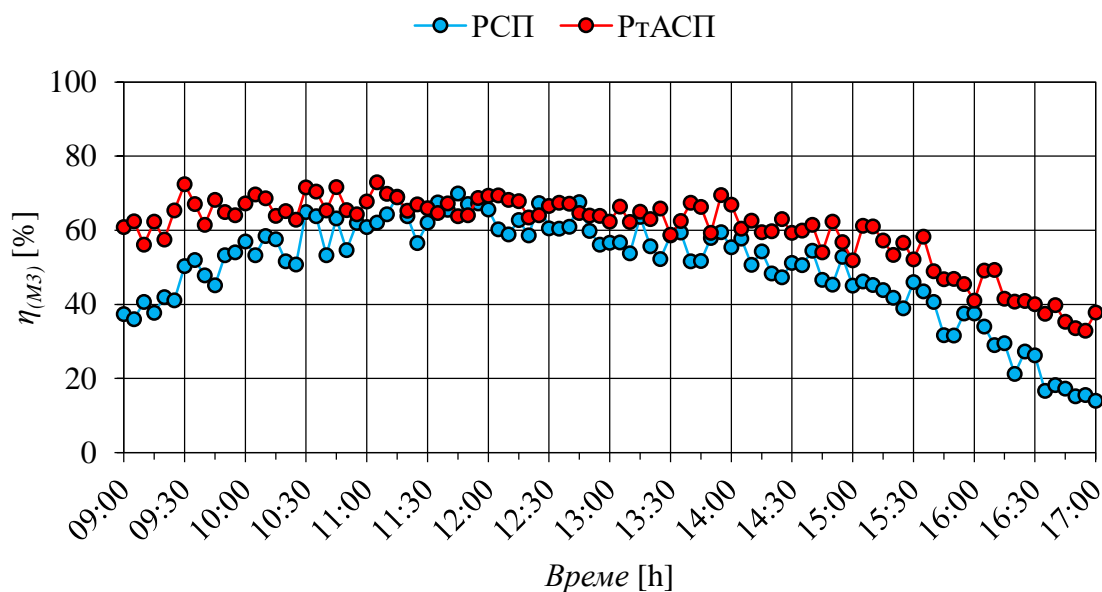
На излазне температуре $t_{F,w(out)}$ и $t_{T,w(out)}$, поред геометријских и техничких карактеристика, велики утицај имали су масени протоци кроз РСП и РтАСП. Вредности масених протока биле су константне током дана, али не и идентичне за оба СП. Због тога су разлике између $t_{F,w(out)}$ и $t_{T,w(out)}$, односно између $\Delta t_{F,w}$ и $\Delta t_{T,w}$, током мерних дана, некада биле веће, а некада мање [138].

У неким моментима облачности (29. јул, Сл. 7.62), забележени су већи температурни падови $t_{F,w(out)}$ [138]: са $34,33^{\circ}\text{C}$ (09:55 h) на $30,63^{\circ}\text{C}$ (10:00 h), са $35,8^{\circ}\text{C}$ (10:20 h) на $33,71^{\circ}\text{C}$ (10:25 h), са $37,7^{\circ}\text{C}$ (10:40 h) на $34,03^{\circ}\text{C}$ (10:50 h), са $37,55^{\circ}\text{C}$ (13:35 h) на $33,15^{\circ}\text{C}$ (13:50 h), са $37,91^{\circ}\text{C}$ (14:05 h) на $32,31^{\circ}\text{C}$ (14:35 h) и са $38,83^{\circ}\text{C}$ (14:55 h) на $32,73^{\circ}\text{C}$ (15:25 h).

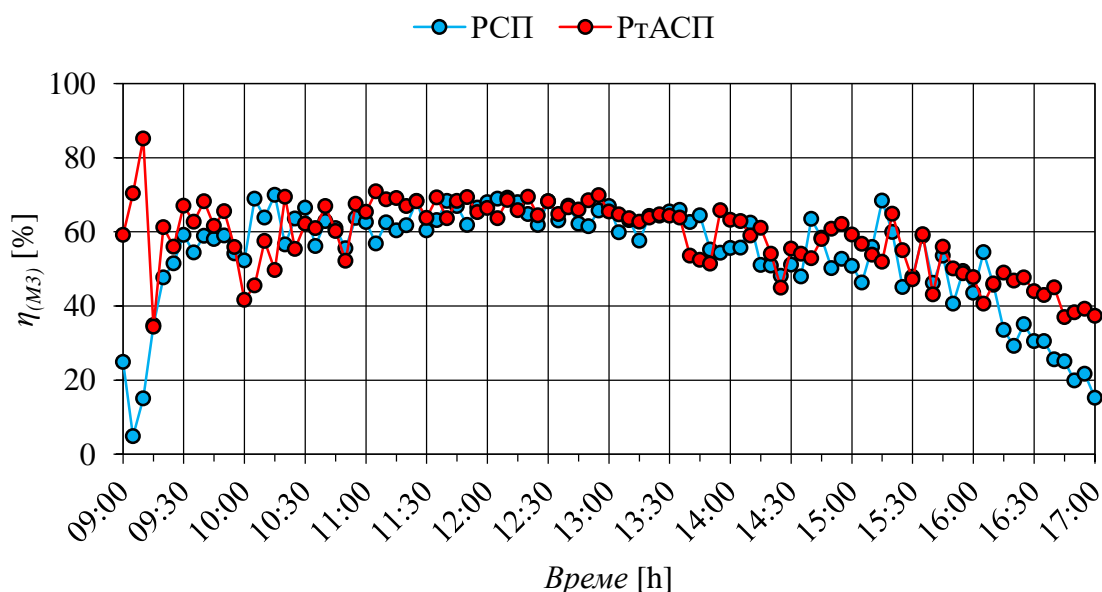
Исто важи и за $t_{T,w(out)}$ (Сл. 7.63) [138]: са 35,6°C (09:55 h) на 30,93°C (10:00 h), са 39,07°C (10:20 h) на 34,33°C (10:25 h), са 40,01°C (10:40 h) на 34,97°C (10:50 h), са 38,95°C (13:35 h) на 33,62°C (13:45 h), са 40,71°C (14:05 h) на 33,4°C (14:35 h) и са 41,88°C (14:55 h) на 33,24°C (15:15 h).

7.5.3.3 Експериментална термичка ефикасност

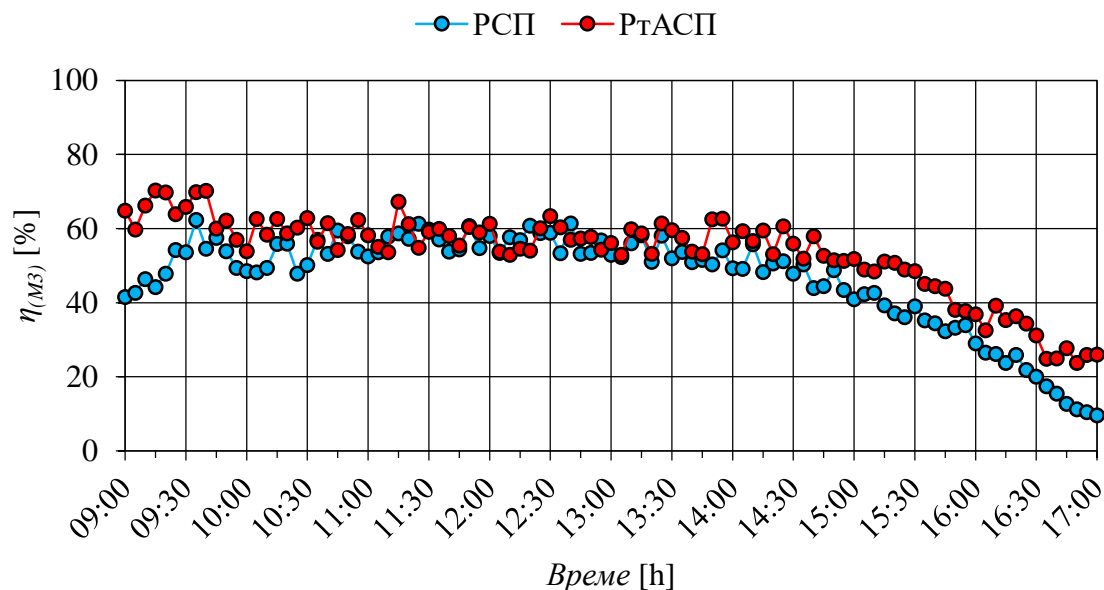
Термичка ефикасност сваког СП је најважнији показатељ његових термичких перформанси. На наредним сликама (Сл. 7.66-7.70) управо је коришћен овај индикатор да би се извршило поређење РСП и РТАСП.



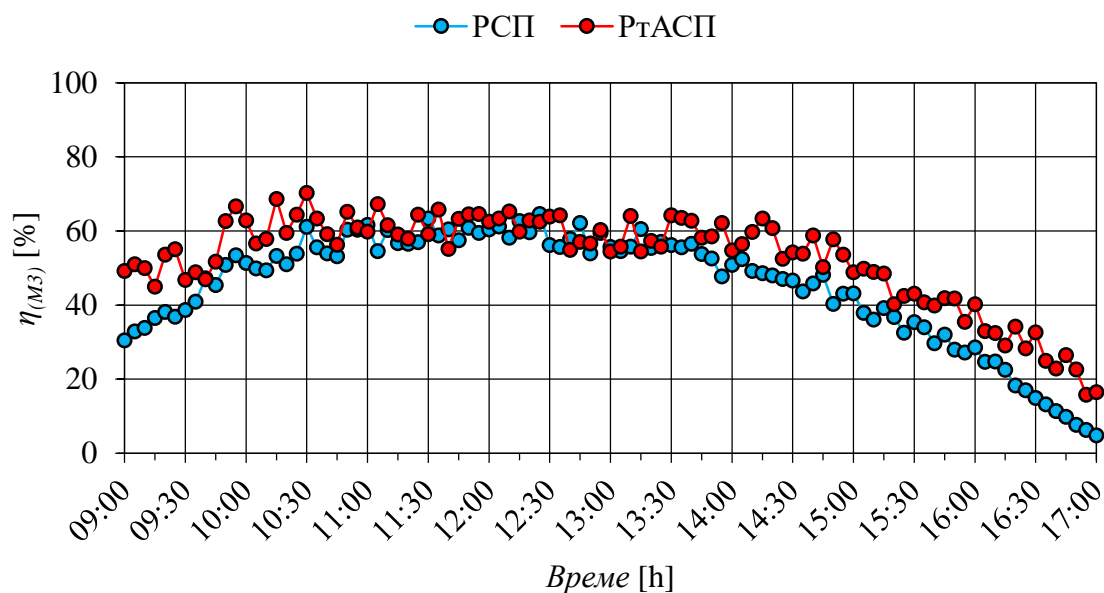
Слика 7.66 – РСП и РТАСП експерименталне вредности термичких ефикасности за 15. јул 2021. год.



Слика 7.67 – РСП и РТАСП експерименталне вредности термичких ефикасности за 29. јул 2021. год.



Слика 7.68 – РСП и РТАСП експерименталне вредности термичких ефикасности за 16. август 2021. год.

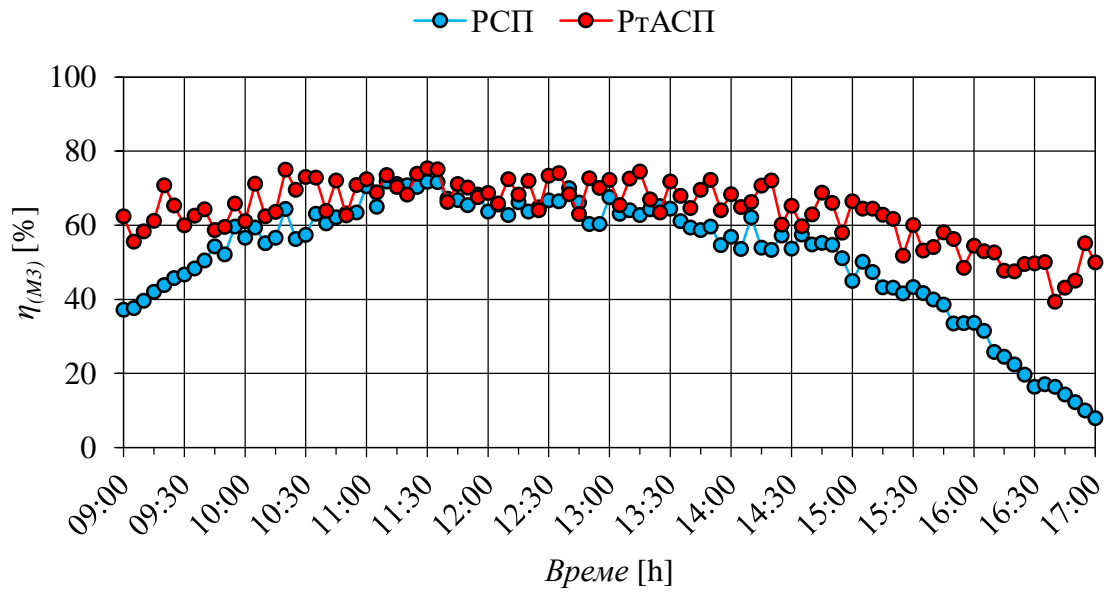


Слика 7.69 – РСП и РТАСП експерименталне вредности термичких ефикасности за 10. септембар 2021. год.

