



УНИВЕРЗИТЕТ „СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ“ – БИТОЛА
ТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ – БИТОЛА



Машинство

**ПРИМЕНА НА МЕТОДАТА НА МИНИМИЗИРАЊЕ НА ГЕНЕРИРАЊЕ НА
ЕНТРОПИЈА ЗА ОПТИМИЗАЦИЈА НА ФОТОВОЛТАИЧЕН ПАНЕЛ**

докторски проект

Кандидат
м-р Елена Стефаноска, дипл. маш. инж.
број на индекс **41**

Ментор
ред. проф. д-р Севде Ставрева

СОДРЖИНА

Апстракт	1
1. Вовед	1
2. Преглед на литературата.....	3
2.1. Минимизирање на генерирање на ентропија (<i>Entropy Generation Minimization – EGM</i>).....	3
2.2. Преглед на методи за оптимизација на фотоволтаични панели.....	6
3. Методи и материјали.....	7
3.1. Модел за пренос на топлината од апсорбираното сончево зрачење и генерирање на ентропија кај фотоволтаичниот панел.....	8
3.2. Оптимизација на фотоволтаичниот панел по пат на <i>EGM</i> со примена на генетски алгоритам (<i>Genetic Algorithm – GA</i>).....	10
4. Резултати и дискусија.....	12
4.1. Имплементација и симулација	12
4.2. Валидација на модел	14
4.3. Анализа на постигнати резултати од применетиот модел за оптимизација.....	15
5. Заклучок.....	18
Користена литература	20

ПРИМЕНА НА МЕТОДАТА НА МИНИМИЗИРАЊЕ НА ГЕНЕРИРАЊЕ НА ЕНТРОПИЈА ЗА ОПТИМИЗАЦИЈА НА ФОТОВОЛТАИЧЕН ПАНЕЛ

м-р Елена Стефаноска

Универзитет „Св. Климент Охридски“ – Битола
Република Северна Македонија
0009-0004-9513-397X
elena.stefanoska@uklo.edu.mk

ред. проф. д-р Севде Ставрева

Универзитет „Св. Климент Охридски“ – Битола
Република Северна Македонија
0009-0004-6688-829X
sevde.stavreva@uklo.edu.mk

Апстракт

Во овој докторски проект предмет на анализа е примената на методата на минимизирање на генерирање на ентропија (*Entropy Generation Minimization – EGM*) за оптимизација на фотоволтаичен панел со локација во Битола. Целта е да се определи комбинација на агол на наклон и азимут која го максимизира годишното производство на електрична енергија и просечната годишна ефикасност, а ја минимизира вкупно генерираната ентропија како мерка за неповратните процеси и топлинското оптоварување на фотоволтаичниот панел.

Оптимизацијата е спроведена со генетски алгоритам (*Genetic Algorithm – GA*), при што се разгледуваат пет варијанти со доделување на различни тежини на целната функција за трите критериуми – енергија, ефикасност и ентропија. Кога доминира енергијата, оптималното решение се придвижува кон јужна ориентација и поголем агол на наклон; при поголема тежина на ентропијата, решението се поместува кон помал агол на наклон и отстапувања по азимут, со значително намалување на генерирањето на ентропија и умерен пад на енергијата. Балансираните тежини покажуваат поволна ефикасност и значително производство на енергија.

Валидацијата на моделот со *PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System)* ја потврдува усогласеноста на моделот со мали апсолутни разлики. Според тоа, интеграцијата на методата на минимизирање на генерирање на ентропија (*Entropy Generation Minimization – EGM*) и генетскиот алгоритам (*Genetic Algorithm – GA*) претставува сеопфатен и применлив пристап за избор помеѓу енергетското производство и термодинамичката одржливост на фотоволтаичниот панел.

Клучни зборови: фотоволтаичен панел, сончева енергија, ефикасност, генерирање на ентропија, оптимизација

1. Вовед

Производството на енергија од обновливи извори е од голем интерес на глобално ниво, особено во период на исцрпување на резервите на фосилни горива и транзиција кон почисти и еколошки прифатливи енергетски ресурси, како и кон развој на технологии за нивна конверзија во корисни облици на енергија (Цао – *Zhao*, 2021; Гиртирк – *Gürtürk*, 2018).

Помеѓу овие алтернативи, сончевата енергија претставува една од клучните опции поради нејзината достапност, одржливост и еколошка природа (Њок – *Njok*, 2018; Куче – *Cuse*, 2018). Фотоволтаичните технологии, кои овозможуваат директна конверзија на сончевото зрачење во електрична енергија преку примена на полупроводнички материјали, бележат брз глобален пораст и претставуваат клучна компонента на современите енергетски системи (Тан – *Tan*, 2010; Казем – *Kazem*, 2015). Поради овие причини, прецизното моделирање и оптимизација на фотоволтаичните панели станува клучен предуслов за одржлива експлоатација од енергетски и економски аспект.

Оптимизацијата на оперативните параметри и подобрувањето на ефикасноста на фотоволтаичните системи се клучни фактори за максимизирање на конверзијата на сончевата енергија. Развиени се напредни методи за оптимизација на ефикасноста на системите, но предизвици и понатаму постојат поради променливата природа на сончевата енергија. Излезот од сончевата енергија е многу зависен од надворешни фактори. Како резултат на тоа, моделите за енергетска оптимизација на фотоволтаичните системи кои ги земаат во предвид овие фактори стануваат неопходни за подобрување на ефикасноста на производство на енергија, при што ваквото размислување го поддржува и Синг (*Singh*, 2023). Решавањето на овие прашања и усвојувањето на оптимални технички решенија се од суштинско значење за доверлива интеграција на сончевата енергија во енергетскиот систем.

Од страна на Сахин (*Sahin*, 2025), се потврдува дека освен енергијата, исто така како критериум за оптимизација потребно е да се вклучат и неповратните процеси изразени преку ентропијата и ексергијата на системот. Според тоа, освен класичните енергетски показатели, во моделите за оптимизација на фотоволтаични панели потребно е да се имплементира и ентрописки биланс, генерирање на ентропија, како мерка за неповратните загуби во процесот на конверзија. На тој начин се добива поширока слика за квалитетот на енергијата и топлинското оптоварување на панелот, што е релевантно за работниот век и стабилноста на фотоволтаичниот панел.

Земајќи ги во предвид претходните истражувања и донесени заклучоци, во овој докторски проект, оптимизацијата на геометриските параметри на фотоволтаичниот панел е изведена со генетски алгоритам (*Genetic Algorithm – GA*) во комбинација со методата на минимизирање на генерирање на ентропија (*Entropy Generation Minimization – EGM*), со цел да се определат аголот на наклон и азимут што даваат оптимален баланс помеѓу три цели: максимизирање на производството на електрична енергија, максимизирање на ефикасноста и минимизирање на вкупната генерирана ентропија. Во истражувањето се разгледуваат пет сценарија на распореди на тежини за целната функција на генетскиот алгоритам, од чисто енергетски до изразено ентрописки, со цел да се прикаже целокупниот опсег на можни решенија, спроведени за локација во Битола.

За валидација на моделот се спроведува компарација на резултатите од спроведените симулации и оптимизација, со резултати добиени од симулација со помош на *PVGIS* (*Photovoltaic Geographical Information System*) со соодветни влезни податоци за конкретниот фотоволтаичен панел и локацијата, по што се потврдува дека моделот е валиден и применлив и се согледуваат придобивките од повеќекритериумската оптимизација.

Главниот придонес на овој докторски проект е интеграцијата на енергетскиот и ентропискиот критериум во единствен пристап за оптимизација. Со тоа, покрај максималното годишно производство, се разгледуваат и термодинамичките неповратни процеси на тоа производство, што овозможува избор на агол на наклон и азимут усогласени со приоритетите: максимална енергија, намалено топлинско оптоварување или балансирано

решение. Резултатите покажуваат дека со соодветно избран агол на наклон и азимут може да се постигне големо годишно производство на енергија и истовремено да се намали ентропискиот биланс, што е значајно за долгорочната одржливост и стабилност на системот. Овој применет пристап, комбинација на методата на минимизирање на генерирање на ентропија (*Entropy Generation Minimization – EGM*) и генетски алгоритам (*Genetic Algorithm – GA*), претставува оправдана, применлива и сеопфатна методологија за оптимизација на фотоволтаични панели при реални климатски услови, при што, како што е образложено во прегледот на литературата, вакви интегрирани, повеќекритериумски пристапи се исклучително ретки во постоечките истражувања за оптимизација на фотоволтаични панели.

