

Подаци о техничком решењу

Врста техничког решења
М82 – Ново техничко решење примењено на националном нивоу
Аутори техничког решења
1. Маст. инж. маш. Александар Нешовић, истраживач-сарадник¹ 2. Др Небојша Лукић, редовни професор¹ 3. Др Драган Тарановић, ванредни професор (у пензији)¹ 4. Др Драган Цветковић, научни сарадник² 5. Др Небојша Јуришевић, научни сарадник¹ 6. Др Душан Гордић, редовни професор, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац¹; 7. Др Младен Јосијевић, доцент, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац¹.
¹ Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац
² Институт за информационе технологије Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац
Назив техничког решења
Експериментална инсталација за испитивање фиксних соларних пријемника са отвореним циркулационим кругом и концепт фиксног равнoг застакљеног соларног пријемника са $SnAl_2O_3$ селективним апсорбером и гравитационим протицањем воде
Кључне речи
Соларна инсталација, фиксни равни застакљени соларни пријемник, топлотна снага, термичка ефикасност, отворени циркулациони круг, гравитационо протицање
Наручилац техничког решења
Ово техничко решење је проистекло из рада на пројекту Истраживања и развој српске куће нето-нулте енергетске потрошње (шифта: ТР33015) Израђено за потребе ЕИП доо Крагујевац , 34000 Крагујевац, Србија
Корисник техничког решења
ЕИП доо Крагујевац , 34000 Крагујевац, Србија
Година израде техничког решења
2021. година
Година када је почело да се примењује техничко решење
2023. година
Верификација резултата
М23 1. <i>Nešović, A., et al., EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE FLAT-PLATE SOLAR COLLECTOR WITH SN-AL2O3 SELECTIVE ABSORBER AND GRAVITY WATER FLOW</i>, Thermal Science, Vol. 27, No. 1A, pp. 349-358, ISSN: 0354-9836, Doi: 10.2298/TSCI220904171N, 2023 2. <i>Nešović, A., et al., THEORETICAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF THE FIXED FLAT-PLATE SOLAR COLLECTOR WITH SN-AL2O3 SELECTIVE ABSORBER AND GRAVITY WATER FLOW</i>, Thermal Science, Vol. X, No. X, pp. X, ISSN: 0354-9836, Doi: 10.2298/TSCI230225100N, 2023
Ко је прихватио техничко решење
Факултет инжењерских наука универзитета у Крагујевцу
Начин коришћења техничког решења
Соларна инсталација је намењена за експериментално испитивање термичких перформанси фиксних соларних пријемника са природним (гравитационим) протицањем воде. Фиксни равни застакљени соларни пријемник са гравитационим протицањем воде примену може наћи у разним секторима: индустријском, пољопривредном, стамбеном...
Област на коју се техничко решење односи
Индустријски производ

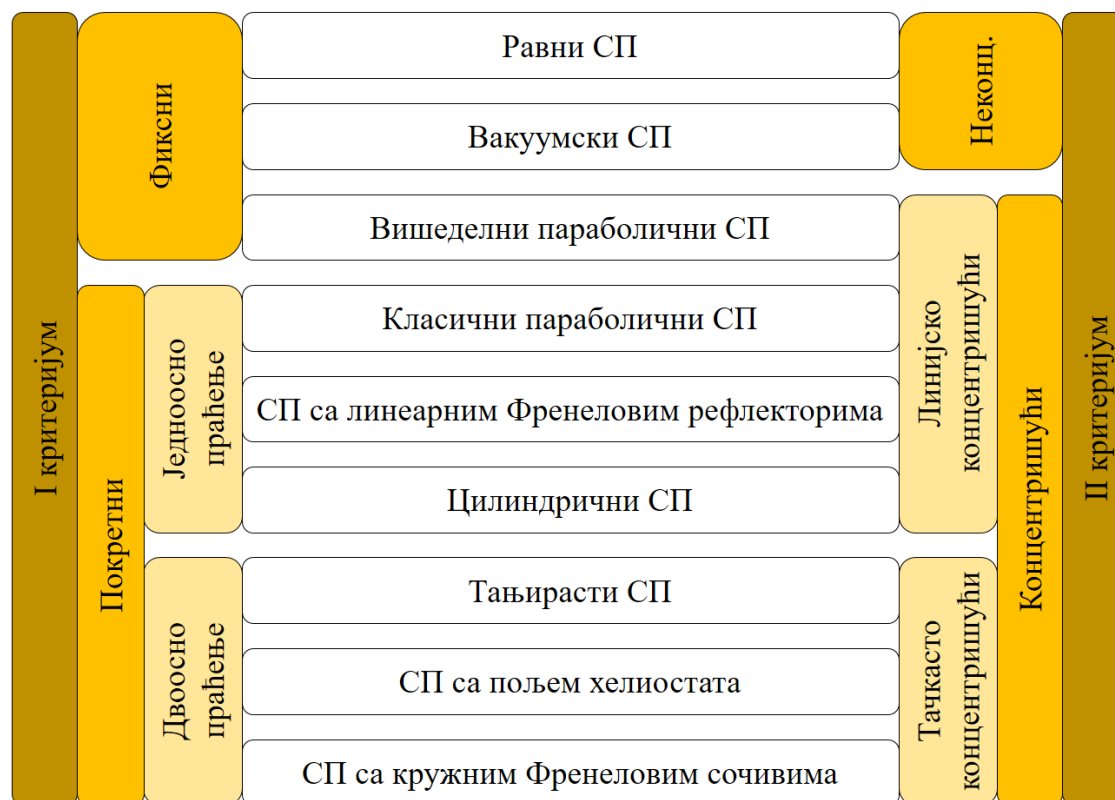
1. Проблеми који се предложеним техничким решењем превазилазе

Рекордна потрошња финалне (134696 TWh) и примарне (161755 TWh) енергије на глобалном¹ нивоу у 2019. години, опомена су човечанству да се убудуће још више пажње треба посветити очувању животне средине, а да се излаз једним делом налази у коришћењу обновљивих извора енергије (ОИЕ). И поред великих напора, учешће ОИЕ у потрошњи финалне и примарне енергије, глобално гледано, и даље је недовољно² (<20%).

Од свих ОИЕ, соларни потенцијал је највећи, а притом се веома мало користи. Осим нуклеарне, геотермалне и енергије плиме и осеке, сви извори на Земљи (обновљиви и необновљиви) у ствари воде порекло из енергије Сунца.

Соларна енергија се соларним уређајима може конвертовати у тополотну енергију (соларни пријемници), електричну енергију (фотонапонски пријемници), односно у топлотну и електричну енергију истовремено (хибридни соларни пријемници).

Соларни пријемници први су соларни уређаји за трансформисање соларне енергије. Са циљем да се соларни потенцијал што више искористи, временом је настао велики број различитих конструкција соларних пријемника (Сл. 1.1): фиксни и покретни, концентришући и неконцентришући.



Слика 1.1 – Класификација соларних пријемника.

Фиксни соларни пријемници и даље имају већу комерцијалну примену од соларних пријемника са механизмом за праћење кретања Сунца. Разлози њихове велике употребе су: релативно једноставан технолошки поступак израде, широк спектар примене (индустријски, комерцијални, стамбени и др. сектори) релативно ниска цена, задовољавајуће термичке перформансе, приступачност на тржишту, већа компактност,

¹ Подаци доступни на сајту OWD (енгл. *Our World in Data*).

² Подаци доступни на сајтовима IEA (енгл. *International Energy Agency*), WB (енгл. *The World Bank*) и EEA (енгл. *European Environment Agency*).

лакша монтажа, релативно дуг радни век, релативно ниски оперативни трошкови (не захтевају додатно улагање електричне енергије као покретни соларни пријемници) и трошкови одржавања, итд.