Просечне дневне вредности термичких ефикасности за РСП, током мерних дана, биле су: 49,78% (15. јул, Сл. 7.66), 53,99% (29. јул, Сл. 7.67), 46,7% (16. август, Сл. 7.68), 45,35% (10. септембар, Сл. 7.69) и 52,02% (4. октобар, Сл. 7.70).

Са друге стране, за РТАСП, током истог периода, измерене су следеће вредности просечних дневних термичких ефикасности: 60,05 (15. јул, Сл. 7.66), 58,57% (29. јул, Сл. 7.67), 53,56% (16. август, Сл. 7.68), 52,74% (10. септембар, Сл. 7.69) и 63,9% (4. октобар, Сл. 7.70).

У зависности од временских прилика, РТАСП просечне дневне вредности термичких ефикасности биле су веће од РСП просечних дневних вредности термичких ефикасности (од 8,48% за 29. јул, Сл. 7.67 до 22,83% за 4. октобар, Сл. 7.70).

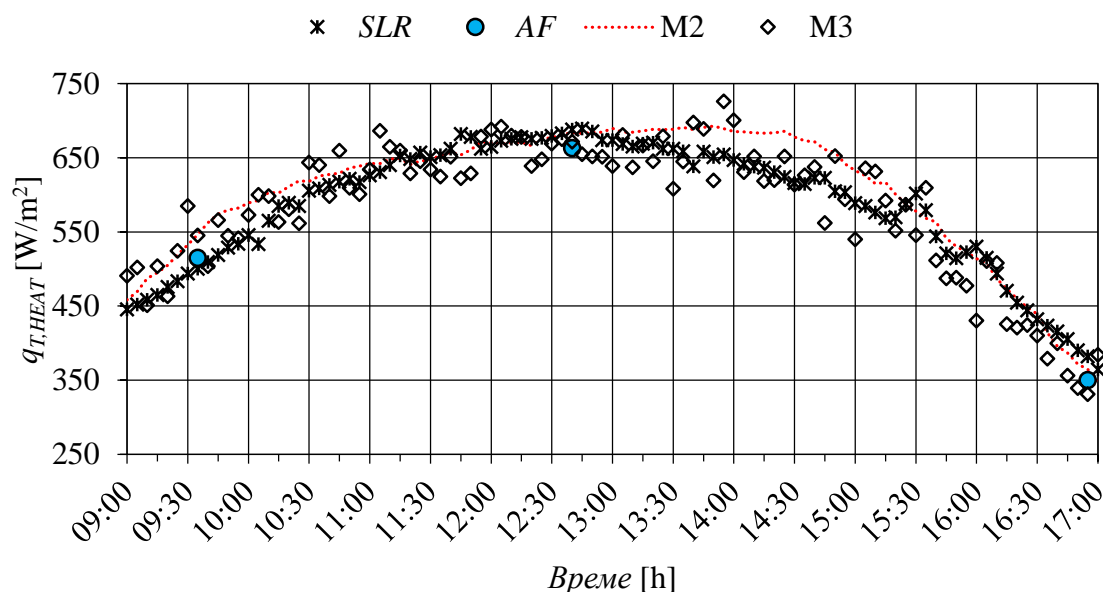


Слика 7.70 – РСП и РТАСП експерименталне вредности
термичких ефикасности за 4. октобар 2021. год.

7.6 Верификација резултата и геометријско-термичка оптимизација РтАСП

На наредним дијаграмима (Сл. 7.71-7.75), за одабране датуме (15. јул, 29. јул, 16. август, 10. септембар, 4. октобар), мултидисциплинарним^{VII-76)} поређењем специфичних топлотних снага, извршена је верификација РтАСП концепта.

Полазне РтАСП криве специфичних топлотних снага (Сл. 7.71-7.75), одређене су на основу математичког модела^{VII-77)}, коме је у овом случају додељена улога главног поредбеног критеријума. То значи да су у наставку анализирна апсолутна процентуална одступања између следећих парова: математички модел (M2) и експеримент (M3), математички модел и *SLR* метода, као и математички модел и *Ansys Fluent* софтвер (*AF*).



Слика 7.71 – Вредности теоријских и експерименталних РтАСП топлотних снага за 15. јул 2021. год.

Поређењем теоријских и експерименталних резултата специфичних топлотних снага, просечна дневна апсолутна грешка мерења била је мања од 10%: 5,58% (15. јул, Сл. 7.71), 6,66% (29. јул, Сл. 7.72), 5,15% (16. август, Сл. 7.73), 6,04% (10. септембар, Сл. 7.74) и 5,71% (4. октобар, Сл. 7.75).

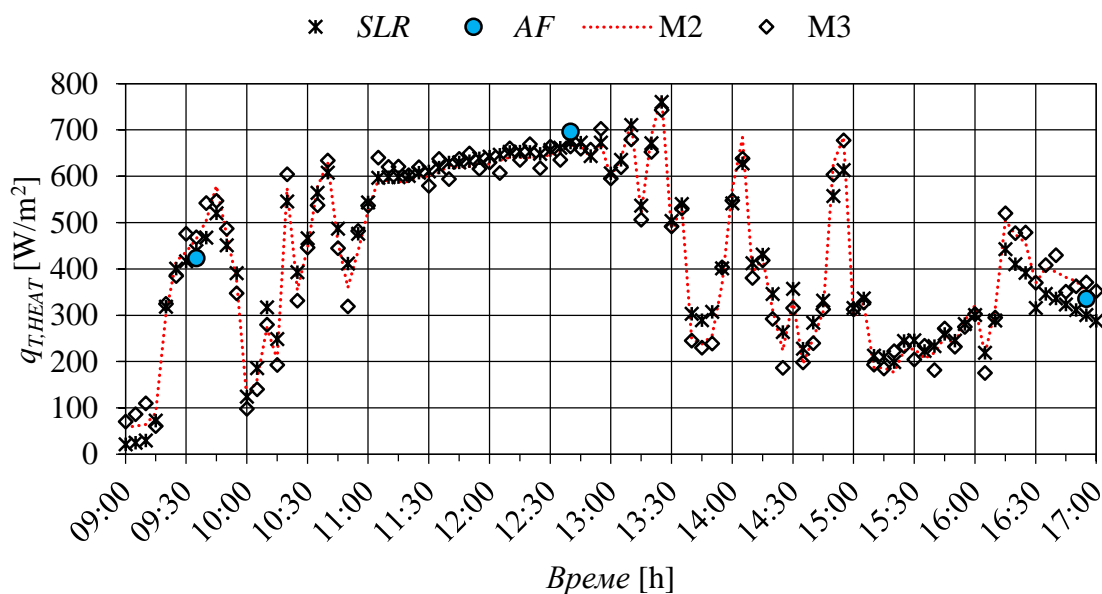
Током 15. јула апсолутна грешка била је већа од 10% (10,44-19,5%) током следећих тренутака (Сл. 7.71): 09:40 h, 13:30 h, 13:50 h, 14:15 h, 14:30 h, 14:45 h, 15:00 h, 15:45 h, 16:00 h и 16:15 h. Током облачног дана (29. јул, Сл. 7.72), примећено је неслагање између математичког модела и експеримента у нешто већем процентуалном износу (до 25,79%). И поред тога, апсолутна грешка била је мања од 10% за преко 85% узорка. Тиме је, и у тренуцима доминантног утицаја дифузног зрачења, потврђено слагање математичког модела и експеримента.

Максималне вредности апсолутних процентуалних одступања, између математичког модела и експеримента, током преосталих мерних дана биле су: 16,76% (16:35 h, Сл. 7.73), 19,51% (16:55 h, Сл. 7.74) и 29,18% (16:55 h, Сл. 7.75). Током истих дана, узорци

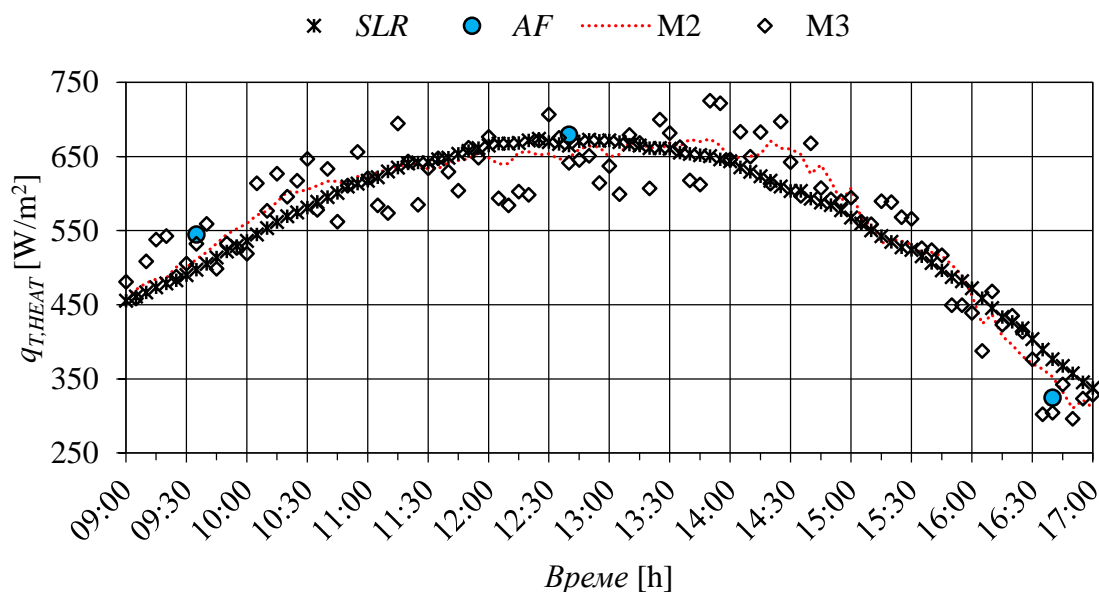
^{VII-76)} Поглавље 7.1, поглавље 7.2, поглавље 7.3, поглавље 7.4, поглавље 7.5.

^{VII-77)} Поглавље 6, поглавље 7.1.

са одступањем мањим од 10% били у: преко 93% случајева (16. август, Сл. 7.73), преко 86% случајева (10. септембар, Сл. 7.74) и преко 90% случајева (4. октобар, Сл. 7.75).



Слика 7.72 – Вредности теоријских и експерименталних РТАСП топлотних снага за 29. јул 2021. год.

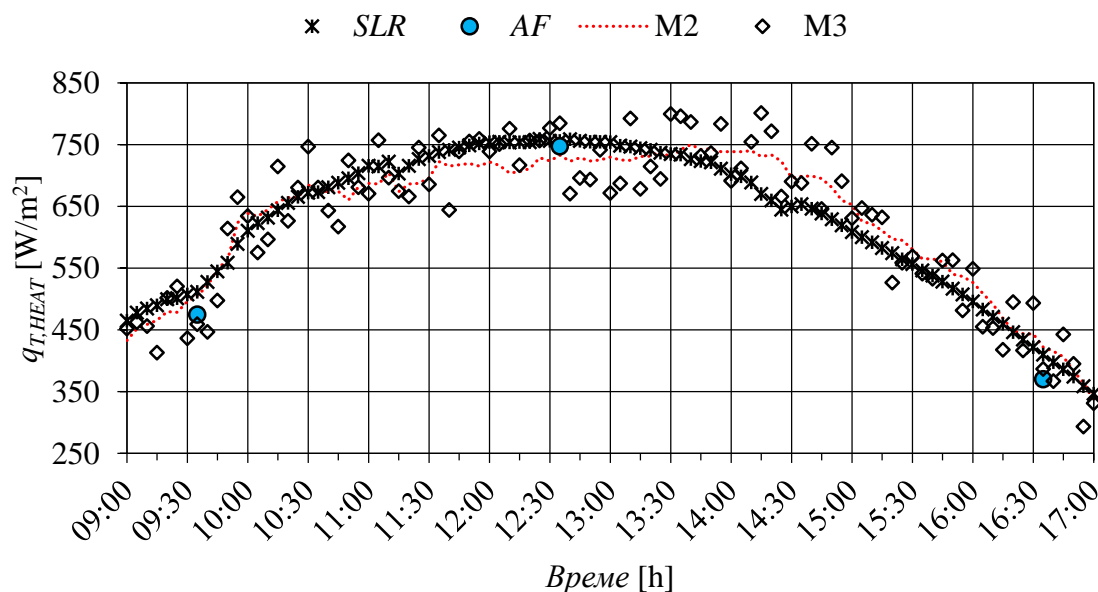


Слика 7.73 – Вредности теоријских и експерименталних РТАСП топлотних снага за 16. август 2021. год.