2. Преглед на литературата

Во продолжение е претставен преглед на клучните согледувања поврзани со неповратните топлински процеси, минимизирањето на генерирање на ентропија и постоечките методи за оптимизација на фотоволтаични системи.

2.1 Минимизирање на генерирање на ентропија (*Entropy Generation Minimization – EGM*)

Неповратните топлински процеси може да се дефинираат преку големината наречена ентропија, каде во случај на повратни процеси, временскиот диференцијал на функцијата на ентропијата е поврзан со преносот на топлина и температурата на која се одвива:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Q}{T} \quad (2.1)$$

Едно од најзначајните подрачја на примена на законите на термодинамиката во инженерската практика несомнено е зависноста помеѓу неповратните топлински процеси (генерирање на ентропија) и намалувањето на ексергијата. Многу правила поврзани со максимизирање на енергетската ефикасност на различни процесни единици, постројки и самите процеси, претставуваат посебни случаи на општата теорема на *Gouy-Stodola*.

Суштината на оваа теорема, гледано од аспект на енергетското инженерство, е дека загубите можат да се мерат преку количината на генерирана ентропија. Иако во литературата теоремата на *Gouy-Stodola* се нарекува и анализа на вториот закон, таа теорема произлегува од истовремената примена на првиот и вториот закон на термодинамиката.

Во случај на одвивање на неповратен процес во системот, генерираната работа се намалува пропорционално со генерирањето на ентропија на системот. Количината на намалена работа се нарекува загуба на работна способност или деструкција на ексергија.

Врската помеѓу генерирањето на ентропија (S_{gen}), при температура на околината T_0 , и деструкцијата на ексергија (E_D) е теоремата за загуба на работна способност (W_{lost}), теорема за деструкција на ексергија или претходно дефинираната теорема на *Gouy-Stodola*:

$$W_{lost} = E_D = T_0 \cdot S_{gen} \quad (2.2)$$

Што се однесува до фотоволтаичните панели, термодинамиката на конверзија на сончевата енергија во електрична енергија се истражува со примена на првиот и вториот закон на термодинамиката како што се забележува кај Рават (*Rawat, 2017*). За проучување на методата на минимизирање на генерирање на ентропија (*Entropy Generation Minimization – EGM*) кај фотоволтаичните системи, неопходно е да се разгледуваат енергетскиот и ентропискиот биланс.

Генерирањето на ентропија се дефинира како мерка за изгубената корисна работа (неповратен процес) на било кој термодинамички систем за конверзија на енергија.

Всушност, анализата на перформансите на фотоволтаичните панели врз основа на првиот и вториот закон на термодинамиката е пожелна за идентификација на можни точки за подобрување, т.е. лоцирање на областите каде се генерира ентропија и примена на методи за минимизирање, како што е потенцирано од страна на Стефаноска (Stefanoska, 2026-a).

Минимизирањето на генерирање на ентропија (*Entropy Generation Minimization – EGM*) е метод развиен за моделирање на реални (неповратни) процеси и уреди. Испитуваните модели ги вклучуваат основните принципи на термодинамика и размена на топлина, а оптимизацијата е ограничена во конечни димензии и конечно време. Под реални модели се подразбираат оние кои ги земаат во предвид неповратните процеси на пренос на топлина и маса при струењето на флуидите. Овој метод е исто така познат како термодинамичка оптимизација и анализа на вториот закон на термодинамиката. За разлика од други термодинамички методи, *EGM* се заснова на примена на равенките дефинирани во научната област на пренос на топлина и маса, во научната област на термодинамика и механика на флуиди.

Во општа смисла, за случај на термодинамички системи кои се во топлински контакт со околината, теоремата на *Gouy-Stodola* ја определува пропорционалноста помеѓу изгубената работа и вкупната количина на генерирана ентропија во текот на испитуваниот процес. Логичен заклучок е дека проектирањето на постројки и компоненти со минимална деструкција на корисна работа, започнува со минимизирање на генерирањето на ентропија.

Смислата на примена на методата на минимизирање на генерирање на ентропија (*Entropy Generation Minimization – EGM*) кај фотоволтаичните системи е да се утврди на некој начин и според соодветен критериум да се определи степенот на отстапување на билансот на системот во неповолни услови со посредство на пресметка на промената на вкупно генерираната ентропија. Како модел за споредба на добиените резултати може да се користи величината која е исто така дадена со алгоритмот за *EGM* методата која се нарекува ентрописки број. Според *EGM* методата, ентропискиот број, N_s [-] е дефиниран како количник на реално генерираната ентропија, S_{gen} [J/K] и нејзината минимална вредност, S_{min} [J/K] т.е. претставува однос на реалниот и оптималниот режим на работа. Минималната ентропија се пресметува за вредности кои би одговарале на идеален режим на работа на фотоволтаичниот систем.

Методата на минимизирање на генерирање на ентропија (*Entropy Generation Minimization – EGM*) овозможува оптимизација земајќи ги во предвид физичките ограничувања (гранични услови) на системите во кои целната функција е генерирањето на ентропија, а степените на слобода обично вклучуваат оперативни и геометриски параметри.

Ордонез (Ordonez, 2022) се согласува со ставот дека методата подразбира и моделирање и оптимизација, и тоа во низа од три чекори:

1. Развој на модел за системот со примена на законите на термодинамиката како основа, и законите од пренос на топлина и маса и механика на флуиди.
2. Пресметка на генерирањето на ентропија во една од двете форми: локална, изразена во облик на парцијални диференцијални равенки, која има тенденција да се користи заедно со пристапите за компјутерска динамика на флуиди (*Computational Fluid Dynamics – CFD*), или збиена, во која просторната димензионалност е намалена.

3. Минимизирање на генерирањето на ентропија со оптимизација на работата на системите при што се земаат во предвид нивните физички ограничувања.

Целта на минимизирањето на генерирањето на ентропија е да се намалат енергетските загуби, при што ваквиот став се забележува кај Набвеј (*Nabwey, 2024*). Поради овие причини, во продолжение е претставена анализа на неколку случаи на примена на методата на минимизирање на генерирање на ентропија кај системите и технологиите за искористување на енергијата од сонцето како една од техниките за нивна оптимизација.

Од страна на Чекеровска (*Chekerovska, 2021*) анализиран е методот на минимизирање на генерирање на ентропија кај рамен сончев колектор со течност како работен медиум, апсорберна плоча од алуминиум, бакарни цевки и селективна облога. Направена е компаративна анализа помеѓу ефикасноста на теоретскиот модел на неизотермски сончев колектор и ефикасноста добиена преку мерења на физичкиот модел на сончев колектор. Резултатите покажуваат општа тенденција на пораст на ефикасноста на колекторот поради намалувањето на неповратните процеси. Преку спроведената анализа се добиени оптималните параметри на режимот на работа колекторот – оптимална работна температура на колекторот, оптимален пренос на топлина од колекторот на работниот флуид, оптимален проток на работниот флуид итн.

Во слична насока, Рамирез-Мингела (*Ramírez-Minguela, 2023*) спроведува детална нумеричка анализа која ги споредува термодинамичките перформанси на три различни модели на рамни сончеви колектори со примена на компјутерска динамика на флуиди (*Computational Fluid Dynamics – CFD*) и анализа на генерирањето на ентропија. Преку детално *CFD* моделирање и симулации, авторите откриваат како геометриските модификации влијаат врз брзината на пренос на топлина, падовите на притисок и генерирањето на ентропија. Вкупното генерирање на ентропија е во најголем дел како резултат на топлинските загуби, при што ентропијата поради вискозноста на флуидот е занемарлива под проучуваните услови. Може да се заклучи дека, иако *zigzag* моделите ги подобруваат топлинските перформанси, тие исто така воведуваат поголеми неповратни процеси, и затоа оптимизацијата мора внимателно да ги балансира енергетските добивки наспроти генерирањето на ентропија за да се постигнат ефикасни модели на системи.