Најбољи представник фиксних соларних пријемника је равни застакљени соларни пријемник (ФРЗСП). Поменути соларни пријемник данас се готово свуда користи у соларним инсталацијама са затвореним циркулационим кругом, и то на следећа два начина:

- У крајевима где су температуре спољашњег ваздуха током целе године довољно високе (изнад 0°C), протицање (и загревање) воде кроз ФРЗСП одвија се термосифонским ефектом. У овој изведби избегава се ангажовање циркулационе пумпе (нема улагања електричне енергије), али се изнад соларног пријемника обавезно поставља бојлер за складиштење топлотне енергије. Вода се из соларног бојлера потом користи за разне потребе, најчешће гравитационим истицањем;
- У крајевима где температура спољашњег ваздуха током године пада испод 0°C , кроз соларни пријемник протиче (и загрева се) примарни (несмрзавајући) радни флуид (вода са додатком антифриза). Загрејани примарни радни флуид потом протиче кроз цевни размењивач у бојлеру. Проласком кроз цевну змију бојлера, топлотна енергија даље се преноси са примарног на секундарни радни флуид (води намењена крајњем кориснику/потрошачу) који се у бојлеру налази са друге стране цевне змије. Примарни радни флуид се на тај начин хлади, па поново одлази у соларни пријемник. У овој варијанти (пored бојлера и два радна флуида) обавезно се користи циркулациона пумпа која обезбеђује непрестану циркулацију примарног радног флуида.

За разлику од поменутих соларних инсталација са затвореним циркулационим кругом, у овом техничком решењу представљена је соларна инсталација за испитивање фиксних соларних пријемника са отвореним циркулационим кругом и концепт фиксног равног застакљеног соларног пријемника са SnAl_2O_3 селективним апсорбером и гравитационим протицањем воде (ФРЗСП). Цео концепт разрађен је на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу. Због гравитационог протицања воде (супротно од смера одвијања термосифонског ефекта), ФРЗСП се може посматрати и као соларни проточни бојер. Иако се у овом случају достижу нешто ниже температуре воде на излазу из соларног пријемника, енергетски, економски и еколошки бенефити су доста већи (нема употребе акумулационих резервоара, циркулационих пумпи, сложених цевних система, антифриза и других радних флуида, итд., – смањује се тзв. енергија уградње³), што додатно доприноси проширивању области примене соларних пријемника, рецимо у условима енергетских рестрикција, као и на локацијама где нема (или је доста отежано) приступа коришћењу електричне енергије (рецимо пољопривредни сектор).

³ Енгл. *embodied energy*.

2. Стање решености проблема у свету

Математичке моделе истраживања ФРЗСП термичких перформанси развили су следећи аутори: *Beckam* и остали [1], *Mehregan* и остали [2], *Rabl* [3], *Kalogirou* [4], *Stine* и *Harrigan* [5], *Wang* и остали [6], *Ali* и остали [7] итд.

Оптичке карактеристике селективних премаза биле су предмет следећих истраживања: $Ni-Al_2O_3$ [8-10], $AlNi-Al_2O_3$ [11], $Mo-Al_2O_3$ [12, 13], $W-Al_2O_3$ [14], $Cu-CuAl_2O_4$ [15], $Pt-Al_2O_3$ [16], $Ag-Al_2O_3$ [17] и $Sn-Al_2O_3$ [18-20].

Разна побољшања термичких перформанси ФРЗСП са алуминијумским апсорбером такође се могу наћи у литератури:

- *Deng* је са својим тимом у [21] представио ФРЗСП са равним алуминијумским плочама који користи микротоплотне цеви распршене селективним премазом, уско распоређене у кутији соларног пријемника. Предности оваквог решења огледају се у: већој отпорности на смрзавање, већем коефицијенту пролаза топлоте, мањим топлотним губицима, елиминисању поступка заваривања и спречавању цурења радног флуида. Просечна дневна термичка ефикасност наведене соларне конструкције током тродневног експеримента била је: 71,05%, 64,25% и 50,46%;
- ФРЗСП са алуминијумским апсорбером и проточним каналима попречног пресека у облику троугла представљен је у [22]. Резултати истраживања показали су да се оптичка и термичка ефикасност могу побољшати за 15,8%, односно за 10,7%;
- Занимљив предлог смањивања топлотних губитака у ФРЗСП дали су *Bezaatpour* и *Rostamzadeh* у [23]. Резултати њиховог истраживања показали су да се применом Fe_3O_4 /вода нанофлуида, уз ротирање цеви унутар алуминијумског апсорбера, топлотни губици соларног пријемника смањују у опсегу од 1,65-10,44%;
- У циљу повећања примене соларних пријемника, *Seddaoui* и остали развили су соларни пријемник са алуминијумским апсорбером који комбинује перформансе равних и вакуумских соларних пријемника [24]. Теоријски, као и експериментални, модели показали су да развијени концепт даје боље резултате и од једних и од других (за 7,13-28,32%) фиксних соларних пријемника;
- Ваздушни слој између апсорбера и застакљења у ФРЗСП са алуминијумским апсорбером био је предмет изучавања у [25]. Ако би се ваздушни слој поделио на две одвојене зоне (применом вертикалних преграда, тј. баријера), топлотни губици би се смањили за 2,2%. Са три баријере, исти параметар се смањује још више (за 5,3%). Међутим, ако би се ваздушни слој поделио на 4 баријере, топлотни губици би се повећали за 2,9%. Закључак до ког су дошли *Garcia* и остали је да примена баријера у ФРЗСП може бити добро техничко решење, али да се њихов број мора оптимизовати у зависности од специфичности самих конструкција ФРЗСП.

Комбиновање ФРЗСП са рефлектујућим површинама, односно са механизмима за једноосно или двоосно параћење кретање Сунца представљено је унаставку:

- Теоријски модел ФРЗСП са једностраним доњим фиксним равним рефлектором, за подручје Италије, представљен је у [26, 27];
- Користећи два просечна дневна индекса учинка (однос површине и фактор побољшања), у [28] је представљена комбинација ФРЗСП са једностраним горњим, са једностраним доњим рефлектором и са двостраним (горњим и доњим, односно десним и левим) рефлекторима. У свим анализираним сценаријима рефлектори су били фиксни и равни;
- ФРЗСП са четвоространим фиксним рефлекторима [29] теоријски је анализиран за географске ширине у распону од 35-45°, због његове евентуалне примене током зимске сезоне (први сценарио), односно током целе године (други сценарио). У раду су приказане методе за одређивање оптималног положаја овакве соларне конструкције;

- У [30] је математички одређен оптимални положај равног рефлектора (са ручним привидним праћењем Сунца) испод двоструко изложеног ФРЗСП;
- Математички модел развијен у Бразилу [31] показао је да је ФРЗСП са двоосним праћењем Сунца боље решење од ФРЗСП са једноосним праћењем Сунца;
- У [32], *Neville* је нумерички упоредио термичке перформансе различитих концепата ФРЗСП: ФРЗСП са једноосним праћењем у И-З правцу (први случај), ФРЗСП са једносним праћењем у С-Ј правцу (други случај) и ФРЗСП са двоосним праћењем (трећи случај). Сличне нумеричке анализе термичког понашања ФРЗСП са двоосним праћењем Сунца спроведене су у [33] и [34].

3. Суштина предложеног техничког решења

Експериментална инсталација за испитивање фиксних соларних пријемника са отвореним циркулационим кругом и концепт ФРЗСП приказани су на наредној слици (Сл. 3.1).



Слика 3.1 – Експериментална инсталација за испитивање фиксних соларних пријемника са отвореним циркулационим кругом и концепт ФРЗСП.

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

Соларни пријемник чије се термички показатељи одређују, у овом случају ФРЗСП (1), поставља се на носећи рам (2) који је са фиксним постолем (3) зглобно везан (4) преко навојних шипки (5). Носећи рам могуће је оријентисати ка било којој страни света, све према захтеваним условима. Исто важи и за угао нагиба према хоризонталној површини.