Један од главних разлога неслагања математичког модела са експериментално измереним вредностима је вредност масеног протока. Наиме, у теоријским прорачунима коришћена је константна вредност масеног протока, тј. просечна дневна вредност^{VII-78)}, иако су постојале минорне дневне осцилације. Сложени механизми простирања топлоте на релацији ламела и околни ваздух, ламела и радни флуид (вода), сабирник/разделник

^{VII-78)} Поглавље 7.5.1 (Таб. 7.8).

и околни ваздух, као и занемаривање^{VII-79)} уздужних топлотних губитака кроз данца РтАСП, такође су имали утицаја на вредности специфичних топлотних снага. Ту се такође морају поменути и следећи, мање утицајни, фактори: тачност мерне опреме^{VII-80)}, време одзива специфичног рЈОП механизма, присуство прашине на стакленим цевима (занемарена у теоријским прорачунима), утицај правца ветра (у теоријским прорачунима у обзир се узима само интензитет, тј. брзина ветра), замућеност атмосфере и сл. појаве.



Слика 7.74 – Вредности теоријских и експерименталних РтАСП топлотних снага за 10. септембар 2021. год.

У случају поређења математичког модела са *SLR* методом, просечна дневна апсолутна одступања износила су: 4,75% (15. јул, Сл. 7.71), 8,69% (29. јул, Сл. 7.72), 4,3% (16. август, Сл. 7.73), 5,97% (10. септембар, Сл. 7.74) и 5% (4. октобар, Сл. 7.75).

Максимална апсолутна одступања забележена су током следећих тренутака: 11,01% (10:05 h, Сл. 7.71), 21,99% (13:40 h, Сл. 7.72), 16,24% (16:50 h, Сл. 7.73), 10,82% (14:25 h, Сл. 7.74) и 16,39% (09:05 h, Сл. 7.75).

Разлози неслагања математичког модела и *SLR* методе једним делом налазе се у већ поменутих условима спровођења експеримента. Други битан разлог налази се у самој ограничениости *SLR* методе, јер се заснива на само једном варијабилном инпуту (улазу), а то је интензитет соларног зрачења који бележи хоризонтални пиранометар^{VII-81)}. Иако је, процентуално гледано, утицај соларног зрачења на термичке перформансе, било ког СП највећи, па тако и на РтАСП, прецизност предиктивних модела расте са бројем варијабилних улаза. У овом конкретном случају мисли се на следеће метеоролошке^{VII-82)} параметре: температура околног ваздуха, правац и брзина ветра, итд. Поменути параметри некада могу у већој мери утицати на перформансе СП, све зависно од њиховог дизајна и услова рада (оперативних температура, итд.).

Комплексно истраживање РтАСП термичких перформанси у оквиру софтвера *Ansys Fluent* заснивало се на великом броју мануелних подешавања. Због тога је на приказаним

VII-79) Поглавље 6.3.2.

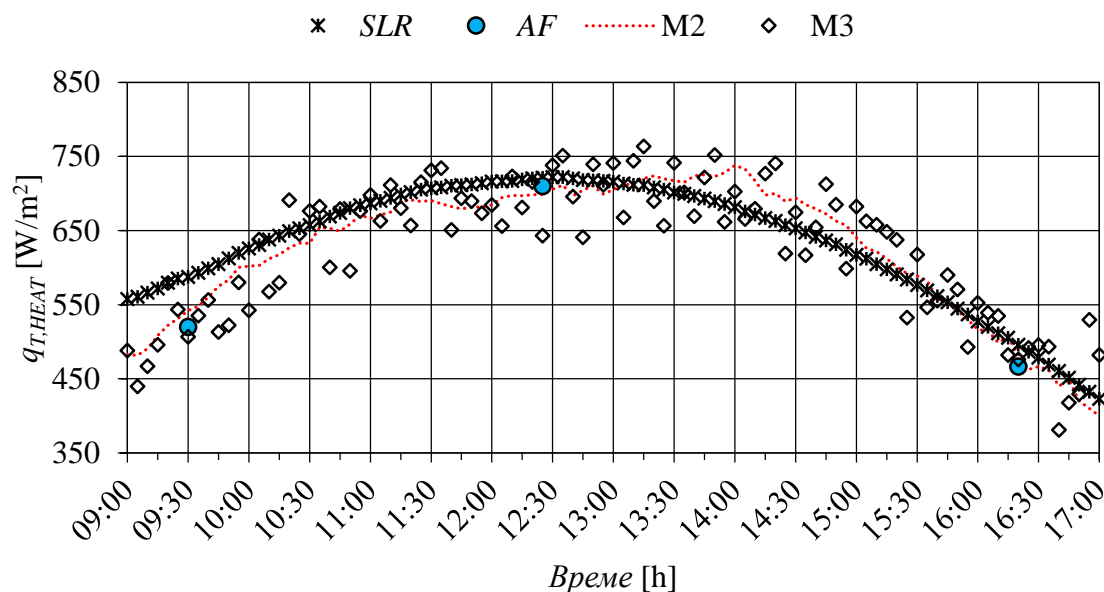
VII-80) Поглавље 7.5.1 (Таб. 7.7).

VII-81) Поглавље 7.5.1 (Сл. 7.49).

VII-82) Поглавље 7.5.2.

дијаграмима (Сл. 7.71-7.75) извршено поређење математичког и AF модела за следећа три карактеристична временска тренутка: преподневни тренутак делимичне соларне осунчаности и осенчености, потпуна соларна осунчаност у тренутку соларног поднева и послеподневни тренутак делимичне соларне осунчаности и осенчености.

Апсолутно процентуално одступање математичког од AF модела било је мање од 10% у свим анализираним случајевима ($\approx 5\%$). Њихова неподударност узрокована је квалитетом генерисане мреже^{VII-83}), специфичностима $DTRM$ соларног модела^{VII-84}), усвајањем услова^{VII-85}) $a_{T,LAM}=e_{T,LAM}$, карактеристикама итеративног^{VII-86}) прорачунског алгоритма, усвојеним вредностима почетних граничних услова^{VII-87}), итд.



Слика 7.75 – Вредности теоријских и експерименталних РтАСП топлотних снага за 4. октобар 2021. год.

Сва теоријска и експериментална истраживања РСП и РтАСП конструкција до сада су се првенствено базирала на поређењу њихових специфичних топлотних снага. Према овом индикатору, предност је била на страни новог соларног дизајна.

Пре евентуалне будуће примене новог соларног концепта (рецимо у стамбеном сектору), треба извршити поређење наведених СП и из угла енергетске ефикасности (у зградарству). Из тог разлога, на наредном дијаграму (Сл. 7.76), приказана је анализа потрошње финалне и примарне енергије, као и емисије CO_2 у случају коришћења РСП, односно РтАСП.

Током осмочасовног^{VII-88}) радног времена, за одабране датуме, производња топлотне енергије из РСП била је: 1367,22 Wh (15. јул), 1130,37 Wh (29. јул), 1408,08 Wh (16. август), 1515,71 Wh (10. септембар) и 1434,16 Wh (4. октобар).

VII-83) Поглавље 7.3.2 (Сл. 7.31).

VII-84) Поглавље 7.3.2.2.2.

VII-85) Коришћени симулациони модел нема могућност подешавања оптичких карактеристика селективних премаза (површина).

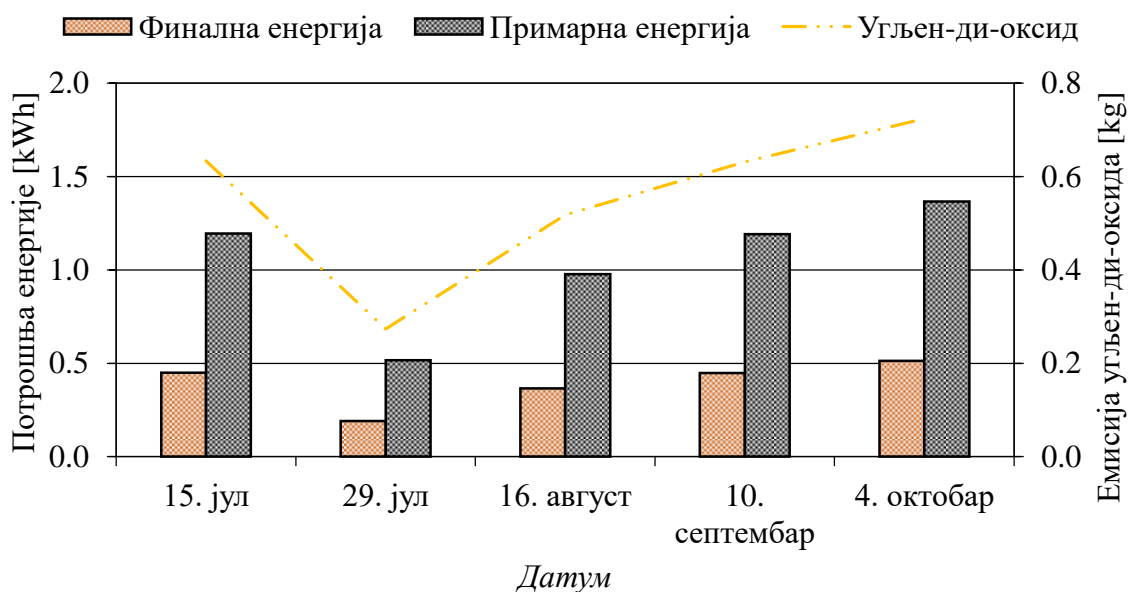
VII-86) SIMPLE шема [218].

VII-87) Поглавље 7.3.2 (Таб. 7.4, Таб. 7.5, Таб. 7.6).

VII-88) Поглавље 7.5.1.

Током истог периода, производња топлотне енергије из РтАСП била је: 1869,54 Wh (15. јул), 1388,16 Wh (29. јул), 1831,74 Wh (16. август), 2016,61 Wh (10. септембар) и 1997,86 Wh (4. октобар).

Ако би се ова разлика у производњи топлотне енергије (502,31 Wh за 15. јул, 257,79 Wh за 29. јул, 423,46 Wh за 16. август, 500,9 Wh за 10. септембар и 563,7 Wh за 4. октобар) надоместила, рецимо, додатним улагањем електричне енергије (електрични бојлер), тада би потрошња финалне енергије у случају коришћења РСП, и поред (додатног) улагања електричне енергије у случају РтАСП (да би се омогућио рад рЈОП механизма, тј. рад корачног мотора), била већа^{VII-89)} за (Сл. 7.76): 448,75 Wh (15. јул), 191,36 Wh (29. јул), 365,75 Wh (16. август), 447,26 Wh (10. септембар) и 513,36 Wh (4. октобар).



Слика 7.76 – Енергетски (потрошња финалне и примарне енергије) и еколошки (емисија CO₂) бенефити коришћења конструкције РтАСП над конструкцијом РСП

Ако се за електричну енергију усвоји да је коефицијент трансформације примарне енергије 2,5 [220], тада РтАСП има још већу предност коришћења над РСП (Сл. 7.76): 1,2 kWh (15. јул), 0,52 kWh (29. јул), 0,98 kWh (16. август), 1,19 kWh (10. септембар) и 1,37 kWh (4. октобра).

Поред енергетских, на страни РтАСП су и еколошки индикатори, јер употребу РСП прати и већа емисија (0,53 kg/kWh [220]) CO₂ (Сл. 7.76): 0,63 kg (15. јул), 0,27 kg (29. јул), 0,52 kg (16. август), 0,63 kg (10. септембар) и 0,72 kg (4. октобар).

Одређивању оптималне ширине ламеле, тј. равне апсорберске плоче (Сл. 7.77) претходило је увођење следећих оптимизационих фактора:

- Геометријски оптимизациони фактор F_G^{AF} [kg/m] (Јед. 7.25);
- Термички оптимизациони фактор F_T^{AF} [°C/m] (Јед. 7.26).