Исто како и во претходните истражувања, (Чекеровска – *Chekerovska, 2021*; Рамирез-Мингела – *Ramírez-Minguela, 2023*), од страна на Муњоз (*Muñoz, 2020*) претставено е детално истражување за оптимизација на модел на рамен сончев колектор со примена на методата на минимизирање на генерирање на ентропија (*Entropy Generation Minimization – EGM*). Главната цел на истражувањето е да се проектира сончев колектор кој ги минимизира неповратните процеси во системот со намалување на генерирањето на ентропија, поради пренос на топлина, и проток на воздух како работен флуид за пренос на топлина низ колекторот, комбинација која ретко е разгледувана во претходни истражувања. Анализата вклучува примена на *Particle Swarm Optimization – PSO* алгоритам за оптимизација за да се определи оптималниот сет на параметри кои го минимизираат генерирањето на ентропија. Резултатите од симулацијата покажуваат дека бројот на ребра и брзината на протокот на воздух се највлијателните фактори. Иако зголемувањето на бројот на ребра или нивните димензии може да ги подобри топлинските перформанси, тоа исто така го зголемува генерирањето на ентропија. Така, оптимизацијата бара баланс каде што ефикасноста на колекторот е подобрена без значително зголемување на генерирањето на ентропија, постигнувајќи термодинамичка оптимизација.

2.2 Преглед на методи за оптимизација на фотоволтаични панели

По спроведениот преглед и анализа на литературата која се однесува на постоечките истражувања од оваа област може да се заклучи дека секоја од методите за оптимизација на енергетските перформанси на системите за искористување на сончевата енергија претставува комплексен и мултидисциплинарен пристап при што е потребно да се интегрираат повеќе фактори и да се испита влијанието на секој поединечно, за да се овозможи оптимизација, што би придонесло кон значително подобрена ефикасност и одржливост на системот за конверзија на сончевата енергија.

Правилната комбинација на хибридни методи за оптимизација претставува предизвик и сложена задача и може да доведе до потешкотии при пресметки, а дури и до намалување на ефикасноста доколку комбинацијата не е соодветна. Поради овие причини, потребни се понатамошни истражувања за хибридните методи за оптимизација со цел да се земат во предвид комплексноста, предизвиците и да се постигне висока ефикасност кај системите за претворање на сончевата енергија во електрична и/или топлинска енергија.

Оптимизацијата на фотоволтаичните системи е тесно поврзана со климатските фактори како што се сончевото зрачење, температурата, влажноста на воздухот, брзината на ветерот, итн. Скоро во сите разгледани истражувања, а особено потенцирано од Фадил (*Fadil*, 2016) и Антони (*Antony*, 2019), највлијателниот параметар што може да ги промени енергетските карактеристики на фотоволтаичните панели, е температурата. Зголемувањето на температурата доведува до намалување на ефикасноста, и затоа, потребен е соодветен баланс помеѓу температурата на површината на фотоволтаичните панели и влезното сончево зрачење. Како дополнителен проблем се јавуваат пращината и нечистите наноси, кои може да блокираат дел од зрачењето, што доведува до намалување на ефикасноста.

Примената на *IoT (Internet of Things)* техники, како што се автоматско ладење, самопочистување и механизми за следење на Сонцето, што е поддржано од Крисмадината (*Krismadinata*, 2023), е исто така ефективна. Освен тоа, и машинското учење (*Machine Learning – ML*) и генетското програмирање (*Genetic Programming – GP*) активно се применуваат како ефикасни методи за оптимизација на работата на системите за искористување на сончевата енергија, што е потврдено и со резултатите од спроведените истражувања од Рубавати (*Rubavathy*, 2022) и Ковач (*Kovač*, 2016), соодветно.

Формулацијата на функција која опфаќа повеќе критериуми со многу параметри и ограничувања, не претставува едноставна задача што се докажува и со истражувањето спроведено од Сикуао (*Sicuaio*, 2024). Генерално, целта на оптимизацијата на искористувањето на сончевата енергија е да се најдат оптимални решенија во однос на трошоците, големината, оптоварувањето, побарувачката, моќноста и ефикасноста. Затоа, повеќекритериумскиот пристап е неопходен за истовремено задоволување на овие цели. Во секој случај, претставува предизвик да се постигнат две или три оптимални цели, кои се истовремено меѓусебно контрадикторни.

Понатамошните истражувања за методи за оптимизација не само што може да придонесат кон зголемување на ефикасноста на искористување на сончевата енергија, туку може и да обезбедат исплатливо снабдување со енергија, што би резултирало со значителен пораст на капацитетот и производството на системите за производство на електрична и/или топлинска енергија од сончевата енергија во иднина.

Од анализата на примената на методата на минимизирање на генерирање на ентропија (*Entropy Generation Minimization – EGM*) кај системите за искористување на сончевата енергија, што е предмет на истражување во литературата на (Чекеровска –

Chekerovska, 2021; Рамирез-Мингела – *Ramírez-Minguela*; 2023; Муњоз – *Muñoz*, 2020), кај рамните сончеви колектори, може да се заклучи дека истата претставува една од поновите техники во областа на нивна оптимизација и со самото истражување се отвораат нови правци во развојот на напредни технологии кај овие системи врз база на принципот на минимизирање на вкупната ентропија генерирана во еден систем како последица од процесите на конверзија на енергијата.

Како што може да се согледа, за оптимални услови на работа, од клучно значење се климатските фактори како температурата, влажноста, притисокот на воздухот, ултравиолетовото, инфрацрвеното и видливото зрачење кои се директно поврзани со геометриските фактори како што се распоредот на панелите, поставеноста, аголот на наклон, азимутот и елевацијата, со чија оптимизација може да се определат оптималните вредности.

Сепак, во досегашната литература, како што се забележува и во прегледот од страна на Стефаноска (*Stefanoska*, 2026-b), не постојат истражувања во кои е развиен математички модел на фотоволтаичен панел или хибриден сончев колектор каде може да се определи генерирањето на ентропија како последица од влијанието на сите овие климатски фактори, да се изрази со соодветни математички формулации, а потоа да се примени методата на минимизирање на генерирање на ентропија за оптимизација на работата на системот преку прилагодување на геометриските параметри. Според тоа, се отвораат нови можности за идни истражувања кои би се насочиле кон решавање на оваа проблематика со примена на методата на минимизирање на генерирање на ентропија (*Entropy Generation Minimization – EGM*), што е и предмет проучување кај разгледуваниот фотоволтаичен панел во истражувањето спроведено во овој докторски проект.

3. Методи и материјали

Симулациите се изведени за типична метеоролошка година (*Typical Meteorological Year – TMY*) за локација во Битола (Географска ширина: 41.050° N, Географска должина: 21.367° E, Надморска височина: 589 [m]) (*Repository of Building Simulation Climate Data*). Предмет на анализа е едностран монокристален фотоволтаичен панел *Canadian Solar HiKu5 (CS3Y-490MS)*.

Методологијата применета во овој докторски проект претставува надградба на веќе развиениот термодинамички модел за пренос на топлината од апсорбираното сончево зрачење на разгледуваниот фотоволтаичен панел, изведен во претходно истражување на Стефаноска (*Stefanoska*, 2026-c), каде преку физички заснован пристап – базиран на моделот на *Armstrong-Hurley* (Армстронг – *Armstrong*, 2010) – детално се анализирани механизмите на пренос на топлина (кондукција, конвекција и зрачење) во зависност од аголот на наклон, врз основа на реални часовни климатски податоци за типична метеоролошка година за истата локација во Битола. Според веќе потврдена валидност на овој модел, во продолжение истиот е применет како основа за воведување на ентрописки биланс на системот, при што геометриските параметри на панелот (аголот на наклон и азимут) дополнително се оптимизираат со примена на генетски алгоритам.