У горњем резервоару воде (6), на постолју (8), налази се пловак за одржавање вредности масеног (запреминског) протока у жељеним границама. Ниво воде у горњем резервоару може се очитати на спољашњој страни, преко нивостата (7). Горњи резервоар воде је топлотно излован (Сл. 3.1) како би се и температура воде на улазу у анализирани соларни пријемник држала у одређеним температурним границама који одговарају условима водоснабдевања у пракси. На излазу из горњег резервоара (са доње стране) постављена је једна испусна славина (9) – за случај хитног пражњења, као и један зауставни вентил (10) – за случај хитног спречавања нежељене испоруке воде ка соларном пријемнику. Резервоар (6) и соларни пријемник (1) повезују се флексибилним цревом (Сл. 3.1).

Вредност масеног (запреминског протока) подешава се косим ручним регулационим вентилом (11). То значи да се соларни пријемници могу испитивати у условима

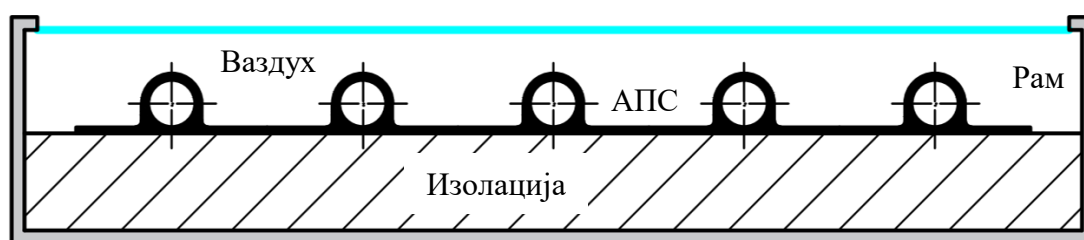
константног и променљивог масеног (запреминског) протока. Испуштање ваздуха из соларне инсталације врши се преко соларног одзрачног лончета (13). Куглични вентили (14) и (15) служе за пружање додатних сигурносних гаранција испитивања. Температуре воде на улазу и излазу из соларног пријемника мере се Pt-100 сондама (16) и (17). Сигнал са Pt-100 сонди прикупља електро орман (18) на стабилном постољу (3). Вредност масеног протока мери се волуметријском методом, тј. мерењем времена пуњења доњег резервоара воде (12).

Носећи рам (2) у овом случају коришћен је за истраживање термичких перформанси ФРЗСП активне површине $0,35 \text{ m}^2$, али се може модификовати за истраживање соларних пријемника и других димензија.

4. Детаљан опис предложеног техничког решења

4.1 Предмет истраживања

Предмет истраживања у овом случају био је ФРЗСП (Сл. 4.1) спољашњих димензија $965 \times 475 \times 80$ mm. Апсорберску површину формирало је пет равних алуминијумских апсорберских плоча селективно премазаних ($\text{Sn-Al}_2\text{O}_3$ селективни апсорбер). Са доње стране апсорбера постављен је изолациони слој. Изнад апсорбера постављено је једностуко стакло. Равне апсорберске плоче интегрисане су са проточним каналима кружног попречног пресека $\varnothing 15$. Пречници сабирника и разделника били су $\varnothing 22$. Геометријске и термичке карактеристике анализираниог ФРЗСП дате су у (Таб. 4.1).



Слика 4.1 – Главне позиције ФРЗСП.

Табела 4.1 – Геометријске и термичке карактеристике ФРЗСП.

Слој	Материјал	A [m ²]	d [mm]	k [W/mK]	τ [-]	α [-]	ϵ [-]
Рам	Алуминијум	0,23	2	203	-	-	-
АПС	$\text{Sn-Al}_2\text{O}_3$	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	-	-	-

4.2 Теоријски модел

Математичке формуле за одређивање теоријских термичких перформанси хронолошки су представљене у (Таб. 4.2).

Табела 4.2 – Изрази за одређивање ФРЗСП теоријских термичких перформанси.

Соларни упадни угао	
$\cos \theta_z = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta$ $\cos \theta_\beta = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \cos \beta + \sin \varphi \sin \delta \cos \beta + \sin \varphi \cos \delta \cos \omega \sin \beta - \cos \varphi \sin \delta \sin \beta$	
Оптичка ефикасност	
$(\tau)_{F, BEAM} = 1,01(\tau)_{F(\perp)} \tau_{F,B} a_{F,B}$ $(\tau)_{F, DIFF} = 1,01(\tau)_{F(\perp)} \tau_{F,D} a_{F,D}$ $(\tau)_{F, REFL} = 1,01(\tau)_{F(\perp)} \tau_{F,R} a_{F,R}$	

Табела 4.2 – Изрази за одређивање ФРЗСП теоријских термичких перформанси (наставак 1).

Укупно апсорбовано соларно зрачење
$I_{F,TOT} = I_{F,BEAM} + I_{F,DIFF} + I_{F,REFL}$ $I_{F,BEAM} = (\tau\alpha)_{F,BEAM} I_{BEAM} \frac{\cos \theta_\beta}{\cos \theta_z}$ $I_{F,DIFF} = (\tau\alpha)_{F,DIFF} I_{DIFF} \frac{1 + \cos \beta}{2}$ $I_{F,REFL} = (\tau\alpha)_{F,REFL} \alpha_{F,REFL} (I_{BEAM} + I_{DIFF}) \frac{1 - \cos \beta}{2}$
Топлотни губици
$Q_{F,LOSS} = \frac{T_{F,ABS} - T_{air}}{\sum R_{F,LOSS}}$ $\sum R_{F,LOSS} = \frac{1}{A_{F,ABS(up)} \sum U_{F,LOSS}} = \frac{1}{A_{F,ABS(up)} (U_{F,GL} + U_{F,INS} + U_{F,EDG})}$
Коефицијент пролаза топлотних губитака
$U_{F,GL} = \frac{1}{\frac{1}{h_{F,ABS-GL(rad)} + h_{F,ABS-GL(con)}} + \frac{d_{F,GL}}{k_{F,GL}} + \frac{1}{h_{F,GL-air(rad)} + h_{F,GL-air(con)}}$ $U_{F,INS} = \frac{1}{\frac{d_{F,INS}}{k_{F,INS}} + \frac{1}{h_{F,INS-air(con)}}}$ $U_{F,EDG} = \frac{1}{\frac{d_{F,EDG}}{k_{F,EDG}} + \frac{1}{h_{F,EDG-air(con)}}} \frac{A_{F,EDG}}{A_{F,TOT}}$
Коефицијенти прелаза топлоте
$h_{F,ABS-GL(rad)} = \frac{\sigma(T_{F,ABS}^2 + T_{F,GL}^2)(T_{F,ABS} + T_{F,GL})}{\frac{1}{e_{F,ABS}} + \frac{1}{e_{F,GL}} - 1}$ $h_{F,ABS-GL(con)} = \frac{Nu_{F,AIR} k_{F,AIR}}{d_{F,AIR}}$ $h_{F,GL-air(rad)} = \sigma e_{F,GL} (T_{F,GL}^2 + T_{air}^2)(T_{F,GL} + T_{air})$ $h_{F,GL-air(con)} = 2,8 + 3W$
Карактеристичне површине
$A_{F,ABS} = n_{F,ABS} L_{F,ABS(1)} u_{F,ABS}$ $A_{F,EDG} = 2(l_F L_F + l_F u_F)$ $A_{F,TOT} = 2(l_F L_F + l_F u_F + L_F u_F)$

Табела 4.2 – Изрази за одређивање ФРЗСП теоријских термичких перформанси (наставка 2).

Топлотна снага
$Q_{F,HEAT} = f_{F,HEAT} \left(A_{F,ABS(up)} I_{F,TOT} - \frac{T_{F,w(in)} - T_{air}}{\sum R_{F,LOSS}} \right)$
Термичка ефикасност
$\eta_F = \frac{Q_{F,HEAT}}{Q_{F,SUN}} = \frac{f_{F,HEAT} \left(A_{F,ABS(up)} I_{F,TOT} - \frac{T_{F,w(in)} - T_{air}}{\sum R_{F,LOSS}} \right)}{A_{F,ABS(up)} I_{F,TOT}}$

4.3 SLR модел

SLR метода је статистичка метода која се заснива на међусобном односу две квантитативне варијабле, при чему се вредност зависне варијабле може предвидети на основу једне независне варијабле. SLR метода је најједноставнији облик линеарне регресије, а притом веома моћан алат када је потребно одредити функционалну зависност између неких појава.