^{VII-89)} Хибридни корачни серво мотор током осмочасовног рада потроши 80 Wh електричне енергије (поглавље 5.3.2). Степен корисности електричног грејача је 0,95 [219].

$$F_G^{AF} = \frac{A_{LAM(1,tot)}^{AF}}{V_{LAM(1,tot)}^{AF}} m_{LAM(1,tot)}^{AF} \quad (7.25)$$

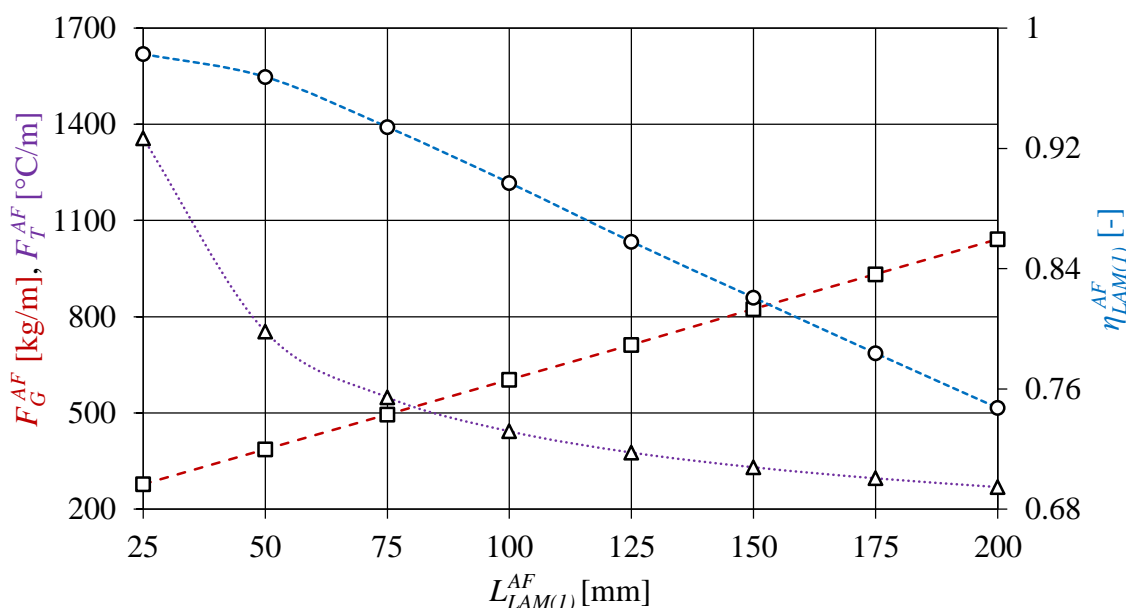
$$F_T^{AF} = \frac{t_{LAM,w(out)}^{AF}}{L_{LAM(1)}^{AF}} \quad (7.26)$$

где су: $A_{LAM(1,tot)}^{AF}$ [m²] укупна површина ламеле, $V_{LAM(1,tot)}^{AF}$ [m³] укупна запремина ламеле, $m_{LAM(1,tot)}^{AF}$ [kg] маса ламеле, $t_{LAM,w(out)}^{AF}$ [°C] температура воде на излазу из ламеле и $L_{LAM(1)}^{AF}$ [m] ширина ламеле.

Чинилац $\frac{A_{LAM(1,tot)}^{AF}}{V_{LAM(1,tot)}^{AF}}$ [m⁻¹] (Јед. 7.25) у ствари представља фактор облика, у овом

случају ламеле. Ова величина велику примену има у зградарству^{VII-90}), приликом одређивања параметара енергетске ефикасности грађевинских објеката.

Оптимизациони прорачунски ток спроведен је у софтверу *Ansys Fluent*, уз добро познате граничне услове^{VII-91}).



Слика 7.77 – Геометријско-термичка оптимизација ширине ламеле

Геометријски оптимизациони фактор, са повећањем ширине ламеле, има растући тренд (Сл. 7.77), јер је принос производа укупне површине и масе већи од приноса укупне запремине. За разлику од величине F_G^{AF} , на (Сл. 7.77) може се видети да величина F_T^{AF} има опадајући тренд, јер температурни принос ламеле не прати повећање њене ширине. Иако се са повећањем ширине ламеле повећава и њена топлотна снага, принос топлотних губитака је већи (бржи), због чега се са повећањем горње (самим тим и укупне) површине ламеле, смањује њен термички степен корисности (Сл. 7.77).

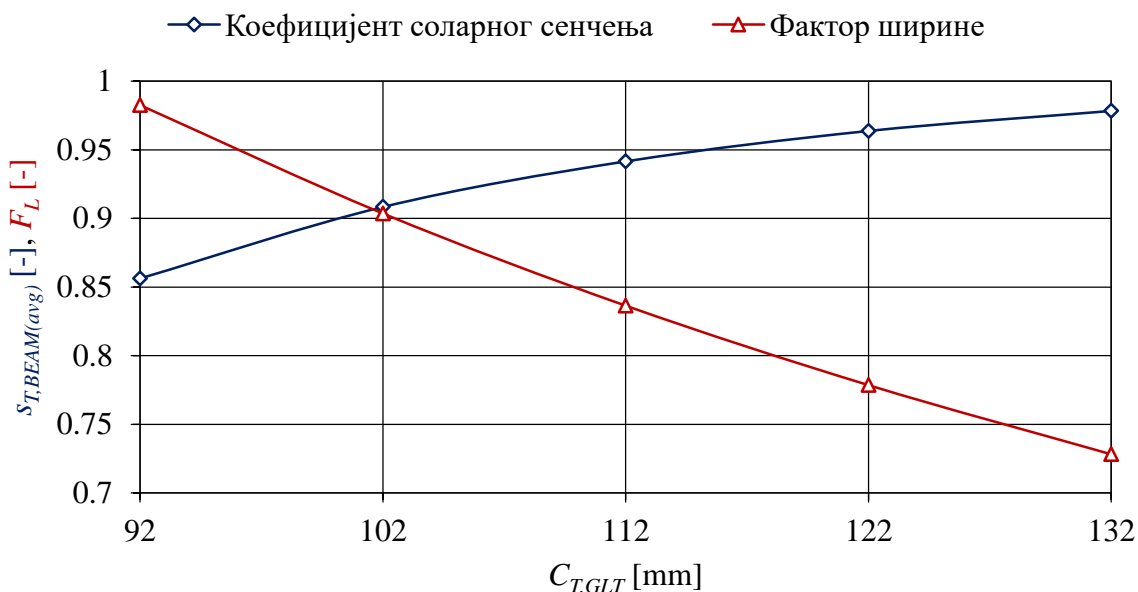
^{VII-90}) Фактор облика зграда [221].

^{VII-91}) Поглавље 7.3.2 (Таб. 7.2).

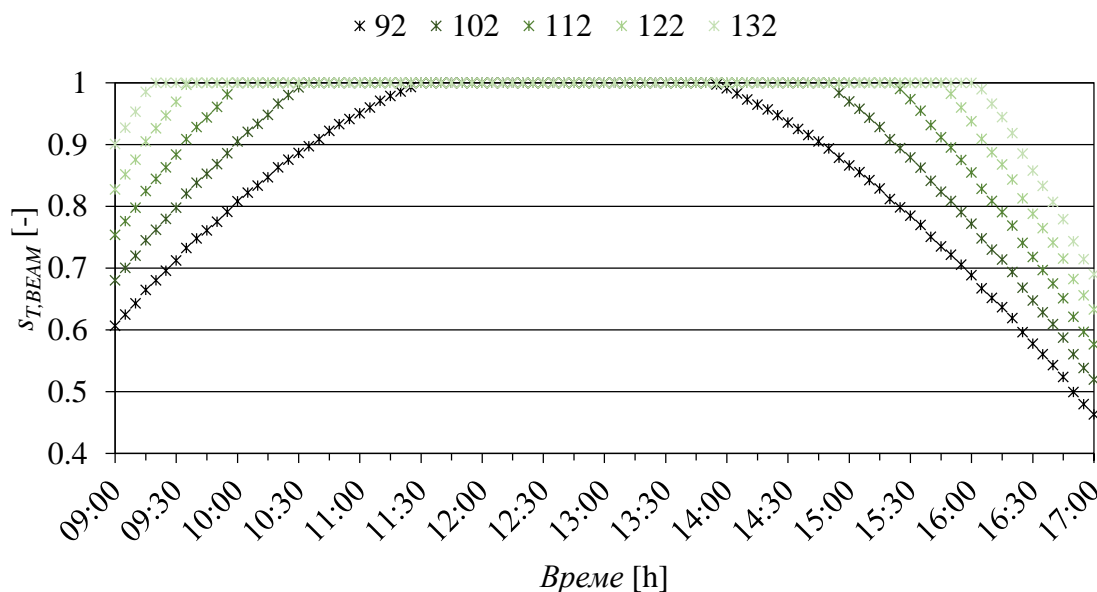
Када се у обзир узме све наведено, са (Сл. 7.77) може се извући закључак да се геометријско-термички баланс постиже при ширини ламеле $L_{LAM(1)}^{AF}=80$ mm, што потврђује и вредност термичке ефикасности која је изнад 90%.

Након одређивања оптималне ширине ламеле (Сл. 7.77), на следећем дијаграму (Сл. 7.78) одређено је оптимално међусобно осно растојање између ламела (стаклених цеви) РтА у конструкцији РтАСП.

Наиме, дијаграм на (Сл. 7.78) важи за 16. август, али се оптимизациони приступ и методологија могу користити за одређивање оптималног међусобног осног растојања између РтА за било који дан у години.



Слика 7.78 – Геометријско-термичка оптимизација међусобног осног растојања између ламела (стаклених цеви) РтА у конструкцији РтАСП



Слика 7.79 – Коефицијент соларног сенчења у зависности од међусобног осног растојања ламела (стаклених цеви) РтА у конструкцији РтАСП за 16. август 2021. год.

Као што се може видети са (Сл. 7.78), оптимално међусобно осно растојање налази се у пресеку $ST_{,BEAM(avg)}$ и F_L кривих. Величина $ST_{,BEAM(avg)}$ представља коефицијент просечног дневног соларног сенчења^{VII-92)} (Сл. 7.79), док величина F_L представља фактор ширине (Јед. 7.27).

$$F_L = \frac{n_{T,GLT} D_{T,GLT(o)}}{(n_{T,GLT} - 1) C_{T,GLT} + D_{T,GLT(o)}} \quad (7.27)$$

Вредности $ST_{,BEAM(avg)}$ и F_L условљене су следећим ограничењима:

- $L_{LAM(1)}^{AF} = 80$ mm;
- $D_{T, GLT(o)} = 90$ mm (зазор^{VII-93)} између ламеле и стаклене цеви је 2 mm, дебљина стакла је 3 mm);
- $C_{T, GLT} = 92-132$ mm (горња граница приближно је одређена полупречником стаклене цеви).

На основу (Сл. 7.78) може се закључити да је оптимално међусобно осно растојање између РТА у конструкцији РТАСП за 16. август током осмочасовног периода 101 mm.

^{VII-92)} Коефицијент (тренутног) соларног сенчења детаљно је описан у поглављу 6.5.2.

^{VII-93)} Линијски и запремински коефицијенти термичког ширења (дилатационе карактеристике) стакла ($9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ и $27 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [222]) и алуминијума ($25 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ и $75 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [222]) се разликују.

ПОГЛАВЉЕ

VIII

Закључак

Област соларне технике последњих деценија налази се у експанзији. Са циљем да се бесплатна Сунчева енергија што више искористи, током времена настао је велики број различитих соларних конструкција, које соларну енергију трансформишу (конвертују), или у топлотну (соларни пријемници), или у електричну (фотонапонски пријемници), или у топлотну и електричну истовремено (хибридни соларни пријемници). С тим у вези, у оквиру ове докторске дисертације представљен је нови соларни дизајн за претварање соларне енергије у топлотну енергију – соларни пријемник са ротационим апсорберима (РтАСП).

Конструкција РтАСП састављена је од 5 ротационих апсорбера (РтА), даље настали комбиновањем равних апсорберских плоча (ламела) са интегрисаним проточним каналима кружног попречног пресека са доње стране (карактеристика равних соларних пријемника), стаклених цеви (карактеристика вакуумских соларних пријемника), специјално дизајнираних данаца, заптивки и обртних спојница, као и механизма за праћење (у правцу И-З око нагнуте С-Ј осе) кретања положаја Сунца током дана. Механизам за праћење кретања положаја Сунца заснива се на временском контролисању и потпуној аутоматизованости, али и на интерном (релативном) закретању (ротирању) свих РтА истовремено (у истом смеру и истом брзином), без екстерног (апсолутног) кретања соларног пријемника.

Због спајања особина фиксних соларних пријемника са јединственим механизмом за праћење кретања положаја Сунца, између осталог, у овој докторској дисертацији, извршена је и допуна класификације покретних соларних пријемника, увођењем новог критеријума (поред броја оса и њиховог положаја у простору) поделе – начин праћења кретања положаја Сунца. Према овом класификационом критеријуму, сви покретни соларни пријемници могу бити са релативном (интерном), односно са апсолутном (екстерном) променом положаја у простору, тј. кретањем.