При примена на алгоритмот за оптимизација во програмскиот јазик *Python*, а тоа е методата на минимизирање на генерирање на ентропија (*Entropy Generation Minimization – EGM*) во комбинација со генетски алгоритам (*Genetic Algorithm – GA*), оптималните вредности за агол на наклон и азимут на фотоволтаичниот панел се добиваат врз основа на

поставени тежински коефициенти за енергијата, ефикасноста и генерираната ентропија. Оптимизацијата се применува за:

- Азимут на фотоволтаичниот панел (ориентација на панелот во однос на страните на светот): при примена на алгоритмот за оптимизација се пребарува низ целиот опсег $[0^\circ, 360^\circ]$.
- Агол на наклон на фотоволтаичниот панел: при примена на алгоритмот за оптимизација аголот на наклон е во опсег $[0^\circ, 90^\circ]$.

Валидација на применетиот модел е спроведена со помош на референтна база на податоци *PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System)* (*European Commission, Joint Research Centre*).

3.1 Модел за пренос на топлината од апсорбираното сончево зрачење и генерирање на ентропија кај фотоволтаичниот панел

За потребите на истражувањето спроведено во овој докторски проект, вкупното сончево зрачење апсорбирано од фотоволтаичниот панел со локација во Битола се пресметува според моделот на *Hay-Davies* (Калогиру – *Kalogirou*, 2009):

$$G_t = (G_{Bn} \cdot \cos \theta_z + G_D \cdot A_T) \cdot R_B + (G - G_{Bn} \cdot \cos \theta_z) \cdot (1 - A_T) \cdot \frac{(1 + \cos \beta)}{2} + \rho_G \cdot (G_{Bn} \cdot \cos \theta_z + G_D) \cdot \frac{(1 - \cos \beta)}{2} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (3.1)$$

G_{Bn} – директна компонента на сончевото зрачење $[W/m^2]$

θ_z – зенит (аголот помеѓу сончевите зраци и вертикалата – зенитот) $[^\circ]$

G_D – дифузна компонента на сончевото зрачење $[W/m^2]$

A_T – анизотропен индекс (способност на атмосферата да пропушта директно зрачење) $[-]$

R_B – фактор на наклон на директно сончево зрачење $[-]$

G – вкупно сончево зрачење на хоризонтална површина $[W/m^2]$

β – агол на наклон на панел $[^\circ]$

ρ_G – рефлексивност на површината на земјата (се користи 0.20 (Делин – *Deline*, 2019)) $[-]$

Доколку се земе во предвид коефициентот на апсорпција на површината на панелот (α_A) (Сантберген – *Santbergen*, 2008), вкупната влезна топлинска енергија за фотоволтаичниот панел се пресметува според равенката:

$$Q_{in} = \alpha_A \cdot A \cdot G_t [W] \quad (3.2)$$

α_A – коефициент на апсорпција на површината на панелот (се користи 0.90 (Сантберген – *Santbergen*, 2008)) $[-]$

A – површина на панелот $[m^2]$

Температурата на површината на фотоволтаичниот панел се пресметува според емпириската равенка (Барди – *Bardhi*, 2012):

$$T_{PV} = T_a + \frac{G_t}{800} \cdot (T_{НОСТ} - 20) [^\circ C] \quad (3.3)$$

T_a – температура на воздухот $[^\circ C]$

$T_{НОСТ}$ – номинална работна температура на панелот (според производител $42 \pm 3 [^\circ C]$) $[^\circ C]$

Температурата на задната површина од панелот се пресметува како (Армстронг – *Armstrong*, 2010):

$$T_b = T_{PV} - \frac{G_t}{1000} \cdot \Delta T [^\circ C] \quad (3.4)$$

ΔT – температурна разлика помеѓу предната и задната површина при сончево зрачење од 1000 [W/m²] (усвоена за 3 [°C] врз основа на веќе спроведени истражувања) (Армстронг – *Armstrong*, 2010; Оземоја – *Ozemoja*, 2013) [°C]

За часови со многу мало сончево зрачење $G_t < 30$ [W/m²], се поставува $T_{PV} \approx T_a$.

Ефикасноста на фотоволтаичниот панел се пресметува според (Тивари – *Tiwari*, 2010):

$$\eta = \eta_{ref} \cdot [1 - \beta_T \cdot (T_{PV} - T_{ref})] \quad (3.5)$$

η_{ref} – референтна ефикасност на панелот (20.8% според податоците од производителот) [-]

β_T – температурен коефициент (според производител 0.0034 [1/°C]) [1/°C]

T_{ref} – референтна температура на панелот (25 [°C] според спецификациите за панелот) [°C]

Електричната излезна моќност на фотоволтаичниот панел може да се пресмета како:

$$P_{el} = \eta \cdot Q_{in} [W] \quad (3.6)$$

Или, доколку се замени изразот за влезното сончево зрачење:

$$P_{el} = \eta \cdot \alpha_A \cdot A \cdot G_t [W] \quad (3.7)$$

Врз основа на ова се пресметува и вкупното производство на електрична енергија.

Механизмите на пренос на топлина кај фотоволтаичниот панел се пресметуваат за понатамошна пресметка на вкупното генерирање на ентропија:

- Кондукција – размена на топлина помеѓу предната и задната страна на панелот со примена на *Fourier*-овиот закон за композитни сидови со пресметан целокупен коефициент на спроведување на топлина (Инкропера – *Incropera*, 2011).
- Конвекција – моделирана со *Armstrong-Hurley* модел кој е примелив за надворешни површини изложени на ветер (Армстронг – *Armstrong*, 2010), со земање во предвид на природна и присилна конвекција зависно од брзината на ветерот, температурата и аголот на наклон. Конвективните коефициенти на пренесување на топлина се определуваат со помош на зависности со *Reynolds*-ов, *Nusselt*-ов, *Grashof*-ов, *Prandtl*-ов, *Rayleigh*-ев број, овозможувајќи точен приказ на преносот на топлина при различни атмосферски услови. Термофизичките својства на воздухот (густина, динамичка вискозност, топлинска спроводливост, специфичен топлински капацитет), кои се користат при пресметката на бездимензионалните броеви, се определуваат како функции од температурата и релативната влажност на воздухот со примена на библиотеката *CoolProp* во *Python* (Бел – *Bell*, 2014).
- Зрачење – пресметка со помош на *Stefan-Boltzmann*-овиот закон со фактори на гледање кон небото и земјата, за предната и задната страна на панелот (Армстронг – *Armstrong*, 2010).

Вкупното генерирање на ентропија поради неповратните процеси се пресметува:

$$\begin{aligned} S_{gen} = & Q_{cond} \left(\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_{PV}} \right) + Q_{conv,front} \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_{PV}} \right) + Q_{conv,rear} \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_b} \right) + Q_{rad,front-sky} \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_{PV}} \right) \\ & + Q_{rad,rear-sky} \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_b} \right) + Q_{rad,front-ground} \left(\frac{1}{T_g} - \frac{1}{T_{PV}} \right) \\ & + Q_{rad,rear-ground} \left(\frac{1}{T_g} - \frac{1}{T_b} \right) \left[\frac{W}{K} \right] \end{aligned} \quad (3.8)$$

Q_{cond} – загуби на топлина поради кондукција во внатрешните слоеви на панелот [W]

$Q_{conv,front}$ – загуби на топлина поради конвекција од предната површина на панелот [W]

$Q_{conv,rear}$ – загуби на топлина поради конвекција од задната површина на панелот [W]

$Q_{rad,front-sky}$ – загуби на топлина поради зрачење кон небото од предната површина на панелот [W]

$Q_{rad,rear-sky}$ – загуби на топлина поради зрачење кон небото од задната површина на панелот [W]

$Q_{rad,front-ground}$ – загуби на топлина поради зрачење кон земјата од предната површина на панелот [W]

$Q_{rad,rear-ground}$ – загуби на топлина поради зрачење кон земјата од задната површина на панелот [W]

T_s – температура на небото (Митаг – *Mittag*, 2019) [K]

T_g – температура на земјата која се усвојува дека е еднаква на температурата на воздухот (за која се усвојува да е иста на сите страни од панелот) (Армстронг – *Armstrong*, 2010) [K]

За часови со многу мало сончево зрачење ($G_t < 30$ [W/m²]), S_{gen} се пресметува како последица на зрачењето кое се јавува од површината на панелот и поради преносот на топлина со кондукција во внатрешноста на панелот, додека конвекцијата се занемарува.