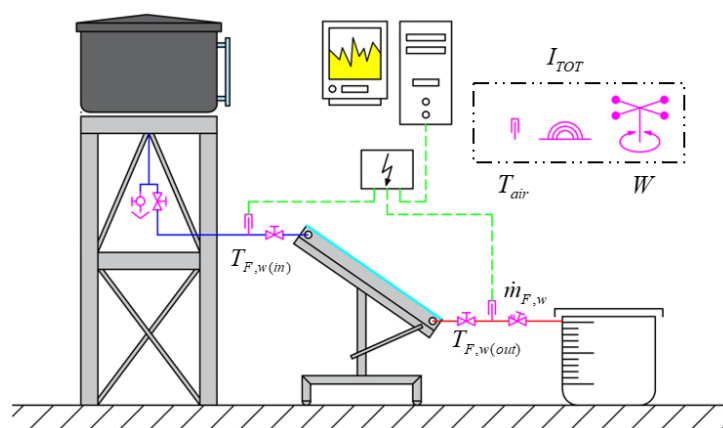
Поменути алат у овом случају коришћен је са циљем одређивања функционалне зависности између интензитета соларног зрачења на хоризонталну површину (експериментално измерена вредност путем хоризонталног пиранометра – улазна варијабла) и топлотне снаге ФРЗСП (излазна варијабла – функција циља).

4.4 Експериментални модел

Експерименталној инсталацији (Сл. 3.1) за одређивање термичких перформанси фиксних соларних пријемника са отвореним циркулационим кругом подршку пружа метеоролошка станица у склопу Факултета инжењерских наука. Мерењем података попут интензитета соларног зрачења, температуре ваздуха, правца и брзине ветра, али и других временских параметара, обезбеђују се оптимални услови испитивања. Експериментална инсталација заједно са метеоролошком станицом формира заокружену експерименталну целину – мерни ланац (Сл. 4.2).

Мерење интензитета сунчевог зрачења, са временским кораком од 5 минута, одређује се хоризонталним пиранометром Kipp & Zonen SMP3. Температурне сонде WZP-035 Ø5×50mm Pt-100, са истим временским кораком мерења, важно место заузимају у оквиру мерне инсталације. Прецизност коришћених мерних инструмената налази се у (Таб. 4.3).

Након експериментално измерених вредности интензитета соларног зрачења на хоризонталну површину, улазних и излазних температура воде, масеног (запреминског) протока, интензитет соларног зрачења на нагнуту површину, топлотна снага и термичка ефикасност за ФРЗСП прерачунавају се једначинама у (Таб. 4.4).



Слика 4.2 – Мерни ланац за испитивање фиксних соларних пријемника са отвореном циркулацијом воде.

Табела 4.3 – Прецизност мерне опреме у оквиру мерног ланца.

Мерни уређај	Прецизност
Kipp & Zonen SMP3 пиранометар	<5%
Kipp & Zonen METEON регистратор података	<0,1%
WZP-035 Ø5×50mm Pt-100 температурне сонде	±0,2°C

Табела 4.4 – Изрази за одређивање ФРЗСП експерименталних термичких перформанси.

Соларно зрачење
$Q_{SUN} = f(I_{BEAM}, I_{DIFF})$ $I_{DIFF} = K_D I_{TOT}$ $I_{BEAM} = I_{TOT} - I_{DIFF}$ $K_D = f(K_T) = \begin{cases} K_T \leq 0,22 \Rightarrow K_D = 1 - 0,09 K_T \\ 0,22 < K_T \leq 0,8 \Rightarrow K_D = 0,9511 - 0,1604 K_T + \\ + 4,388 K_T^2 - 16,638 K_T^3 + 12,336 K_T^4 \\ K_T > 0,8 \Rightarrow K_D = 0,165 \end{cases}$ $K_T = \frac{I_{TOT}}{I_{TOT,O}}$
Топлотна снага
$Q_{F,HEAT} = \dot{m}_{F,w} c_{p,w} (T_{F,w(out)} - T_{F,w(in)})$
Термичка ефикасност
$\eta_F = \frac{Q_{F,HEAT}}{Q_{F,SUN}}$