Теоријско и експериментално истраживање РтАСП термичких перформанси (топлотна снага, топлотни губици и термичка ефикасност) спроведено је на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, уз истовремено поређење са термичким

перформансама (контролног) класичног равног соларног пријемника (РСП). Као главни индикатор њиховог поређења, коришћене су активне површине за прикупљање соларне енергије, приближно истих димензија, израђене од истог типа апсорбера (ламела).

Теоријском истраживању претходило је формирање одговарајућих РтАСП и РСП математичких модела. Математичким моделима описани су следећи феномени: соларно зрачење, апсорбовано соларно зрачење, соларни упадни угао, топлотни губици, топлотна снага, оптичка ефикасност, коефицијент соларног сенчења и термичка ефикасност. Резултати теоријског истраживања, уз употребу специјално развијеног прорачунског алгорита, показали су оправданост примене РтАСП соларног концепта, јер је, током анализираниог периода, просечна дневна теоријска специфична топлотна снага РтАСП за 7,96-19,78% била већа од просечне дневне теоријске специфичне топлотне снаге РСП.

Иако *EnergyPlus* софтверски пакет налази велику примену приликом енергетског билансирања зграда, његове могућности су (до сада биле) лимитиране на нумеричко симулирање (само) фиксних соларних уређаја. Превазилажење наведених софтверских ограничења, вештачким (методом корак по корак) креирањем услова за испитивање покретних соларних пријемника, представља још један научни и инжењерски допринос ове докторске дисертације. Применом новог симулационог приступа на истраживање термичких перформанси соларних пријемника са једноосним праћењем кретања положаја Сунца, дошло се до резултата који су показали да релативно закретање равних апсорберских површина по једној оси нуди компромисно решење између фиксних соларних пријемника (са једне стране) и соларних пријемника са апсолутним једноосним праћењем кретања положаја Сунца (са друге стране).

Поред програма *EnergyPlus*, у теоријској фази истраживања термичких перформанси РтАСП и РСП, коришћени су *Ansys Fluent* софтверски пакет и *SLR* метода.

Ansys Fluent, за разлику од *EnergyPlus*, нуди могућности анализирања карактеристичних температурних поља, поља апсорбованог соларног зрачења и ефеката соларног сенчења, за различите положаје било ког соларног пријемника, како фиксних, тако и покретних.

У овом случају, *SLR* метода (врло једноставна и практична) коришћена је да би се направила линеарна функционална зависност између РтАСП и РСП топлотних снага (жељени излаз) и интензитета долазног соларног зрачења на хоризонталну површину (улазна варијабла).

У експерименталној фази истраживања термичких перформанси РтАСП и РСП, измерене су вредности масених протока и карактеристичних температура воде (на улазу и излазу). Након тога, прорачунски је приступљено одређивању РтАСП и РСП просечних дневних експерименталних специфичних топлотних снага, уз одређивање њихове термичке ефикасности. Као и у свим претходним (теоријским) случајевима, током свих мерних дана, РтАСП имао је већу просечну дневну експерименталну специфичну топлотну снагу од РСП (8,07-22,59%) и термичку ефикасност (8,48-22,83%).

Мултидисциплинарна верификација резултата, на крају докторске дисертације, показала је слагање математичког модела, како са *Ansys Fluent* и *SLR* резултатима, тако и са експерименталним мерењима, јер су просечна дневна апсолутна одступања, за све анализирани дане, била у прихватљивим границама (<10%).

За разлику од покретних и концентришућих соларних пријемника, РтАСП одликује већа компактност (мања површинска и запреминска заузетост), јер не захтева употребу додатних рефлектујућих и концентришућих елемената (нити фиксних, нити покретних). За разлику од фиксних соларних пријемника, РтАСП одликује већа топлотна снага и термичка ефикасност, јер поседује механизам за праћење кретања положаја Сунца.

Због наведених предности над фиксним, концентришућим и покретним соларним пријемницима, конструкција РтАСП је у комерцијалном смислу погодна за ширу практичну примену. Даљим усавршавањем конструкције РтАСП, бенефити њеног коришћења дошли би још више до изражаја.

У том смислу, будућа (теоријска и експериментална) истраживања могла би бити усмерена на дизајн следећих позиција: ламела, стаклених цеви, гумених заптивки, разделника и сабирника, односно обртних спојница. Употребом вакуумских технологија и изолационих материјала унутар РтА (међупростор стаклене цеви и ламеле, са њене доње стране) [223], такође се могу очекивати бољи показатељи термичких перформанси РтАСП. Позитивни ефекти могу се остварити унапређењем једноосног механизма за праћење кретања положаја Сунца. Максимизирање РтАСП топлотне снаге било би могуће имплементирањем апсолутног, односно комбинованог (релативног по једној оси и апсолутног по другој оси) двоосног механизма за праћење кретања положаја Сунца, али на рачун редуковања габаритних предности. Исти, или слични, ефекти били би могући и евентуалном применом допунских рефлектора, концентратора и огледала, како фиксних, тако и покретних.

ПОГЛАВЉЕ

IX

Литература

- [1] <https://ourworldindata.org/> (приступљено: 1. 4. 2023. год.).
- [2] <https://www.iea.org/> (приступљено: 5. 4. 2023. год.).
- [3] <https://www.worldbank.org/> (приступљено: 9. 4. 2023. год.).
- [4] <https://www.eea.europa.eu/> (приступљено: 14. 4. 2023. год.).
- [5] Лукић, Н., Бабић, М., **Соларна енергија – Монографија**, Машински факултет Унивезитета у Крагујевцу, Крагујевац (Србија), 2008.
- [6] Павловић, С., **Истраживање оптималних параметара соларних параболичних концентришућих пријемника топлоте са аспекта примене у системима полигенерације**, Докторска дисертација, Универзитет у Нишу, Ниш (Србија), 2017.
- [7] <https://www.irena.org/> (приступљено: 1. 4. 2023. год.).
- [8] <https://www.stat.gov.rs/> (приступљено: 25. 3. 2023. год.).
- [9] Pavlović, T., et al., **Possibility of electricity generation using PV solar plants in Serbia**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 20, No. -, 2013, pp. 201-218.
- [10] Djurdjevic, D. Z., **Perspectives and assessments of solar PV power engineering in the Republic of Serbia**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, No. 5, 2011, pp. 2431-2446.
- [11] Jovanović, D., Nešović, A., **Optimal orientation of the gable roofs covered with photovoltaic panels – Case study Kragujevac**, Tehnika, Vol. 72, No. 3, 2023, pp. 319-323.
- [12] <https://www.nrel.gov/> (приступљено: 20. 4. 2023. год.).
- [13] Despotović, M., **Obnovljivi izvori energije**, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Kragujevac (Srbija), 2011.
- [14] Rabl, A., **Active solar collectors and their applications – First edition**, Oxford University Press, New York (USA), 1985.
- [15] Stine, W. B., Harrigan, R. W., **Solar energy fundamentals and design: With computer applications**, Wiley-Interscience, New York (USA), 1985.

- [16] <https://www.industrija.rs/> (приступљено: 21. 4. 2023. год.).
- [17] <https://www.archdaily.com/> (приступљено: 21. 4. 2023. год.).
- [18] <https://centrometal.de/> (приступљено: 21. 4. 2023. год.).
- [19] <https://www.lightinus.com/> (приступљено: 21. 4. 2023. год.).
- [20] <https://www.northburnsolar.co.uk/> (приступљено: 21. 4. 2023. год.).
- [21] Ghaderian, J., et al., **Performance of copper oxide/distilled water nanofluid in evacuated tube solar collector (ETSC) water heater with internal coil under thermosyphon system circulations**, Applied Thermal Engineering, Vol. 121, No. -, 2017, pp. 520-536.
- [22] Bhalla, V., Tyagi, H., **Parameters influencing the performance of nanoparticles-laden fluid-based solar thermal collectors: a review on optical properties**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 84, No. -, 2018, pp. 12-42.
- [23] Sardeshpande, V., Pillai, I. R., **Effect of micro-level and macro-level factors on adoption potential of solar concentrators for medium temperature thermal applications**, Energy for Sustainable Development, Vol. 16, No. 2, 2012, pp. 216-223.
- [24] Sahin, A. Z., et al., **Performance enhancement of solar energy systems using nanofluids: An updated review**, Renewable Energy, Vol. 145, No. -, 2020, pp. 1126-1148.
- [25] Kumar, L., et al., **Global advancement of solar thermal energy technologies for industrial process heat and its future prospects: A review**, Energy Conversion and Management, Vol. 195, No. -, 2019, pp. 885-908.
- [26] Selvakumar, N., Barshilia, H. C., **Review of physical vapor deposited (PVD) spectrally selective coatings for mid-and high-temperature solar thermal applications**, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 98, No. -, 2012, pp. 1-23.
- [27] Ogunmodimu, O., Okoroigwe, E. C., **Concentrating solar power technologies for solar thermal grid electricity in Nigeria: A review**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 90, No. -, 2018, pp. 104-119.
- [28] Evangelisti, L., et al., **Latest advances on solar thermal collectors: A comprehensive review**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 114, No. -, 2019, pp. 109318.
- [29] Lazzarin, R. M., Noro, M., **Past, present, future of solar cooling: Technical and economical considerations**, Solar Energy, Vol. 172, No. -, 2018, pp. 2-13.
- [30] Sabiha, M. A., et al., **Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 51, No. -, 2015, pp. 1038-1054.
- [31] Ghritlahre, H. K., Prasad, R. K., **Application of ANN technique to predict the performance of solar collector systems-A review**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 84, No. -, 2018, pp. 75-88.
- [32] Zayed, M. E., et al., **Applications of cascaded phase change materials in solar water collector storage tanks: A review**, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 199, No. -, 2019, pp. 24-49.
- [33] Suman, S., et al., **Performance enhancement of solar collectors—A review**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 49, No. -, 2015, pp. 192-210.
- [34] Gorjian, S., et al., **A review on recent advancements in performance enhancement techniques for low-temperature solar collectors**, Energy Conversion and Management, Vol. 222, No. -, 2020, pp. 113246.
- [35] Saxena, G., Gaur, M. K., **Exergy analysis of evacuated tube solar collectors: a review**, International Journal of Exergy, Vol. 25, No. 1, 2018, pp. 54-74.

- [36] *Alam, T., et al.*, **Performance augmentation of the flat plate solar thermal collector: A review**, *Energies*, Vol. 14, No. 19, 2021, pp. 6203.
- [37] *Kumar, A., et al.*, **An up-to-date review on evacuated tube solar collectors**, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 145, No. -, 2021, pp. 2873-2889.
- [38] *Jamil, M. M., et al.*, **Thermal performance of thermosyphon evacuated tube solar collector using TiO₂/water nanofluid**, *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, Vol. 20, No. 1, 2016, pp. 12-29.
- [39] *El Gharbi, N., et al.*, **A comparative study between parabolic trough collector and linear Fresnel reflector technologies**, *Energy Procedia*, Vol. 6, No. -, 2011, pp. 565-572.
- [40] *Hafez, A. Z., et al.*, **Solar tracking systems: Technologies and trackers drive types—A review**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 91, No. -, 2018, pp. 754-782.
- [41] *Awasthi, A., et al.*, **Review on sun tracking technology in solar PV system**, *Energy Reports*, Vol. 6, No. -, 2020, pp. 392-405.
- [42] *Gutierrez, S., et al.*, **Development and testing of a single-axis photovoltaic sun tracker through the Internet of Things**, *Energies*, Vol. 13, No. 10, 2020, pp. 2547.
- [43] <https://images.squarespace-cdn.com/> (приступљено: 20. 5. 2023. год.).
- [44] *Pavlović, T. M., Čabrić, B. D.*, **Solarna energetika**, Filozofski fakultet Univerziteta u Nišu, Niš (Srbija), 1994.
- [45] *Harris, N., et al.*, **Solar energy systems design**, John Wiley, New York (USA), 1985.
- [46] *Sopian, K., et al.*, **Thermal performance of thermoplastic natural rubber solar collector**, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 123, No. 1, 2002, pp. 179-184.
- [47] *García, J. L., et al.*, **Profitability of a solar water heating system with evacuated tube collector in the meat industry**, *Renewable Energy*, Vol. 131, No. -, 2019, pp. 966-976.
- [48] *Hauner, M., et al.*, **Use and applications of solar heat in the malting and brewing industry—A review**, *Monatsschrift für Brauwissenschaft*, Vol. 73, No. -, 2020, pp. 6-17.
- [49] *Gudeta, M. S., et al.*, **Performance analysis of solar water heater system with heat pipe evacuated tube collector on Moha soft drink industries in Ethiopia**, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 36, No. -, 2022, pp. 102211.
- [50] *Pavlović, T. M., Čabrić, B. D.*, **Fizika i tehnika solarne energetike**, Građevinska knjiga, Beograd (Srbija), 1999.
- [51] <http://andyschroder.com/> (приступљено: 11. 4. 2023. год.).
- [52] *Xu, R. J., et al.*, **Numerical and experimental investigation of a compound parabolic concentrator-capillary tube solar collector**, *Energy Conversion and Management*, Vol. 204, No. -, 2020, pp. 112218.
- [53] *Korres, D. N., et al.*, **Integration of a linear cavity receiver in an asymmetric compound parabolic collector**, *Energies*, Vol. 15, No. 22, 2022, pp. 8635.
- [54] *Patel, D. K., et al.*, **A review on compound parabolic solar concentrator for sustainable development**, *International Journal of Ambient Energy*, Vol. 39, No. 5, 2018, pp. 533-546.
- [55] <https://www.dlr.de/> (приступљено: 5. 4. 2023. год.).
- [56] *Jebasingh, V. K., Joselin Herbert, G. M.*, **A review of solar parabolic trough collector**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 54, No. -, 2016, pp. 1085-1091.