Ентропискиот број се добива од односот (Бејан – *Bejan*, 1996):

$$N_s = \frac{S_{gen}}{S_{min}} \quad (3.9)$$

S_{min} – минимална вредност на генерираната ентропија [W/K]

Во имплементацијата, се пресметува S_{gen} на часовно ниво, а потоа се пресметува на дневно/месечно/годишно ниво за дадена конфигурација (наклон, азимут) = (β, ϕ_p) . S_{min} е минималната генерирана ентропија помеѓу сите конфигурации (β, ϕ_p) кои се анализираат со помош на генетскиот алгоритам за оптимизација. Според тоа, $N_s \geq 1$ за сите конфигурации.

3.2 Оптимизација на фотоволтаичниот панел по пат на EGM со примена на генетски алгоритам (Genetic Algorithm – GA)

Оптималната ориентација на фотоволтаичниот панел – аголот на наклон и азимут се определуваат со примена на генетски алгоритам (*Genetic Algorithm – GA*) имплементиран во *Python* со библиотеката *DEAP (Distributed Evolutionary Algorithms in Python)*. Овој пристап е соодветен затоа што задачата е нелинеарна, зависи од часовни климатски податоци и има повеќе цели кои меѓусебно се судираат. Алгоритмот определува популација на можни решенија и постепено се насочува кон конфигурации што истовремено придонесуваат големо производство на енергија и ефикасност, а мало генерирање ентропија.

Секој кандидат во популацијата претставува пар од реални броеви (наклон, азимут) = (β, ϕ_p) . Во кодот во *Python* тие се ограничени на агол на наклон во опсег $[0,90]$ и азимут во опсег $[-180,180]$ (односно се пребарува низ целиот опсег), а почетната популација се создава случајно. Оценувањето на квалитетот на секој кандидат се спроведува со една скаларна величина која ги балансира трите целни величини. Енергијата и ефикасноста се нормализираат според референтно поставување, а исто така и ентропијата. Се дефинира целна функција, со тежински коефициенти – w_E, w_η, w_S (кои овозможуваат различни приоритети во оптимизацијата и нивниот збир треба да е еднаков на еден), во која енергијата има доминантна тежина, ефикасноста средно влијае врз изборот, додека суштинската цел е максимизирање на енергијата и ефикасноста, за сметка на минимизирање на ентропијата.

Вака поставената целна функција овозможува едноставно споредување на кандидатите и стабилна конвергенција по генерации.

$$F(\beta, \phi_p) = -(w_E \cdot E_{norm} + w_\eta \cdot \eta_{norm}) + w_S \cdot S_{norm} \quad (3.10)$$

Во целната функција, величините E_{norm} , η_{norm} и S_{norm} се применуваат за нормализација и се пресметуваат на следниот начин:

$$E_{norm} = \frac{E(\beta, \phi_p)}{E_{ref}} \quad \eta_{norm} = \frac{\eta(\beta, \phi_p)}{\eta_{ref}} \quad S_{norm} = \frac{S(\beta, \phi_p)}{S_{ref}} \quad (3.11)$$

каде што величините во броителот се конкретните разгледувани вредности за произведената електрична енергија, ефикасноста и ентропијата, додека величините во именителот се соодветните референтни вредности, дадени во Табела 1, добиени за референтен агол на наклон за разгледуваната локација од 24° и референтен азимут од 180° (југ), дефинирани врз основа на веќе спроведени истражувања за разгледуваниот регион, како што е истражувањето на Арсова (Arsova, 2023).

Почетната популација е случајна, по што следува повторувачки циклус на селекција, вкрстување и мутација. Селекцијата ги зема во предвид подобрите кандидати според целната функција; вкрстувањето создава нови генерации со комбинирање на параметрите од претходните; мутацијата додава мали поместувања на аглиите со што се истражуваат нови области од просторот на решенија. Процесот на селекција, вкрстување и мутација се повторува во повеќе генерации, сè додека не се постигне стабилна популација и се достигне максималниот број на генерации (во случајот, 40). По завршувањето на зададениот број генерации се избира решение со најмала вредност на целната функција. Резултатот е пар агли што даваат оптимален баланс според зададените тежини: големо годишно производство и поволна средна ефикасност, а истовремено намалено генерирање ентропија.

Оптимизацијата се спроведува со разгледување на пет различни варијанти со различни тежински коефициенти, како што е претставено во Табела 1. Целта е не само да се определат оптималните агол на наклон и азимут еднаш, туку да се изработи целосно множество на оптимални решенија во просторот дефиниран со енергија, ефикасност и ентропија. На овој начин, наместо едно решение, се добива цел спектар на можни комбинации што ја прикажуваат рамнотежата помеѓу максимизирањето на енергијата и ефикасноста и минимизирањето на ентропијата.

Првата варијанта претставува чисто максимално производство на енергија, втората варијанта повторно е насочена кон енергијата; третата и четвртата варијанта се со поголема тежина на ентропијата или на ефикасноста за да се испита колку аголот на наклон и азимутот се поместуваат кога се бара помала дисипација на топлина или поголема просечна ефикасност; петтата варијанта е со најголема тежина на намалување на ентропијата и со поголем пад на производството на енергија, што резултира со ориентација подалеку од класичниот југ (180°) и значително помалку генерирана ентропија.

β	ϕ_p	E_{ref}	η_{ref}	S_{ref}	Варијанта	w_E	w_η	w_S
					1	1	0	0
[°]	[°]	[kWh]	[-]	[J/K]	2	0.75	0.10	0.15
					3	0.60	0.10	0.30
24	180	757.2	0.209	3020127.551	4	0.55	0.20	0.25
					5	0.45	0.15	0.40

Табела 1: Референтни вредности и тежински коефициенти по варијанти

Првата варијанта е исклучиво насочена кон максимизирање на годишната електрична енергија, со тежински коефициенти за целната функција $(w_E, w_\eta, w_S) = (1, 0, 0)$. Ова ја нагласува потребата, во следните варијанти, да се вклучат и ограничувања (тежини) за ефикасноста и ентропијата (повеќекритериумски пристап), доколку целта не е само максимално производство на енергија туку и подобра термодинамичка состојба на процесот.

Во втората варијанта доминира максимизирањето на годишното производство на електрична енергија. Конкретно, тежинските коефициенти се $(w_E, w_\eta, w_S) = (0.75, 0.10, 0.15)$.

Во третата варијанта генетскиот алгоритам е поставен за поголема тежина на ограничување на генерирањето на ентропија, со коефициенти $(w_E, w_\eta, w_S) = (0.60, 0.10, 0.30)$.

Четвртата варијанта е поставена со тежински коефициенти за целната функција $(w_E, w_\eta, w_S) = (0.55, 0.20, 0.25)$, односно умерено се дава приоритет на годишното производство на електрична енергија, додека ефикасноста и генерирањето на ентропија добиваат поголема улога отколку во сценаријата ориентирани исклучиво кон енергија. Четвртото сценарио претставува рамнотежа помеѓу производството на енергија и термодинамичките неповратни процеси.

Во петтата варијанта целната функција е со тежини $(w_E, w_\eta, w_S) = (0.45, 0.15, 0.40)$, односно со најголем акцент на намалување на генерирањето на ентропија, умерен приоритет на годишното производство на енергија и дополнителна стабилизација со зададена тежина и на ефикасноста.