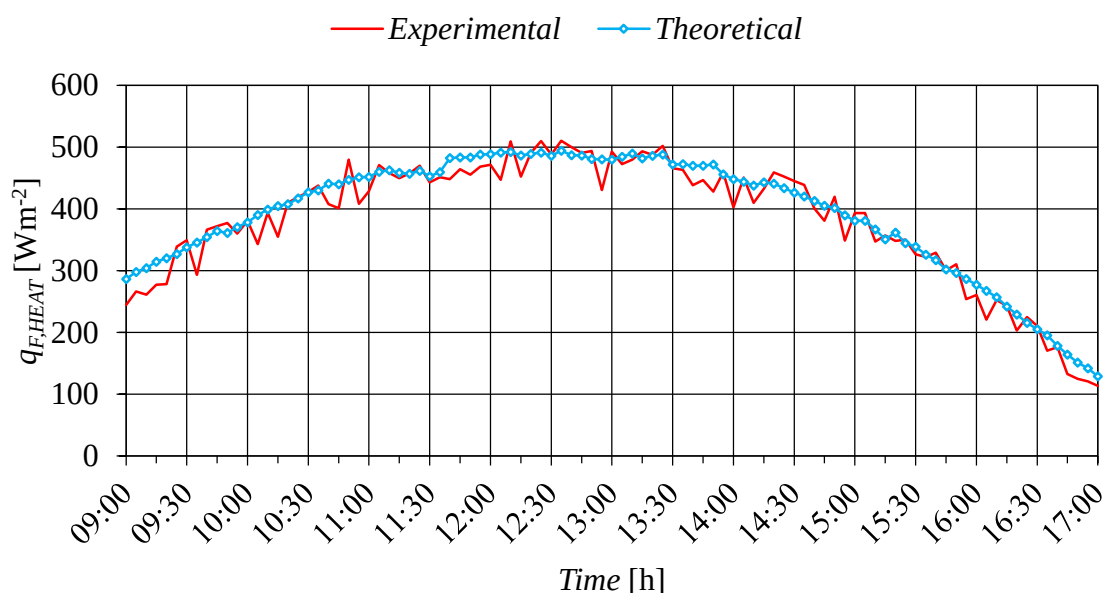
4.5 Резултати истраживања

4.5.1 Топлотна снага

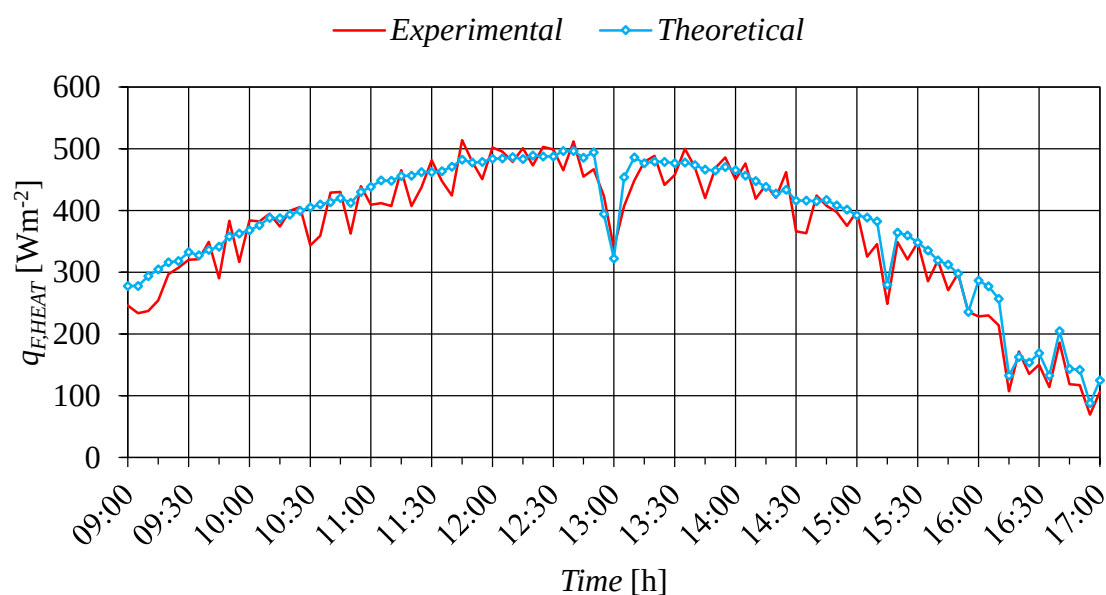
Поређење ФРЗСП теоријских и експерименталних специфичних топлотних снага, за три дана, приказано је на наредним сликама: 29. јун (Сл. 4.3), 30. јун (Сл. 4.4) и 15. јул (Сл. 4.5).

Просечне дневне вредности ФРЗСП експерименталних специфичних топлотних снага током одабраних дана биле су: 381,78 Wm⁻² (29. јун), 364,33 Wm⁻² (30. јун) и 373,06 Wm⁻²

(15. јул). Овим вредностима одговарају следеће просечне дневне специфичне теоријске топлотне снаге: $391,86 \text{ Wm}^{-2}$ (29. јун), Wm^{-2} (30. јун) и $387,46 \text{ Wm}^{-2}$ (15. јул).



Слика 4.3 – ФРЗСП специфична топлотна снага (29. јун).

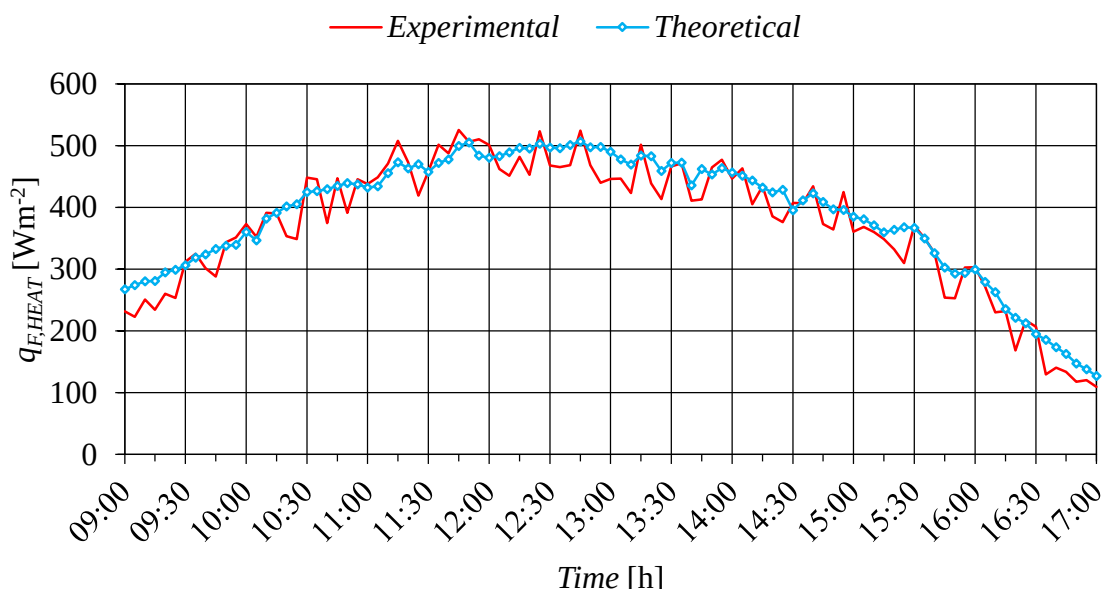


Слика 4.4 – ФРЗСП специфична топлотна снага (30. јун).

Током сва три дана забележени су тренуци када је теоријска специфична топлотна снага била већа од експерименталне специфичне топлотне снаге (позитивна одступања), као и тренутака када је експериментална специфична топлотна снага била већа од теоријске (негативна одступања). Позитивна одступања кретала су се у следећим границама: 29. јуна (од 0,54-19,32%), 30. јуна (од 0,05-21,4%) и 15. јула (од 0,26-30,11%). Негативна одступања била су у следећем распону: 29. јун (од -7,33% до -0,09%), 30. јун (од -7,26% до -0,21%) и 15. јул (од -7,41% до -0,1%).

Верификација математичког (теоријског) модела у односу на експериментална мерења потврђена је захваљујући просечним дневним одступањима која су се кретала у следећим границама: 29. јун (2,54%), 30. јун (4,1%) и 15. јул (3,84%).

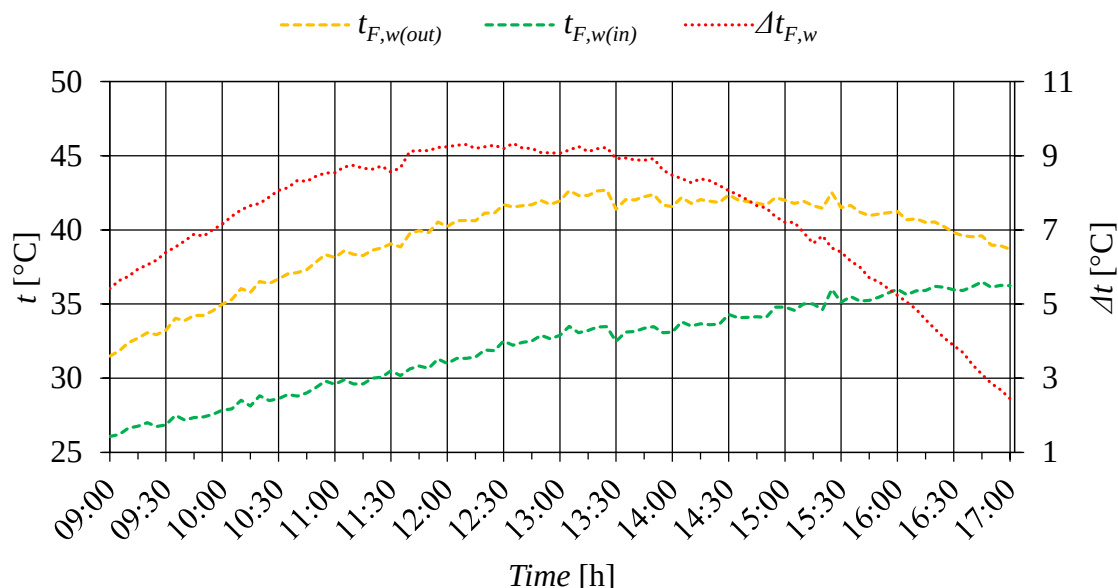
Један од разлога одступања теоријског од експерименталног модела је вредност масеног (запреминског) протока. Наиме, у теоријским прорачунима коришћена је константна, односно просечна дневна вредност масеног протока, иако пловак у горњем резервоару (Сл. 3.1) није могао да обезбеди константност хидростатичког притиска током читавог дана. Другим речима, било је малих варијација у масеном (запреминском) протоку. Не сме се занемарити ни сложеност механизма простирања топлоте између рама соларног пријемника и околине. На прецизност теоријског модела утицало је и присуство прашине на површини стакла, замућеност атмосфере и тачности мерне опреме (Таб. 4.3).



Слика 4.5 – ФРЗСП специфична топлотна снага (15. јул).

4.5.2 Карактеристичне температуре воде

На наредним сликама (Сл. 4.6-4.8), у складу са експерименталним специфичним топлотним снагама (Сл. 4.3-4.5), приказане су експериментално измерене вредности оперативних температура воде на улазу и излазу из анализираног соларног пријемника (ФРЗСП), као и њихова температурна разлика.