- [57] *Yaghoubi, M., et al.*, **Analysis of heat losses of absorber tubes of parabolic trough collector of Shiraz (Iran) solar power plant**, Journal of Clean Energy Technologies, Vol. 1, No. 1, 2013, pp. 33-37.
- [58] <https://pixels.com/> (приступљено: 8. 4. 2023. год.).
- [59] *Bellos, E.*, **Progress in the design and the applications of linear Fresnel reflectors—A critical review**, Thermal Science and Engineering Progress, Vol. 10, No. -, 2019, pp. 112-137.
- [60] *Pelece, I., Shipkovs, P.*, **Theoretical and experimental investigations of cylindrical air-heating solar collector**, Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, Vol. 53, No. 3, 2016, pp. 11-21.
- [61] *Wang, Q., et al.*, **A review of applications of plasmonic and conventional nanofluids in solar heat collection**, Applied Thermal Engineering, Vol. 219, No. -, 2022, pp. 119476.
- [62] <https://www.istockphoto.com/> (приступљено: 15. 4. 2023. год.).
- [63] *Bojić, M.*, **Termodinamika**, Mašinski fakultet Univerziteta u Kragujevcu, Kragujevac (Srbija), 2011.
- [64] <https://www.renewableenergyworld.com/> (приступљено: 17. 4. 2023. год.).
- [65] <https://www.bhphotovideo.com/> (приступљено: 18. 4. 2023. год.).
- [66] *Lalović, B.*, **Nasušno sunce**, Nolit, Beograd (Srbija), 1982.
- [67] *Kreider, J. F.*, **Medium and high temperature solar processes**, Academic Press, New York (USA), 1979.
- [68] *Baccoli, R., et al.*, **A mathematical model of a solar collector augmented by a flat plate above reflector: Optimum inclination of collector and reflector**, Energy Procedia, Vol. 81, No. -, 2015, pp. 205-214.
- [69] *Baccoli, R., et al.*, **A comprehensive optimization model for flat solar collector coupled with a flat booster bottom reflector based on an exact finite length simulation model**, Energy Conversion and Management, Vol. 164, No. -, 2018, pp. 482-507.
- [70] *Chiam, H. F.*, **Planar concentrators for flat-plate solar collectors**, Solar Energy, Vol. 26, No. 6, 1981, pp. 503-509.
- [71] *Larson, D. C.*, **Mirror enclosures for double-exposure solar collectors**, Solar Energy, Vol. 23, No. 6, 1979, pp. 517-524.
- [72] *Nikolić, N., Lukić, N.*, **A mathematical model for determining the optimal reflector position of a double exposure flat-plate solar collector**, Renewable Energy, Vol. 51, No. -, 2013, pp. 292-301.
- [73] *Maia, C. B., et al.*, **Evaluation of a tracking flat-plate solar collector in Brazil**, Applied Thermal Engineering, Vol. 73, No. 1, 2014, pp. 953-962.
- [74] *Neville, R. C.*, **Solar energy collector orientation and tracking mode**, Solar Energy, Vol. 20, No. 1, 1978, pp. 7-11.
- [75] *Drago, P.*, **A simulated comparison of the useful energy gain in a fixed and a fully tracking flat plate collector**, Solar Energy International Progress, Cairo (Egypt), June 16-22, 1978.
- [76] *Attalage, R. A., Reddy, T. A.*, **Annual collectible energy of a two-axis tracking flat-plate solar collector**, Solar Energy, Vol. 48, No. 3, 1992, pp. 151-155.
- [77] *Safwat, H. H., Souka, A. F.*, **Design of a new solar-heated house using double-exposure flat-plate collectors**, Solar Energy, Vol. 13, No. 1, 1970, pp. 105-119.

- [78] *Qiu, G., et al.*, **Comparative study on solar flat-plate collectors coupled with three types of reflectors not requiring solar tracking for space heating**, *Renewable Energy*, Vol. 169, No. -, 2021, pp. 104-116.
- [79] *Bhowmik, H., Amin, R.*, **Efficiency improvement of flat plate solar collector using reflector**, *Energy Reports*, Vol. 3, No. -, 2017, pp. 119-123.
- [80] *Ramesh, C., et al.*, **Performance enhancement of selective layer coated on solar absorber panel with reflector for water heater by response surface method: A case study**, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 36, No. -, 2022, pp. 102093.
- [81] *El Hadji, I. C., et al.*, **Experimental investigation of solar chimney with concentrated collector (SCCC)**, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 35, No. -, 2022, pp. 101965.
- [82] *Rachedi, M. Y., et al.*, **A novel model for optimizing tilts of four reflectors on a flat plate thermal collector: Case study in Ouargla region**, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 32, No. -, 2022, pp. 101872.
- [83] *Nikolić, N., Lukić, N.*, **Theoretical and experimental investigation of the thermal performance of a double exposure flat-plate solar collector**, *Solar Energy*, Vol. 119, No. -, 2015, pp. 100-113.
- [84] *Abd, H. M., et al.*, **Experimental study of compound parabolic concentrator with flat plate receiver**, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 166, No. -, 2020, pp. 114678.
- [85] *Mao, C., et al.*, **Mathematical model development and optimal design of the horizontal all-glass evacuated tube solar collectors integrated with bottom mirror reflectors for solar energy harvesting**, *Applied Energy*, Vol. 238, No. -, 2019, pp. 54-68.
- [86] *Chai, S., et al.*, **Heat transfer analysis and thermal performance investigation on an evacuated tube solar collector with inner concentrating by reflective coating**, *Solar Energy*, Vol. 220, No. -, 2021, pp. 175-186.
- [87] *Chen, F., et al.*, **Comparative investigation on photo-thermal performance of both compound parabolic concentrator and ordinary all-glass evacuated tube absorbers: An incorporated experimental and theoretical study**, *Solar Energy*, Vol. 184, No. -, 2019, pp. 539-552.
- [88] *Naik, B. K., et al.*, **Experimental investigation and numerical modelling on the performance assessments of evacuated U–Tube solar collector systems**, *Renewable Energy*, Vol. 134, No. -, 2019, pp. 1344-1361.
- [89] *Korres, D. N., et al.*, **Experimental, numerical and analytical investigation of a U-type evacuated tube collectors' array**, *Renewable Energy*, Vol. 135, No. -, 2019, pp. 218-231.
- [90] *Elarem, R., et al.*, **Numerical study of an Evacuated Tube Solar Collector incorporating a Nano-PCM as a latent heat storage system**, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 24, No. -, 2021, pp. 100859.
- [91] *Aggarwal, S., et al.*, **Computational fluid dynamics based analysis for optimization of various thermal enhancement techniques used in evacuated tubes solar collectors: A review**, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 46, No. -, 2021, pp. 8700-8707.
- [92] *Chen, X., et al.*, **Combining horizontal evacuated tubes with booster mirror reflector to achieve seasonal reverse output: Technical and experimental investigation**, *Renewable Energy*, Vol. 188, No. -, 2022, pp. 450-464.
- [93] *Tang, R., et al.*, **Optimal tilt-angles of all-glass evacuated tube solar collectors**, *Energy*, Vol. 34, No. 9, 2009, pp. 1387-1395.

- [94] *Abo-Elfadl, S., et al.*, **Energy and exergy assessment of integrating reflectors on thermal energy storage of evacuated tube solar collector-heat pipe system**, *Solar Energy*, Vol. 209, No. -, 2020, pp. 470-484.
- [95] *Sadeghi, G., et al.*, **On the effect of storage tank type on the performance of evacuated tube solar collectors: Solar radiation prediction analysis and case study**, *Energy*, Vol. 198, No. -, 2020, pp. 117331.
- [96] *Martínez-García, A., et al.*, **Assessment of a pilot solar V-trough reactor for solar water disinfection**, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 399, No. -, 2020, pp. 125719.
- [97] *Duff, W. S., et al.*, **Performance of the Sacramento demonstration ICPC collector and double effect chiller**, *Solar Energy*, Vol. 76, No. 1-3, 2004, pp. 175-180.
- [98] *Yuan, Y., et al.*, **Experimental and analytical optical-thermal performance of evacuated cylindrical tube receiver for solar dish collector**, *Energy*, Vol. 234, No. -, 2021, pp. 121301.
- [99] *Mori, Y., et al.*, **Fundamental research on heat transfer performances of solar focusing and tracking collector**, *Solar Energy*, Vol. 19, No. 5, 1977, pp. 595-600.
- [100] *Crema, L., et al.*, **Novel system for distributed energy generation from a small scale concentrated solar power**, *Energy Procedia*, Vol. 57, No. -, 2014, pp. 447-456.
- [101] *Mosleh, H. J., et al.*, **A new desalination system using a combination of heat pipe, evacuated tube and parabolic trough collector**, *Energy Conversion and Management*, Vol. 99, No. -, 2015, pp. 141-150.
- [102] *Olczak, P., Olek, M.*, **The influence of evacuated-tube collector assembly on heat loss in tracking solar system with parabolic mirror reflectors**, *Procedia Engineering*, Vol. 157, No. -, 2016, pp. 317-324.
- [103] *Gibart, C.*, **Study of and tests on a hybrid photovoltaic-thermal collector using concentrated sunlight**, *Solar Cells*, Vol. 4, No. 1, 1981, pp. 71-89.
- [104] *Li, Q., et al.*, **Design and analysis of a medium-temperature, concentrated solar thermal collector for air-conditioning applications**, *Applied Energy*, Vol. 190, No. -, 2017, pp. 1159-1173.
- [105] *Li, Q., et al.*, **Experimental and numerical investigation of volumetric versus surface solar absorbers for a concentrated solar thermal collector**, *Solar Energy*, Vol. 136, No. -, 2016, pp. 349-364.
- [106] *Li, Q., et al.*, **Techno-economic analysis of a concentrating solar collector with built-in shell and tube latent heat thermal energy storage**, *Energy*, Vol. 121, No. -, 2017, pp. 220-237.
- [107] *Grossman, G., Fruchter, E.*, **Development of a spherical reflector/tracking absorber solar energy collector**, *Israel Journal of Technology*, Vol. 17, No. 1, 1979, pp. 5-11.
- [108] *Fuiter, E., Grossman, G.*, **An experimental investigation of a stationary reflector/tracking absorber solar collector at intermediate temperature**, *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 104, No. 4, 1982, pp. -.
- [109] *Grossman, G., et al.*, **A spherical concentrating solar collector using liquid metals for intermediate temperatures**, *International Solar Energy Society Congress*, Montreal (Canada), June 23-29, 1985.
- [110] *Cohen, S., Grossman, G.*, **Development of a solar collector with a stationary spherical reflector/tracking absorber for industrial process heat**, *Solar Energy*, Vol. 128, No. -, 2016, pp. 31-40.