4. Резултати и дискусија

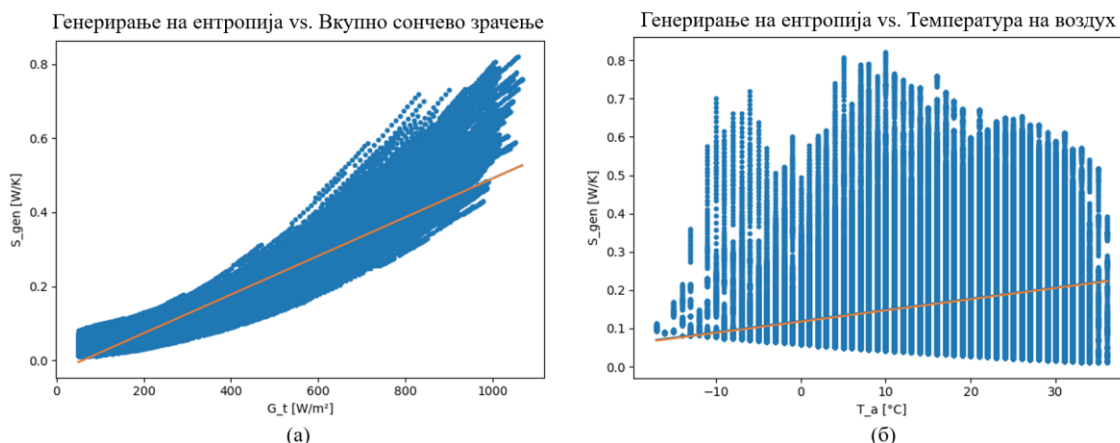
4.1 Имплементација и симулација

Врз основа на претставениот модел за сончево зрачење на површината на фотоволтаичниот панел, како и термодинамичкиот модел за пренос на топлина т.е. топлинските процеси кои се одвиваат и генерираната ентропија кај разгледуваниот фотоволтаичен панел, поставен во Битола за потребите на истражувањето спроведено во овој доктроски проект, со примена на податоците за типична метеоролошка година (*Typical Meteorological Year – TMY*), во продолжение е направена анализа на добиените резултати од имплементацијата.

Графикон 1 (а) прикажува правопрпорционална и конвексна зависност – со зголемување на сончевото зрачење на површината на панелот добиено врз основа на применетиот модел на *Hay-Davies* за сончево зрачење (Калогире – *Kalogirou*, 2009) и симулација со климатски податоци за локација во Битола за типична метеоролошка година, генерирањето на ентропија се зголемува. Закривеноста која се појавува е очекувана врз основа на физичките закони и претходно спроведени истражувања. Топлинските загуби, пресметани според моделот развиен за потребите на ова истражување, кои придонесуваат кон генерирање на ентропија, се зголемуваат нелинеарно. Во зоната $G_t < 300 \text{ [W/m}^2\text{]}$ расејувањето е мало односно панелот е поладен, па според тоа следува дека и генерирањето на ентропија е помало. За $G_t > 600 \text{ [W/m}^2\text{]}$ се јавува поголемо расејување на дијаграмот.

Графикон 1 (б) покажува многу големо расејување и мал пораст генерираната ентропија со зголемување на температурата на воздухот за локација на фотоволтаичниот панел во Битола. Најголеми вредности за генерираната ентропија се јавуваат околу $5\text{--}15 \text{ [}^\circ\text{C]}$, што е индиректен показател дека во тие услови често има големо сончево зрачење. При температури на околината помали од $-10 \text{ [}^\circ\text{C]}$, генерираната ентропија е помала – делумно поради зголемено конвективно ладење и почесто помало сончево зрачење на површината на

панелот. При температури на околината поголеми од 25-30 [°C] генерираната ентропија повторно опаѓа, што најчесто е сезонски ефект во согласност со повеќе заклучоци од претходни испитувања во оваа област.



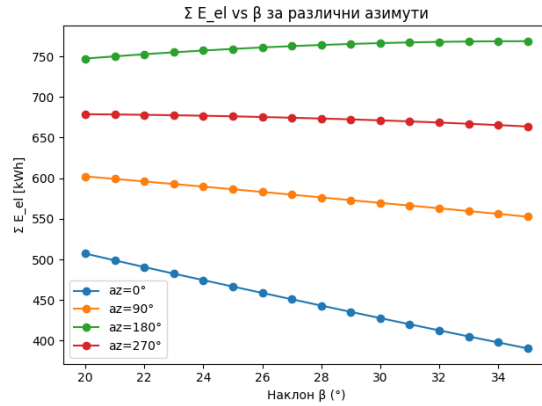
Графикон 1: Зависност на генерирањето на ентропија од, (а) сончевото зрачење, (б) температурата на воздух

Во продолжение се анализира зависноста на годишното производство на електрична енергија (E_{el}) (Графикон 2), годишното генерирање на ентропија (S_{gen}) (Графикон 3) и бездимензионалниот ентрописки број (N_s) (Графикон 4), од аголот на наклон (β) за четири фиксни азимути (0°, 90°, 180°, 270°).

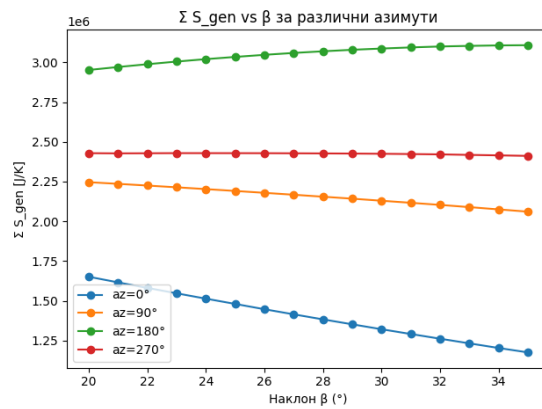
Со анализа на добиените резултати од спроведената симулација се добива јасна слика за рамнотежата помеѓу енергетското производство и термодинамичките неповратни процеси. За постигнување на целта за максимално произведена енергија, оптималниот избор е југ со поголем агол на наклон (околу 30-35°). Доколку целта е минимално генерирање на ентропија, тогаш северна ориентација со поголем агол на наклон овозможува најмало генерирање на ентропија и ентрописки број, но со недоволен енергетски биланс. При повеќекритериумски избор, каде се бара баланс помеѓу максимизирање на производството на електрична енергија и минимизирање на генерирањето на ентропија, оптимален избор е панел насочен кон југ-југозапад со агол на наклон со средна големина (приближно околу 27-33°).

Доколку критериумот е минимизирање на ентропискиот број, агол на наклон од 35° и северно ориентиран панел претставуваат оптимална конфигурација, но со најмало годишно енергетско производство што не е практично применливо. Од друга страна, доколку приоритет е максимизирање на годишното производство на енергија, намалувањето на аголот на наклон кон 26° видливо го зголемува производството на енергија, иако придружено со поголемо генерирање на ентропија.

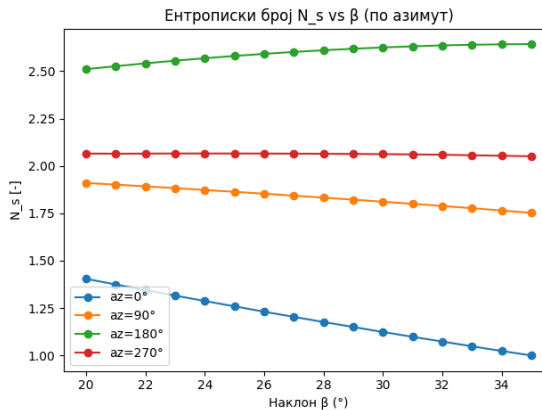
Во секој случај, конечниот избор потребно е да биде донесен во рамките на повеќекритериумска оптимизација, каде тежините за енергија, ефикасност и ентропија се јасно дефинирани во согласност со целите на системот, а секако дека чисто северно ориентиран панел не е погодна и прифатлива опција за реална примена.