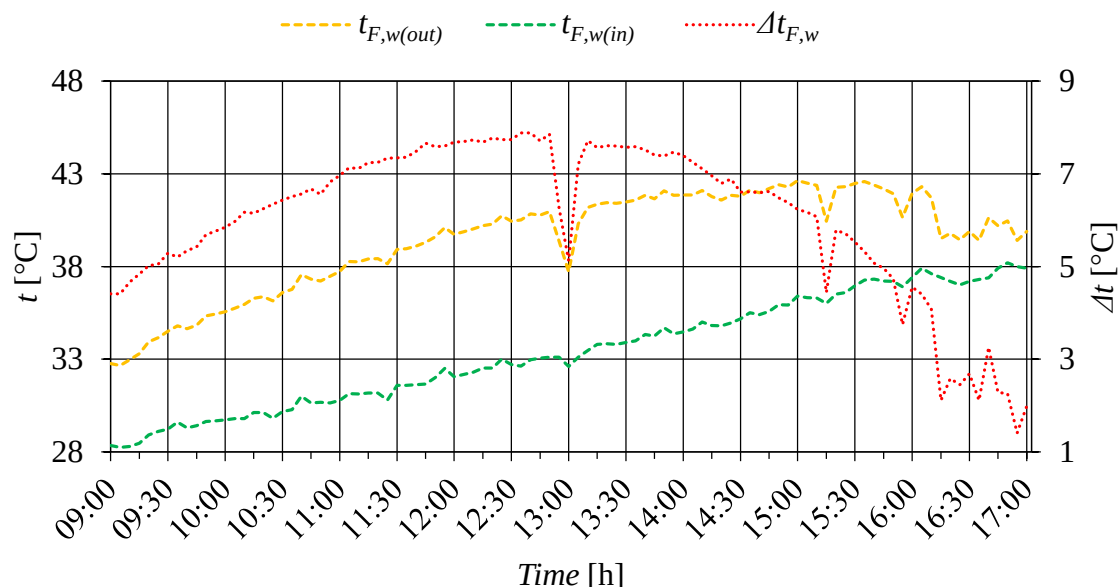


Слика 4.6 – Карактеристичне оперативне температуре за ФРЗСП (29. јун).

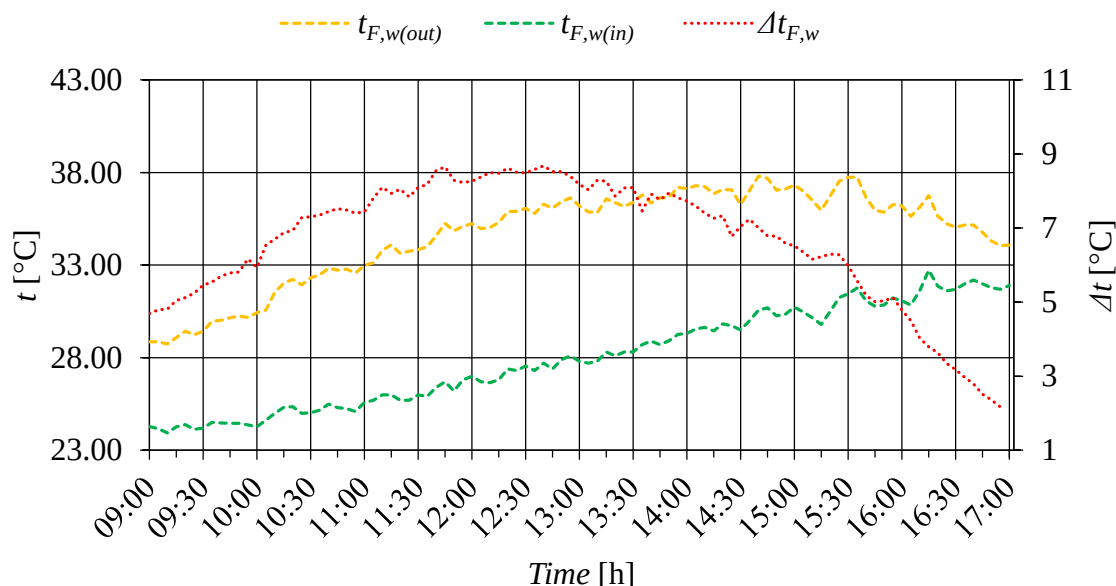
Прво што се може приметити са приложених дијаграма (Сл. 4.6-4.8) је промена температуре воде на улазу у соларни пријемник (од 09:00-17:00 h): 29. јун (са 26,07°C на 36,24°C), 30. јун (са 28,34°C на 37,9°C) и 15. јул (са 24,29°C на 32,73°C).

Температура воде на излазу из соларног пријемника у истим временским интервалима износила је (Сл. 4.6-4.8): 29. јун (31,49°C и 38,69°C), 30. јун (32,76°C и 39,88°C), и 15. јул (28,87°C и 34,08°C).

На крају се може закључити да је температурна разлика (од 09:00-17:00 h) била у следећим границама (Сл. 4.6-4.8): 29. јун (5,42°C и 2,44°C), 30. јун (4,41°C и 1,98°C) и 15. јул (4,58°C и 2,17°C).



Слика 4.7 – Карактеристичне оперативне температуре за ФРЗСП (30. јун).

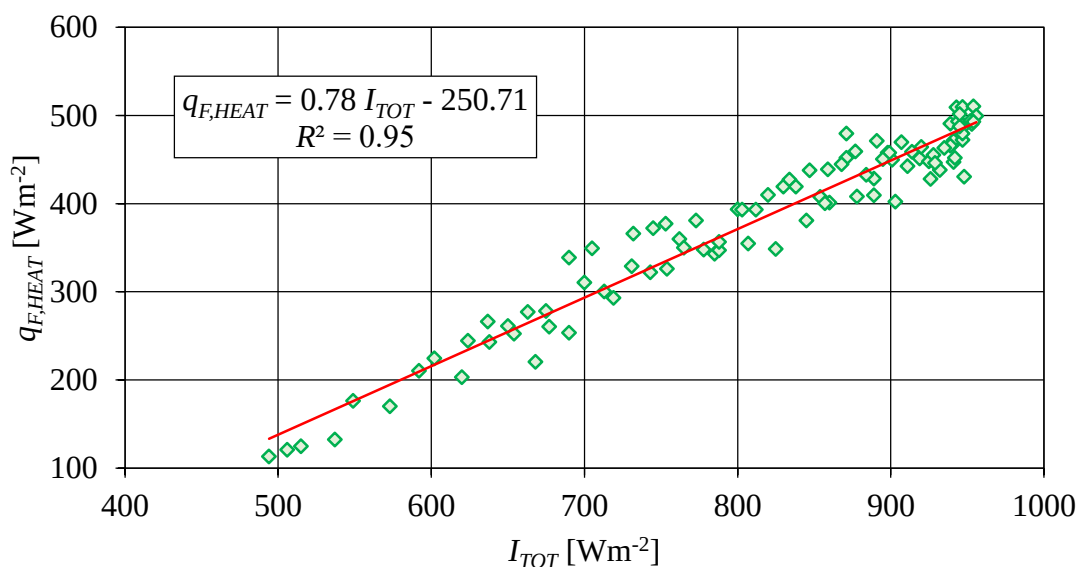


Слика 4.8 – Карактеристичне оперативне температуре за ФРЗСП (15. јул).