- [111] *Nešović, A., et al.*, **Novel flat-plate solar collector with an inclined NS axis and relative EW tracking absorbers and the numerical analysis of its potentials**, Thermal Science, Vol. -, No. -, 2023, pp. -, Doi: 10.2298/TSCI230201115N.
- [112] *Toapanta, L. F., et al.*, **CFD Analysis of a solar flat plate collector with different cross sections**, Enfoque Ute, Vol. 11, No. 2, 2020, pp. 95-108.
- [113] *Ekrastian, E., et al.*, **Numerical analysis of heat transfer performance of flat plate solar collectors**, Journal of Fluid Flow, Heat and Mass Transfer, Vol. 1, No. -, 2014, pp. 38-42.
- [114] *Nešović, A., et al.*, **Heat losses of the aluminum flat absorber plate as a function of the vector wind characteristics – numerical analysis**, International Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications, East Sarajevo – Jahorina (Republika Srpska), November 17-19, 2022.
- [115] Martinopoulos, G., et al., Identification of the environmental impact from the use of different materials in domestic solar hot water systems, Applied Energy, Vol. 102, No. -, 2013, pp. 545-555.
- [116] *Francis, M. V., et al.*, **Energy Systems Engineering: Evaluation and Implementation**, McGraw-Hill Publishing, New York (USA), 2008.
- [117] *Ekechukwu, O. V., Norton, B.*, **Review of solar-energy drying systems III: low temperature air-heating solar collectors for crop drying applications**, Energy Conversion and Management, Vol. 40, No. 6, 1999, pp. 657-667.
- [118] *Shakhashiri, B. Z.*, **Chemical demonstrations: A handbook for teachers of chemistry**, University of Wisconsin Press, Madison (USA), 1985.
- [119] *Wazwaz, A., et al.*, **Solar thermal performance of a nickel-pigmented aluminium oxide selective absorber**, Renewable Energy, Vol. 27, No. 2, 2002, pp. 277-292.
- [120] *Wazwaz, A., et al.*, **The effects of nickel-pigmented aluminium oxide selective coating over aluminium alloy on the optical properties and thermal efficiency of the selective absorber prepared by alternate and reverse periodic plating technique**, Energy Conversion and Management, Vol. 51, No. 8, 2010, pp. 1679-1683.
- [121] *Li, Z., et al.*, **Aqueous solution-chemical derived Ni–Al₂O₃ solar selective absorbing coatings**, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 105, No. -, 2012, pp. 90-95.
- [122] *Xue, Y., et al.*, **Spectral properties and thermal stability of solar selective absorbing AlNi–Al₂O₃ cermet coating**, Solar Energy, Vol. 96, No. -, 2013, pp. 113-118.
- [123] *Teixeira, V., et al.*, **Spectrally selective composite coatings of Cr–Cr₂O₃ and Mo–Al₂O₃ for solar energy applications**, Thin Solid Films, Vol. 392, No. 2, 2001, pp. 320-326.
- [124] *Xinkang, D., et al.*, **Microstructure and spectral selectivity of Mo–Al₂O₃ solar selective absorbing coatings after annealing**, Thin Solid Films, Vol. 516, No. 12, 2008, pp. 3971-3977.
- [125] *Antonaia, A., et al.*, **Stability of W-Al₂O₃ cermet based solar coating for receiver tube operating at high temperature**, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 94, No. 10, 2010, pp. 1604-1611.
- [126] *Ding, D., et al.*, **Optical, structural and thermal characteristics of Cu–CuAl₂O₄ hybrids deposited in anodic aluminum oxide as selective solar absorber**, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 94, No. 10, 2010, pp. 1578-1581.

- [127] *Nuru, Z. Y., et al.*, **Pt–Al₂O₃ nanocoatings for high temperature concentrated solar thermal power applications**, *Physica B: Condensed Matter*, Vol. 407, No. 10, 2012, pp. 1634-1637.
- [128] *Barshilia, H. C., et al.*, **Structure and optical properties of Ag–Al₂O₃ nanocermet solar selective coatings prepared using unbalanced magnetron sputtering**, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 95, No. 7, 2011, pp. 1707-1715.
- [129] *Chorchong, T., et al.*, **Characterization and spectral selectivity of Sn-Al₂O₃ solar absorber**, *Key Engineering Materials*, Vol. 675, No. -, 2016, pp. 467-472.
- [130] *Wamae, W., et al.*, **Influence of tin content on spectral selectivity and thermal conductivity of Sn–Al₂O₃ solar selective absorber**, *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 7, No. -, 2018, pp. 1-8.
- [131] *Wamae, W., et al.*, **Thermal Efficiency of a new prototype of evacuated tube collector using Sn-Al₂O₃ as a selective solar absorber**, *Walailak Journal of Science and Technology*, Vol. 15, No. 11, 2018, pp. 793-802.
- [132] <https://www.flir.com/> (приступљено: 5. 2. 2023. год.).
- [133] <https://rgf.bg.ac.rs/> (приступљено: 10. 3. 2023. год.).
- [134] *Yang, D., et al.*, **Enhanced thermal stability of solar selective absorber based on nano-multilayered AlCrSiO films**, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 207, No. -, 2020, pp. 110331.
- [135] *Atchuta, S. R., et al.*, **Selective properties of high-temperature stable spinel absorber coatings for concentrated solar thermal application**, *Solar Energy*, Vol. 199, No. -, 2020, pp. 453-459.
- [136] *Joly, M., et al.*, **Novel black selective coating for tubular solar absorbers based on a sol–gel method**, *Solar Energy*, Vol. 94, No. -, 2013, pp. 233-239.
- [137] <http://www.medicinskaopremabeograd.com/> (приступљено: 14. 2. 2023. год.).
- [138] *Nešović, A., et al.*, **Experimental analysis of the fixed flat-plate solar collector with Sn-Al₂O₃ selective absorber and gravity water flow**, *Thermal Science*, Vol. 27, No. 1-A, 2023, pp. 349-358.
- [139] <https://cdn.automationdirect.com/> (приступљено: 23. 2. 2023. год.).
- [140] <http://www.sah.rs/> (приступљено: 12. 3. 2023. год.).
- [141] <http://sunce.5deg.com/> (приступљено: 21. 3. 2021. год.).
- [142] *Sellers, W. D.*, **Physical climatology**, University of Chicago Press, Chicago (USA), 1965.
- [143] *Nešović, A.*, **Comparison of theoretical and isotropic models of incoming solar radiation for the tilted, fixed, flat-plate solar collector south oriented**, *Tehnika*, Vol. 72, No. 5, 2022, pp. 553-558.
- [144] *Prescott, J.*, **Evaporation from a water surface in relation to solar radiation**, *Transactions of the Royal Society of South Australia*, Vol. 46, No. -, 1940, pp. 114-118.
- [145] *Gopinathan, K. K.*, **A general formula for computing the coefficients of the correlation connecting global solar radiation to sunshine duration**, *Solar Energy*, Vol. 41, No. 6, 1988, pp. 499-502.
- [146] *Collares-Pereira, M., Rabl, A.*, **The average distribution of solar radiation-correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values**, *Solar Energy*, Vol. 22, No. 2, 1979, pp. 155-164.

- [147] *Suehrcke, H., McCormick, P. G.*, **The distribution of average instantaneous terrestrial solar radiation over the day**, *Solar Energy*, Vol. 42, No. 4, 1989, pp. 303-309.
- [148] *Liu, B. Y. H., Jordan, R. C.*, **The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation**, *Solar Energy*, Vol. 4, No. 3, 1960, pp. 1-19.
- [149] *Nešović, A., et al.*, **Theoretical and numerical analysis of the fixed flat-plate solar collector with Sn-Al₂O₃ selective absorber and gravity water flow**, *Thermal Science*, Vol. -, No. -, 2023, pp. -, Doi: 10.2298/TSCI230225100N.
- [150] *Николић, Н.*, **Истраживање двоструко-озраченог, равног, соларног пријемника са равном рефлектујућом површином**, Докторска дисертација, Универзитет у Крагујевцу, Крагујевац (Србија), 2014.
- [151] *Shah, L. J., Furbo, S.*, **Vertical evacuated tubular-collectors utilizing solar radiation from all directions**, *Applied Energy*, Vol. 78, No. 4, 2004, pp. 371-395.
- [152] *Ndiaye, D.*, **Simplified model for dynamic simulation of solar systems with evacuated tube collector**, *Procedia Engineering*, Vol. 118, No. -, 2015, pp. 1250-1257.
- [153] *Kalogirou, S. A.*, **Solar energy engineering – Processes and Systems**, Academic Press, Cambridge (USA), 2013.
- [154] *Jiang, Y., et al.*, **Dynamic performance modeling and operation strategies for a v-corrugated flat-plate solar collector with movable cover plate**, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 197, No. -, 2021, pp. 117374.
- [155] *Nešović, A.*, **Theoretical model of solar incident angle for an optionally oriented fixed flat surface**, *Tehnika*, Vol. 72, No. 3, 2022, pp. 328-333.
- [156] *Widén, J., Munkhammar, J.*, **Solar radiation theory**, Department of Engineering Sciences University of Uppsala, Uppsala (Sweden), 2019.
- [157] *Казанова, Г.*, **Векторная алгебра**, Мир, Москва (Россия), 1979.
- [158] *Свијановић, М.*, **Математичке методе у техници I – Sveska 4 – Vektorska algebra i analitička geometrija**, Fakultet tehničkih nauka Univeziteta u Novom Sadu, Novi Sad (Србија), 1983.
- [159] *Sayigh, A. A. M., et al.*, **Energy Conservation in Buildings: The Achievement of 50% Energy Saving: An Environmental Challenge**, Pergamon Press, Oxford (UK), 2012.
- [160] *Chong, K. K., Wong, C. W.*, **Solar collectors and panels, Part 13: General formula for on-axis sun-tracking system**, Universiti Tunku Abdul Rahman, Kampar (Malaysia), 2010.
- [161] *Kalogirou, S. A.*, **Solar thermal collectors and applications**, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vo. 30, No. 3, 2004, pp. 231-295.
- [162] *Wang, D., et al.*, **Thermal performance analysis of large-scale flat plate solar collectors and regional applicability in China**, *Energy*, Vol. 238, No. -, 2022, pp. 121931.
- [163] *Бабић, М., Стојковић, С.*, **Турбомашине – Теорија и математичко моделирање**, Машински факултет Унивезитета у Крагујевцу, Крагујевац (Србија), 1997.
- [164] *Ali, S. H., et al.*, **Energetic and exegetic performance analysis of flat plate solar collector under variables heat transfer coefficient and inlet water temperature**, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 28, No. -, 2021, pp. 101700.
- [165] *Hollands, K. G. T., et al.*, **Free convective heat transfer across inclined air layers**, *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 98, No. 2, 1976, pp. 189-193.
- [166] *Huang, X., et al.*, **Theoretical and experimental studies of impacts of heat shields on heat pipe evacuated tube solar collector**, *Renewable Energy*, Vol. 138, No. -, 2019, pp. 999-1009.

- [167] *Rajput, R. K.*, **Engineering thermodynamics**, Jones & Bartlett Learning, Burlington (USA), 2009.
- [168] *Kumar, A., et al.*, **A comprehensive review analysis on advances of evacuated tube solar collector using nanofluids and PCM**, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol. 47, No. -, 2021, pp. 1014-17.
- [169] *Nokhosteen, A., Sobhansarbandi, S.*, **Novel method of thermal behavior prediction of evacuated tube solar collector**, Solar Energy, Vol. 204, No. -, 2020, pp. 761-768.
- [170] *Wang, Z., et al.*, **Dynamic performance of a facade-based solar loop heat pipe water heating system**, Solar Energy, Vol. 86, No. 5, 2012, pp. 1632-1647.
- [171] *Zheng, H.*, **Solar energy desalination technology, Part 2: Solar energy utilization and its collection devices**, Elsevier, Amsterdam (Netherlands), 2017.
- [172] *Killian, A. V.*, **Solar collectors: energy conservation, design, and applications**, Nova Science Publishers, New York (USA), 2009.
- [173] *Yazdanpanahi, J., et al.*, **Experimental investigation of exergy efficiency of a solar photovoltaic thermal (PVT) water collector based on exergy losses**, Solar Energy, Vol. 118, No. -, 2015, pp. 197-208.
- [174] *Chauhan, R., et al.*, **Heat transfer augmentation in solar thermal collectors using impinging air jets: A comprehensive review**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 82, No. -, 2018, pp. 3179-3190.
- [175] *Hawwash, A. A., et al.*, **Numerical investigation and experimental verification of performance enhancement of flat plate solar collector using nanofluids**, Applied Thermal Engineering, Vol. 130, No. -, 2018, pp. 363-374.
- [176] *Kim, H., et al.*, **Theoretical investigation of the efficiency of a U-tube solar collector using various nanofluids**, Energy, Vol. 94, No. 2016, pp. 497-507.
- [177] *Obrović, B., Šašić, M.*, **Hidraulika**, Naučna knjiga, Beograd (Srbija), 1985.
- [178] *Lukić, N.*, **Priručnik za termodinamiku – Gasovi i pare**, Mašinski fakultet Univerziteta u Kragujevcu, Kragujevac (Srbija), 2011.
- [179] *Wang, L.*, **Energy efficiency and management in food processing facilities**, CRC Press, Boca Raton (USA), 2009.
- [180] *Kozić, Đ. G., Obradović, A.*, **Termodinamika – Inženjerski aspekti**, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu (Srbija), 2007.
- [181] *Tian, Z., et al.*, **A quick measurement method for determining the incidence angle modifier of flat plate solar collectors using spectroradiometer**, Solar Energy, Vol. 201, No. -, 2020, pp. 746-750.
- [182] *Chen, Z., et al.*, **Efficiencies of flat plate solar collectors at different flow rates**, Energy Procedia, Vol. 30, No. -, 2012, pp. 65-72.
- [183] *Kalogirou, S. A.*, **Prediction of flat-plate collector performance parameters using artificial neural networks**, Solar Energy, Vol. 80, No. 3, 2006, pp. 248-259.
- [184] *Hellstrom, B., et al.*, **The impact of optical and thermal properties on the performance of flat plate solar collectors**, Renewable Energy, Vol. 28, No. 3, 2003, pp. 331-344.
- [185] *Rodríguez-Muñoz, J. M., et al.*, **Novel incident angle modifier model for quasi-dynamic testing of flat plate solar thermal collectors**, Solar Energy, Vol. 224, No. -, 2021, pp. 112-124.