Графикон 2: Промена на производството на енергија во зависност од агол на наклон и азимут



Графикон 3: Промена на ентропијата во зависност од агол на наклон и азимут



Графикон 4: Промена на ентрописки број во зависност од агол на наклон и азимут

4.2 Валидација на модел

За валидација на развиениот модел е направена споредба помеѓу резултатите од петте варијанти со примена на генетски алгоритам за оптимизација и симулација со *PVGIS* (*Photovoltaic Geographical Information System*) (*European Commission, Joint Research Centre*) (база на податоци *SARAH-3*, технологија *crystalline-silicon*). Во *PVGIS*, за координатите на локацијата и инсталирана моќност од 0.49 [kWp], добиени се (Слика 1): оптимален наклон 34°, азимут -7°, годишно производство на енергија од 766.06 [kWh] и сончево зрачење од

1745.73 [kWh/m²]. Наведената база *SARAH-3* е оперативен климатолошки производ развиен од *EUMETSAT/CM SAF* и служи како основен извор на влезни податоци за сончево зрачење во *PVGIS* (Кени – Kanny, 2006).

Provided inputs:	
Location [Lat/Lon]:	41.032,21.331
Horizon:	Calculated
Database used:	PVGIS-SARAH3
PV technology:	Crystalline Silicon (original)
PV installed [kWp]:	0.49
System loss [%]:	1
Simulation outputs:	
Slope angle [°]:	34 (opt)
Azimuth angle [°]:	-7 (opt)
Yearly PV energy production [kWh]:	766.06
Yearly in-plane irradiation [kWh/m ²]:	1745.73
Year-to-year variability [kWh]:	27.89
Changes in output due to:	
Angle of incidence [%]:	-2.74
Spectral effects [%]:	0.93
Temperature and low irradiance [%]:	-7.85
Total loss [%]:	-10.44

Слика 1: Влезни податоци и резултати од симулација со *PVGIS SARAH-3* за валидација на модел

Кога *GA* е насочен претежно кон енергија (првата варијанта), добиеното оптимално решение е $\beta \approx 36.6^\circ$, $\phi_p \approx 203^\circ$ и производството на електрична енергија 783 [kWh]. Овој износ е само 2.2% поголем од предвидувањето на *PVGIS* (766.06 [kWh]), што укажува на добра согласност на моделот по годишна енергија. Освен тоа, оптималниот наклон предложен од *GA* (35-37°) се приближува до наклонот добиен со *PVGIS* од 34°. Разликата во препорачаниот азимут е мала т.е. и двата пристапи упатуваат на ориентација многу блиска до југ, со мало отстапување кон југозапад/југоисток.

Доколку се сумираат резултатите, прво, второ, трето и четврто сценарио, даваат годишно производство на енергија во опсег од 769-783 [kWh], односно во рамките од 0.4% до 2.2% во однос на резултатите добиени од *PVGIS*. Оваа отстапување е прифатливо и независно од мали промени во тежинските коефициенти, што ја потврдува веродостојноста на моделот.

Може да се заклучи дека моделот е валидиран и по апсолутното енергетско производство и по различните зависности, во согласност со широко прифатен софтвер (*PVGIS/SARAH-3*). Ова обезбедува солидна основа оптималните агол на наклон и азимут добиени со *GA* да се применуваат како веродостојни годишни препораки за локацијата.

4.3 Анализа на постигнати резултати од применетиот модел за оптимизација

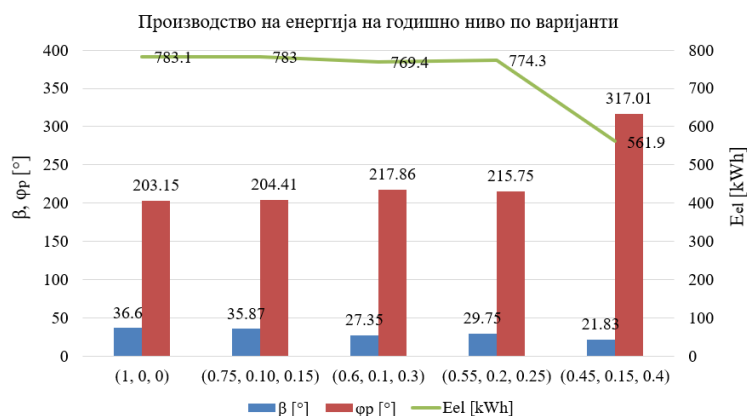
По потврдената веродостојност и применливост на развиениот модел за потребите на истражувањето спроведено во овој докторски проект, во продолжение е претставена детална анализа на резултатите добиени за сите пет варијанти од оптимизацијата.

Табела 2 претставува рекапитулација на постигнатата оптимизација на фотоволтаичниот панел за сите пет варијанти. Резултатите се прикажани графички на Графикон 5 – производство на енергија на годишно ниво, Графикон 6 – просечна годишна ефикасност и Графикон 7 – генерирана ентропија на годишно ниво.

Ако целта е максимално годишно производство на енергија, препораката за агол на наклон се движи околу 36° и ориентација блиска до југ со мало отстапување кон југозапад, со производство од 783 [kWh], што е усогласено со вредноста добиена од *PVGIS*. Ако проектните критериуми бараат намалување на ентропискиот биланс и топлинското оптоварување без големо намалување на производството на енергија, решенијата со агол на наклон од $27\text{--}30^\circ$ и азимут од $215\text{--}218^\circ$ покажуваат скоро идентично годишно производство и помалку генерирана ентропија. Само кога е зададен значително голем приоритет на ентропијата се добива голем пад на производството.

Варијанта	(1, 0, 0)	(0.75, 0.10, 0.15)	(0.6, 0.1, 0.3)	(0.55, 0.2, 0.25)	(0.45, 0.15, 0.4)
β [°]	36.6	35.87	27.35	29.75	21.83
ϕ_p [°]	203.15	204.41	217.86	215.75	317.01
E_{el} [kWh]	783.1	783	769.4	774.3	561.9
η [-]	0.2084	0.2084	0.2085	0.2084	0.2105
S_{gen} [J/K]	3144802.935	3140507.860	3016479.460	3056121.709	1836136.867

Табела 2: Рекапитулација на постигната оптимизација на фотоволтаичниот панел за сите пет варијанти

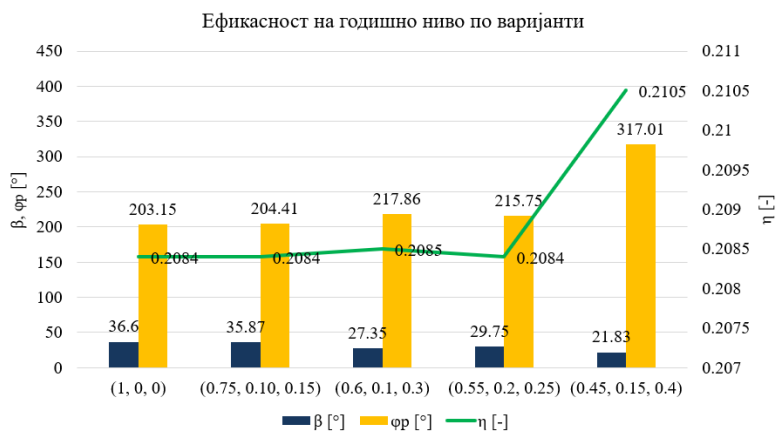


Графикон 5: Производство на енергија на фотоволтаичниот панел на годишно ниво по варијанти

При анализа на Графикон 5, може да се забележи дека кога приоритет е само енергијата, првата варијанта (w_E, w_η, w_S) = (1,0,0) придонесува до агол на наклон од 36.6° и азимут од 203.15° , што е типична геометриска поставеност за максимално годишно сончево зрачење на наклонета површина. Производството на енергија изнесува 783.1 [kWh] со генерирана ентропија од $3.145 \cdot 10^6$ [J/K]. Повеќекритериумска корекција со тежински коефициенти од (w_E, w_η, w_S) = (0.75,0.10,0.15) резултира со речиси идентични геометриски параметри, агол на наклон од 35.87° и азимут од 204.41° и производство од 783.0 [kWh], што е за 0.01% помало во однос на максималните, но со незабележливо подобрување во намалувањето на минимизирањето на генерирање на ентропија (-0.14%). Според тоа, доколку целта е мало намалување на генерирањето на ентропија без значителни енергетски загуби, изборот на овие тежински коефициенти е прифатлив.