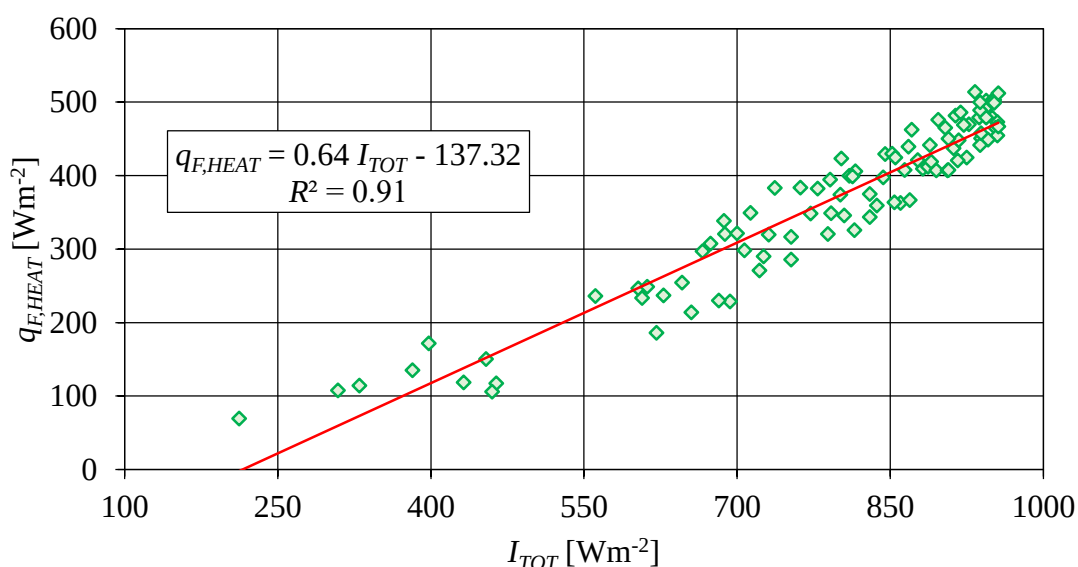
4.5.3 Нумерички резултати

Резултати нумеричког истраживања термичких перформанси ФРЗСП, применом *SLR* методе, приказани су на наредним сликама: 29 јун (Сл. 4.9), 30. јун (Сл. 4.10) и 15. јул (Сл. 4.11).

Коефицијент детерминације (R^2) топлотне снаге соларног пријемника, ако се узме у обзир само соларно зрачење, показује задовољавајуће резултате ($R^2 > 0,9$ за све случајеве). Најбољи (нумерички) предиктивни резултати постигнути су за 29. јун ($R^2 = 0,95$). Други најбољи резултат постигнут је 15. јула ($R^2 = 0,92$), док је коефицијент детерминације најмање био током 30. јуна ($R^2 = 0,91$).

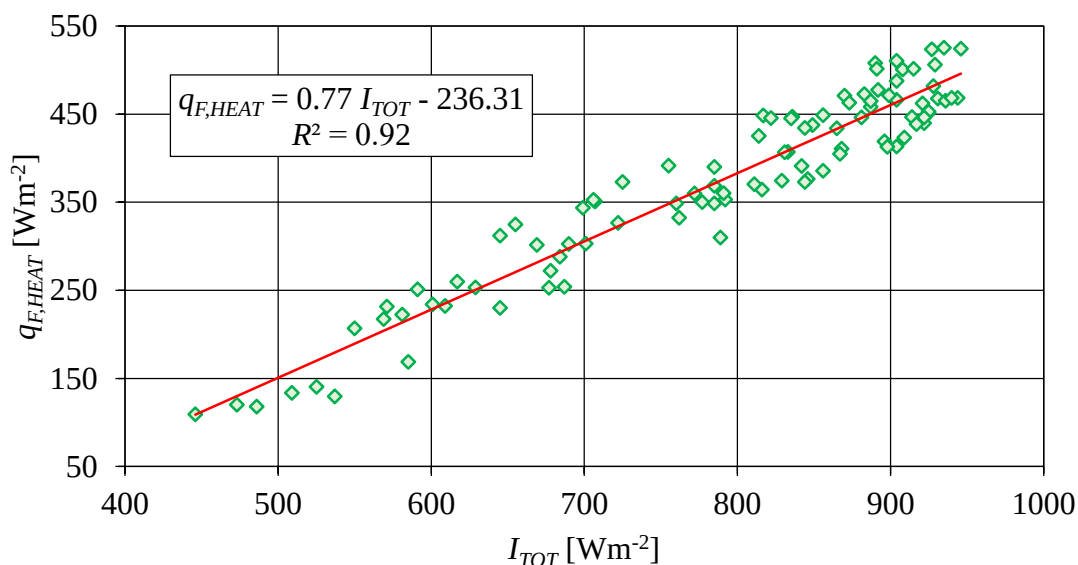


Слика 4.9 – Функционална зависност између интензитета соларног зрачења на хоризонталну површину и експерименталне специфичне топлотне снаге за ФРЗСП (29. јун)



Слика 4.10 – Функционална зависност између интензитета соларног зрачења на хоризонталну површину и експерименталне специфичне топлотне снаге за ФРЗСП (30. јун)

На основу нумеричких резултата може се извести још један закључак. При нижим вредностима интензитета соларног зрачења ($I_{TOT} < 770$ Wm⁻²), топлотна снага анализираних соларних пријемника опада заједно са I_{TOT} . Са друге стране, када је $I_{TOT} > 770$ Wm⁻², тада се топлотна снага ФРЗСП повећава заједно са I_{TOT} . До ове критичне вредности интензитета соларног зрачења, $q_{F,HEAT} < 350$ Wm⁻². Са друге стране, за вредности $770 < I_{TOT} < 950$ Wm⁻², топлотна снага је $350 < q_{F,HEAT} < 550$ Wm⁻².



Слика 4.11 – Функционална зависност између интензитета соларног зрачења на хоризонталну површину и експерименталне специфичне топлотне снаге за ФРЗСП (15. јул)

Свеобухватна (теоријска, нумеричка и експериментална) анализа ФРЗСП са $Sn-Al_2O_3$ селективним апсорбером и отвореним циркулационим кругом оправдала је примену експерименталне инсталације за испитивање фиксних соларних пријемника са отвореним циркулационим кругом, представљену у оквиру овог техничког решења.

Како је глобална ситуација у енергетском, еколошком и економском смислу све тежа, у будућности (у свим секторима: стамбеном, индустријском, пољопривредном, итд.) треба још више уложити труда да се максимизира коришћење обновљивих извора енергије, уз истовремено минимизирање улагања исте, посебно у климатским појасевима где временске прилике то дозвољавају.

5. Закључак

Након вишесемечних експерименталних (уз теоријску и нумеричку верификацију резултата) испитивања топлотних перформанси ФРЗСП, у овом техничком решењу извршено је представљање експерименталне инсталације за испитивање фиксних соларних пријемника са отвореним циркулационим кругом и концепт ФРЗСП.

Коришћење соларних пријемника са гравитационим смером протицања воде у будућности доноси бенефите по питању потрошње финалне и примарне енергије (због смањења потрошње *embodied* енергије), остваривању економских уштеда, а на крају, и очувања животне средине.

Експериментална инсталација предложена у оквиру овог техничког решења допринела би развоју соларне технике, посебно у тропским и умерено континенталним појасевима, где климатски услови током већег дела године дозвољавају избегавање употребе циркулационих пумпи у соларним инсталацијама (са затвореним циркулационим кругом).

Предложено техничко решење може допринети већем имплементирању соларних пријемника у свим секторима, па и пољопривредном, јер се на овај начин може обезбедити топлотна енергија (температура воде на излазу из соларног пријемника може и преко 10°C бити виша од температуре воде на улазу у соларни пријемник) за разне намене, и то без додатног улагања електричне енергије.