- [186] *Hertel, J. D., et al.*, **Influence of thermal losses on the incidence angle modifier factorization approach**, *Solar Energy*, Vol. 135, No. -, 2016, pp. 50-58.
- [187] *Strobach, E., et al.*, **Effective incidence angles of sky-diffuse and ground-reflected irradiance for various incidence angle modifier types**, *Solar Energy*, Vol. 89, No. -, 2013, pp. 81-88.
- [188] *Rönnelid, M., et al.*, **On the factorisation of incidence angle modifiers for CPC collectors**, *Solar Energy*, Vol. 59, No. 4-6, 1997, pp. 281-286.
- [189] *Hertel, J. D., et al.*, **Estimation of the influence of different incidence angle modifier models on the biaxial factorization approach**, *Energy Conversion and Management*, Vol. 106, No. -, 2015, pp. 249-259.
- [190] *Boccalatte, A., et al.*, **Calculation of the incidence angle modifier of a Linear Fresnel Collector: The proposed declination and zenith angle model compared to the biaxial factored approach**, *Renewable Energy*, Vol. 185, No. -, 2022, pp. 123-138.
- [191] *Nitsas, M. T., Koronaki, I. P.*, **Experimental and theoretical performance evaluation of evacuated tube collectors under Mediterranean climate conditions**, *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 8, No. -, 2018, pp. 457-469.
- [192] *Kabeel, A. E., et al.*, **Modified mathematical model for evaluating the performance of water-in-glass evacuated tube solar collector considering tube shading effect**, *Energy*, Vol. 89, No. -, 2015, pp. 24-34.
- [193] *Chow, T. T., et al.*, **Performance evaluation of evacuated tube solar domestic hot water systems in Hong Kong**, *Energy and Buildings*, Vol. 43, No. 12, 2011, pp. 3467-3474.
- [194] *Morrison, G. L., et al.*, **Water-in-glass evacuated tube solar water heaters**, *Solar Energy*, Vol. 76, No. 1-3, 2004, pp. 135-140.
- [195] *Liu, Z., et al.*, **Novel method for measuring the heat collection rate and heat loss coefficient of water-in-glass evacuated tube solar water heaters based on artificial neural networks and support vector machine**, *Energies*, Vol. 8, No. 8, 2015, pp. 8814-8834.
- [196] *Thirugnanasambandam, M.*, **A review of solar thermal technologies**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 1, 2010, pp. 312-322.
- [197] *Shukla, A., et al.*, **A state of art review on the performance of transpired solar collector**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 6, 2012, pp. 3975-3985.
- [198] <https://energyplus.net/> (приступљено: 16. 4. 2023. год.).
- [199] ***, Development Team, EnergyPlus Engineering Documentation, 2012.
- [200] *Cvetković, D., et al.*, **Impact of people's behavior on the energy sustainability of the residential sector in emergency situations caused by COVID-19**, *Energy and buildings*, Vol. 230, No. -, 2021, pp. 110532.
- [201] *Chen, Y., et al.*, **Experimental and simulation study on the performance of daylighting in an industrial building and its energy saving potential**, *Energy and Buildings*, Vol. 73, No. -, 2014, pp. 184-191.
- [202] *Radojević, A., et al.*, **Energy Efficiency in the Public Buildings Sector in the Territory of the City of Kragujevac—Case Study of “Milutin and Draginja Todorović” Elementary School**, *International Conference on Renewable Electrical Power Sources*, Belgrade (Serbia), October 17-18, 2020.
- [203] *Boyano, A., et al.*, **Energy demands and potential savings in European office buildings: Case studies based on EnergyPlus simulations**, *Energy and Buildings*, Vol. 65, No. -, 2013, pp. 19-28.

- [204] *Jurišević, N., et al.*, **Energy performance of relatively small sports halls used as public warming shelters**, Thermal Science, Vol. -, No. -, 2023, pp. -, Doi: 10.1007/s12273-023-161-x.
- [205] *Musharavati, F.*, **Transient simulation of a solar-PV/battery-based electricity and cold supply for an off-grid restaurant under the climatic conditions of Doha city**, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. -, No. -, 2022, pp. 1-9, Doi: 10.1007/s10973-022-11672-2.
- [206] *Nikolić, N., et al.*, **Impact of the methods of occupancy schedule defining on people heat gains within a student dormitory**, International Congress and Exhibition on Heating, Refrigeration and Air Conditioning, December 5-7, 2018.
- [207] <https://www.sketchup.com/> (приступљено: 16. 4. 2023. год.).
- [208] <https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/> (приступљено: 16. 4. 2023. год.).
- [209] <https://www.doe2.com/> (приступљено: 16. 4. 2023. год.).
- [210] *Nešović, A.*, **Numerical analysis of the total incident solar radiation on the flat-plate solar collector with single-axis tracking – Case with inclined N-S axis and E-W tracking**, International Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications, East Sarajevo – Jahorina (Republika Srpska), November 17-19, 2022.
- [211] *Versteeg, H. K., Malalasekera, W.*, **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**, Pearson Education Limited, London (UK), 2007.
- [212] <https://www.ansys.com/> (приступљено: 16. 4. 2023. год.).
- [213] ***, Development Team, Ansys Fluent Training Material, 2012.
- [214] *Јуришевић, Н.*, **Систем за праћење и предвиђање потрошње енергије и воде у јавним зградама**, Докторска дисертација, Универзитет у Крагујевцу, Крагујевац (Србија), 2021.
- [215] <https://www.kippzonen.com/> (приступљено: 16. 8. 2021. год.).
- [216] <https://www.google.com/> (приступљено: 16. 8. 2022. год.).
- [217] <https://earth.google.com/> (приступљено: 16. 8. 2022. год.).
- [218] <https://www.afs.enea.it/> (приступљено: 21. 10. 2022. год.).
- [219] *Raonić, M.*, **Vodovod i kanalizacija u zgradama**, Croatiaknjiga, Zagreb (HR), 2003.
- [220] ***, **Правилник о енергетској ефикасности зграда Републике Србије** („Службени гласник РС“, бр. 61/2011).
- [221] *Gajić, D., et al.*, **Representative shape factors of residential houses and buildings in Bosnia and Herzegovina for determining reference energy classes**, Scientific-Professional Symposium Energy Efficiency, Banja Luka (Republika Srpska), November 3-4, 2017.
- [222] <https://www.tehnikum.edu.rs/> (приступљено: 3. 4. 2021. год.).
- [223] *Nešović, A., et al.*, **Numerical investigation of the insulation use possibility in the glass tube solar collector with flat absorber plate**, International Conference on Thermal Science and Engineering of Serbia, Niš (Serbia), October 18-21, 2022.

Биографија аутора

Александар М. Нешовић, рођен је 21. 8. 1991. године у Крагујевцу, Република Србија. ОШ „Трећи крагујевачки батаљон”, у Крагујевцу, завршио је 2006. године, са просечном оценом током школовања 5,00. Средњошколско образовање наставио је у Другој крагујевачкој гимназији – општи смер, коју је завршио 2010. године, са врло добрим успехом (4,00).

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу уписао је 2010. године. Основне академске студије, у трајању од три године, завршио је 2013. године, на смеру Енергетика и процесна техника, са просечном оценом у току студија 8,90 (осам и 90/100). Завршни рад под радним насловом: „**Оптимизација надстрешница покривених фотонапонским панелима**“, под менторством проф. др Милорада Бојића, одбранио је исте године са највишом оценом, чиме је стекао звање инжењер машинства.

Звање мастер инжењер машинства, са просечном оценом током студирања 10,00 (десет и 00/100), стекао је након две године школовања на истоименом Факултету 2015. године, и то, након одбране мастер рада (са највишом оценом) под радним насловом: „**Примена концепта енерго-еко менаџмента у прехранбеној индустрији**“, под менторством проф. др Душана Гордића.

Током трајања мастер академских студија, Александар М. Нешовић награђен је као **најбољи студент прве године мастер академских студија** (на матичном Факултету, школске 2013/2014. године) и **најбољи дипломирани студент мастер академских студија** (на матичној Катедри, школске 2014/2015. године).

Докторске академске студије, у трајању од три године, уписао је школске 2021/2022. године, такође на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу. Све предмете предвиђене наставним планом и програмом положио је са просечном оценом 10,00 (десет и 00/100).

Александар М. Нешовић, на матичном Факултету, учествовао је у извођењу наставе из следећих предмета: **Термодинамика** (БМ3500, БВИ3500-2), **Енергија и животна средина** (БМ4200, БВИ4200-2), **Инжењерски алати 1** (БМ4400), **Компјутерске симулације и оптимизација процеса** (МИИ1100-2, ММ1441), **Пројектовање рачунаром** (БУИ3500), **Грејање и климатизација** (БМ6441) и **Обновљиви извори енергије** (БМ6443).

Александар М. Нешовић учествовао је у реализацији следећих пројеката: **„Истраживање когенерационих потенцијала у комуналним и индустријским енерганама Републике Србије и могућности за ревитализацију постојећих и градњу нових когенерационих постројења“** (ИИИ42013) и **„Истраживање и развој српске куће нето-нулте енергетске потрошње“** (ТР33015).

Као аутор и коаутор, Александар М. Нешовић објавио је **преко четрдесет** радова у научно-стручним часописима и међународним и домаћим научно-стручним скуповима.

ИЗЈАВА АУТОРА О ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ја, Александар М. Нешовић, изјављујем да докторска дисертација под насловом:

„Експериментално и теоријско истраживање соларног пријемника са ротационим апсорберима“

која је одбрањена на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

представља *оригинално ауторско дело* настало као резултат *сопственог истраживачког рада*.

Овом Изјавом такође потврђујем:

- да сам *једини аутор* наведене докторске дисертације,
- да у наведеној докторској дисертацији *нисам извршио/ла повреду* ауторског нити другог права интелектуалне својине других лица,

У Крагујевцу, 14 . 08 . 2023. год.

Аутор

Александар М. Нешовић



**ИЗЈАВА АУТОРА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Ја, Александар М. Нешовић, изјављујем да су штампана и електронска верзија докторске дисертације под насловом:

„Експериментално и теоријско истраживање соларног пријемника са ротационим апсорберима“

истоветне.

У Крагујевцу, 14 . 08 . 2023. год.

Аутор

Александар М. Нешовић



ИЗЈАВА АУТОРА О ИСКОРИШЋАВАЊУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ја, Александар М. Нешовић,

дозвољавам

не дозвољавам

Универзитетској библиотеци у Крагујевцу да начини два трајна умножена примерка у електронској форми докторске дисертације под насловом:

„Експериментално и теоријско истраживање соларног пријемника са ротационим апсорберима“

и то у целини, као и да по један примерак тако умножене докторске дисертације учини трајно доступним јавности путем дигиталног репозиторијума Универзитета у Крагујевцу и централног репозиторијума надлежног Министарства, тако да припадници јавности могу начинити трајне умножене примерке у електронској форми наведене докторске дисертације путем *преузимања*.

Овом Изјавом такође

дозвољавам

не дозвољавам¹

припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од следећих *Creative Commons* лиценци:

¹ Уколико аутор изабере да не дозволи припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од *Creative Commons* лиценци, то не искључује право припадника јавности да наведену докторску дисертацију користе у складу са одредбама Закона о ауторском и сродним правима.

- 1) Ауторство
- 2) Ауторство - делити под истим условима
- ③ Ауторство - без прерада
- 4) Ауторство - некомерцијално
- 5) Ауторство - некомерцијално - делити под истим условима
- 6) Ауторство - некомерцијално - без прерада²

У Крагујевцу, 14 . 08 . 2023. год.

Аутор

Александар М. Нешовић



² Молимо ауторе који су изабрали да дозволе припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од *Creative Commons* лиценци да заокруже једну од понуђених лиценци. Детаљан садржај наведених лиценци доступан је на: <http://creativecommons.org/rs/>