6. Литература

- [1] Beckman, W. A., et. al., Solar heating design, by the f-chart method, NASA STI/Recon Technical Report A, 78 (1977), No, pp. 31071, Doi: No.
- [2] Mehregan, M., et. al., Energy, economic, environmental investigations and optimization of a combined cooling, heating and power system with hybrid prime mover of gas engine and flat plate solar collector, Energy Conversion and Management, 251 (2022), No, pp. 115018, Doi: 10.1016/j.enconman.2021.115018.
- [3] Rabl, A., Active solar collectors and their applications, Oxford University Press on Demand, Oxford, UK, 1985.
- [4] Kalogirou, S. A., Solar thermal collectors and applications, Progress in Energy and Combustion Science, 30 (2004), 3, pp. 231-295, Doi: 10.1016/j.pecs.2004.02.001.
- [5] Stine, W. B., Harrigan, R. W., Solar energy fundamentals and design, Wiley-Interscience, New York, USA, 1985.
- [6] Wang, D., et. al., Thermal performance analysis of large-scale flat plate solar collectors and regional applicability in China, Energy, 238 (2022), No, pp. 121931, Doi: 10.1016/j.energy.2021.121931.
- [7] Ali, S. H., et. al., Energetic and exergetic performance analysis of flat plate solar collector under variables heat transfer coefficient and inlet water temperature, Case Studies in Thermal Engineering, 28 (2021), No, pp. 101700, Doi: 10.1016/j.csite.2021.101700.
- [8] Wazwaz, A., et. al., Solar thermal performance of a nickel-pigmented aluminium oxide selective absorber, Renewable Energy, 27 (2002), 2, pp. 277-292, Doi: 10.1016/S0960-1481(01)00192-6.
- [9] 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, 51 (2010), 8, pp. 1679-1683, Doi: 10.1016/j.enconman.2009.11.047.
- [10] Li, Z., et. al., Aqueous solution-chemical derived Ni-Al₂O₃ solar selective absorbing coatings, Solar Energy Materials and Solar Cells, 105 (2012), No, pp. 90-95, Doi: 10.1016/j.solmat.2012.05.030.
- [11] Xue, Y., et. al., Spectral properties and thermal stability of solar selective absorbing AlNi-Al₂O₃ cermet coating, Solar Energy, 96 (2013), No, pp. 113-118, Doi: 10.1016/j.solener.2013.07.012.
- [12] Teixeira V., et. al., Spectrally selective composite coatings of Cr-Cr₂O₃ and Mo-Al₂O₃ for solar energy applications, Thin Solid Films, 392 (2001), 2, pp. 320-326, Doi: 10.1016/S0040-6090(01)01051-3.
- [13] Xinkang, D., et. al., Microstructure and spectral selectivity of Mo-Al₂O₃ solar selective absorbing coatings after annealing, Thin Solid Films, 516 (2008), 12, pp. 3971-3977, Doi: 10.1016/j.tsf.2007.07.193.
- [14] 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, 94 (2010), 10, pp. 1604-1611, Doi: 10.1016/j.solmat.2010.04.080.
- [15] 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, 94 (2010), 10, pp. 1578-1581, Doi: 10.1016/j.solmat.2010.04.075.
- [16] Nuru, Z. Y., et. al., Pt-Al₂O₃ nanocoatings for high temperature concentrated solar thermal power applications, Physica B: Condensed Matter, 407 (2012), 10, pp. 1634-1637, Doi: 10.1016/j.physb.2011.09.104.
- [17] 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, 95 (2011), 7, pp. 1707-1715, Doi: 10.1016/j.solmat.2011.01.034.

- [18] Chorchong, T., et. al., Characterization and spectral selectivity of Sn-Al₂O₃ solar absorber, *Key Engineering Materials*, 675 (2016), No, pp. 467-472, Doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.675-676.467.
- [19] 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*, 7 (2018), No, pp. 1-8, Doi: 10.1007/s40243-017-0109-1.
- [20] 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*, 15 (2018), 11, pp. 793-802, Doi: 10.48048/wjst.2018.5965.
- [21] Deng, Y., et al., Experimental study of the thermal performance for the novel flat plate solar water heater with micro heat pipe array absorber, *Energy Procedia*, 70 (2015), pp. 41-48, Doi: 10.1016/j.egypro.2015.02.095.
- [22] Fan, M., et al., Comparison of different dynamic thermal performance prediction models for the flat-plate solar collector with a new V-corrugated absorber, *Solar Energy*, 204 (2020), pp. 406-418, Doi: 10.1016/j.solener.2020.04.093.
- [23] Bezaatpour, M. and Rostamzadeh, H., Simultaneous energy storage enhancement and pressure drop reduction in flat plate solar collectors using rotary pipes with nanofluid, *Energy and Buildings*, 239 (2021), pp. 110855, Doi: 10.1016/j.enbuild.2021.110855.
- [24] Seddaoui, A., et al., Performance investigation of a new designed vacuum flat plate solar water collector: A comparative theoretical study, *Solar Energy*, 231 (2022), pp. 936-948, Doi: 10.1016/j.solener.2021.12.038.
- [25] Garcia, R. P., et al., Thermal efficiency experimental evaluation of solar flat plate collectors when introducing convective barriers, *Solar Energy*, 182 (2019), pp. 278-28, Doi: 10.1016/j.sol[26] 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*, 81 (2015), No, pp. 205-214, Doi: 10.1016/j.egypro.2015.12.085.
- [27] 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*, 164 (2018), No, pp. 482-507, Doi: 10.1016/j.enconman.2018.02.091.
- [28] Chiam, H. F., Planar concentrators for flat-plate solar collectors, *Solar Energy*, 26 (1981), 6, pp. 503-509, Doi: 10.1016/0038-092X(81)90161-4.
- [29] Larson, D. C., Mirror enclosures for double-exposure solar collectors, *Solar Energy*, 23 (1979), 6, pp. 517-524, Doi: 10.1016/0038-092X(79)90076-8.
- [30] Nikolić, N., Lukić, N., A mathematical model for determining the optimal reflector position of a double exposure flat-plate solar collector, *Renewable Energy*, 51 (2013), No, pp. 292-301, Doi: 10.1016/j.renene.2012.09.034.
- [31] Maia, C. B., et. al., Evaluation of a tracking flat-plate solar collector in Brazil, *Applied Thermal Engineering*, 73 (2014), 1, pp. 953-962, Doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.08.052.
- [32] Neville, R. C., Solar energy collector orientation and tracking mode, *Solar Energy*, 20 (1978), 1, pp. 7-11, Doi: 10.1016/0038-092X(78)90134-2.
- [33] Drago, P., A simulated comparison of the useful energy gain in a fixed and a fully tracking flat plate collector, *Proceedings of the International Symposium – Workshop on Solar Energy*, Cairo, Egypt, 1980, Vol. No, pp. 258-273.
- [34] Attalage, R. A., Agami, R. T., Annual collectible energy of a two-axis tracking flat-plate solar collector, *Solar Energy*, 48 (1992), 3, pp. 151-155, Doi: 10.1016/0038-092X(92)90133-U. lener.2019.02.048.

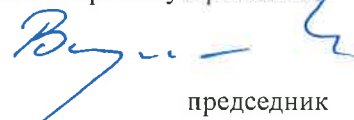
МИНИСТАРСТВО НАУКЕ,
ТЕХНОЛОШКОГ РАЗВОЈА И ИНОВАЦИЈА
Матични научни одбор за енергетику,
рударство и енергетску ефикасност
ТР 0338-033/2023

Београд 29.09.2023. године

На основу захтева наставно - научног већа Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, број 01-1/2307 од 29.06.2023. за верификацију техничког решења под називом: „Експериментална инсталација за испитивање фиксних соларних пријемника са отвореним циркуларним кругом и концепт фиксног равног застакљеног соларног пријемника са SnAl_2O_3 селективним апсорбером и гравитационим протицањем воде“, чији су аутори: Александар Нешовић, др Небојша Лукић, др Драган Тарановић, др Драган Цветковић, др Небојша Јуришевић, др Душан Гордић и др Младен Јосијевић, а према *Правилнику о стицању истраживачких и научних звања* („Сл. Гласник, 159/20“), Матични научни одбор за енергетику, рударство и енергетску ефикасност је на седници одржаној 29.09.2023. године разматрао исти и донео одлуку којом се предлаже признавање техничког решења у категорији:

М82 – Ново техничко решење примењено на националном нивоу.

Матични научни одбор за енергетику,
рударство и енергетску ефикасност



председник

проф.др Милош Баћац