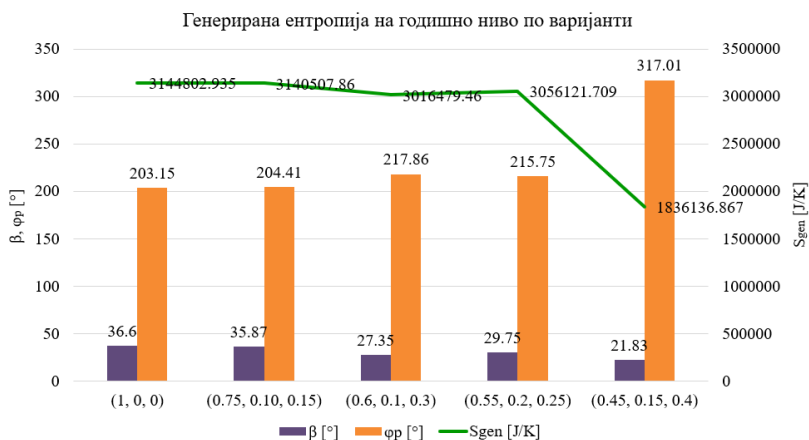
Од Графикон 6, може да се согледа дека ефикасноста останува константна (0.208-0.211) низ сите разгледувани варијанти. Ова покажува дека алгоритмот, со промената на ориентацијата, пред сè ја прераспределува апсорбираната енергија на сончевото зрачење и топлинскиот режим, без суштински да ги менува перформансите на панелот. Затоа,

клучната рамнотежа е помеѓу годишната произведена електрична енергија и генерираната ентропија (неповратните процеси), при мала чувствителност на ефикасноста.



Графикон 6: Ефикасност на фотоволтаичниот панел на годишно ниво по варијанти

Кога тежинскиот коефициент на ентропијата се зголемува (Графикон 7), како кај $(w_E, w_\eta, w_S) = (0.60, 0.10, 0.30)$ и $(w_E, w_\eta, w_S) = (0.55, 0.20, 0.25)$, геометриски параметри кои се оптимизираат се поместуваат кон помал агол на наклон (27 - 30°) и позападна ориентација (216 - 218°). Во споредба со првата варијанта $(w_E, w_\eta, w_S) = (1, 0, 0)$, за $(w_E, w_\eta, w_S) = (0.60, 0.10, 0.30)$ се добива енергија од 769.4 [kWh] (-1.75%) и ентропија од $3.016 \cdot 10^6$ [J/K] (-4.08%), додека $(w_E, w_\eta, w_S) = (0.55, 0.20, 0.25)$ е со производство на енергија од 774.3 [kWh] (-1.12%) и генерирана ентропија од $3.056 \cdot 10^6$ [J/K] (-2.82%). Според овие случаи, со релативно мало опаѓање на производството на енергија во однос на првото сценарио (од околу 1 - 2%) се добива од 3 - 4% редукација на генерирањето на ентропија.



Графикон 7: Генерирана ентропија на фотоволтаичниот панел на годишно ниво по варијанти

Кога намалувањето на ентропијата е голем приоритет (Графикон 7), како кај $(w_E, w_\eta, w_S) = (0.45, 0.15, 0.40)$, оптималното решение се поместува кон агол на наклон од 21.83° и азимут од 317° . Резултатот е значително намалување на ентропијата која се генерира, и тоа на $1.837 \cdot 10^6$ [J/K] (околу -41.6% во однос на првата варијанта) но за сметка на значителен пад на производството до 561.9 [kWh], што е околу -28.3% во споредба со $(w_E, w_\eta, w_S) = (1, 0, 0)$. И покрај тоа што ефикасноста е најголема (0.2105) поради поладни услови и поумерено сончево зрачење, енергетските загуби се многу големи за оперативна примена.

Ова сценарио потенцира дека минимизирањето на генерирање на ентропија само по себе не е доволен критериум ако производството е главна цел.

Во споредба со сценариото каде приоритет се дава само на енергијата (w_E, w_η, w_S) = (1,0,0): сценариото (w_E, w_η, w_S) = (0.75,0.10,0.15) е со намалување на енергетското производство за околу -0.01% и со пад на ентропијата од приближно -0.14% и е скоро идентично; потоа, сценариото (w_E, w_η, w_S) = (0.55,0.20,0.25) е со намалено производство од приближно -1.12% и намалена ентропија од околу -2.82% како многу поволен баланс; понатаму, следното сценарио (w_E, w_η, w_S) = (0.60,0.10,0.30) оди чекор понатаму во намалување на генерираната ентропија (-4.08%), но со поголем пад на производството на енергија (-1.75%); додека (w_E, w_η, w_S) = (0.45,0.15,0.40) претставува ентрописки поволна опција, но енергетски неприфатлива. Бидејќи во секој случај производството на енергија е приоритет, оперативниот избор се сведува на (w_E, w_η, w_S) = (1,0,0) или (w_E, w_η, w_S) = (0.75,0.10,0.15). Притоа, втората варијанта обезбедува подобрување на намалувањето на генерираната ентропија без реално намалување на енергијата и затоа е погоден избор. Доколку е потребно да се обезбеди и помало ентрописко оптоварување без да се наруши значително производството, варијантата (w_E, w_η, w_S) = (0.55,0.20,0.25) е балансирано оптимално решение – има загуба само околу 1% во [kWh], а се добива приближно 3% редукција на генерираната ентропија.

Може да се заклучи дека:

- максимизирањето на енергијата придонесува кон најголема произведена електрична енергија, но истовремено и најголеми неповратни процеси;
- ентропијата како критериум за оптимизација овозможува значително подобрување на термодинамичките перформанси со минимални енергетски загуби;
- многу големи тежини на ентропијата придонесуваат кон неповолни решенија од практична гледна точка, со значителна редукција на енергијата;
- балансираниот пристап се издвојува како оптимален за практична примена, бидејќи ги комбинира и енергетските и термодинамичките цели на методата на минимизирање на генерирање на ентропија.

Како понатамошни разгледувања за целосна оправданост на методологијата препорачлива е проверка на моделот за повеќе години, ограничувањата на локацијата, сеопфатна економска анализа, како и можноста за промена на аголот на наклон (имплементација на системи за следење на Сонцето) барем два пати годишно што често нуди уште подобар резултат. На тој начин, примената на алгоритмот за минимизирање на генерирање на ентропија ќе биде усогласена со примарната цел, а тоа е големо и стабилно производство на електрична енергија, обезбедувајќи рационална рамнотежа помеѓу енергетските добивки и долгорочните термодинамички неповратни процеси.

5. Заклучок

Во овој докторски проект претставена е методологија за оптимизација на фотоволтаичен панел која ја комбинира термодинамичката метода на минимизирање на генерирање на ентропија (*Entropy Generation Minimization – EGM*) со повеќекритериумски пристап за оптимизација, заснован на генетски алгоритам (*Genetic Algorithm – GA*). Главниот придонес на оваа методологија е во тоа што, од една страна, формулиран е физички модел што истовремено ги пресметува годишното производство на електрична енергија, просечната ефикасност и вкупното генерирање на ентропија, а од друга страна,

демонстрирано е дека со доделување на различни тежини на поставените критериуми кај целната функција на генетскиот алгоритам може да се направи соодветен баланс помеѓу максималното енергетско производство и минималните неповратни процеси, изразени преку ентропијата. Ваквата интеграција на *EGM* со *GA* овозможува аголот на наклон и азимутот, да се оптимизираат врз основа на часовни климатски податоци за типична метеоролошка година (*TMU – Typical Meteorological Year*) и реално предвидени топлински загуби со помош на сеопфатен термодинамички модел (кондукција, конвекција и зрачење).

Серијата од пет независни сценарија за оптимизација со различни тежински коефициенти за целната функција формира јасна слика за рамнотежата помеѓу различните критериуми. Кога критериумот за енергија доминира, оптималната геометријска поставеност на фотоволтаичниот панел е приближна до јужна ориентација со умерено поголем наклон, што го максимизира годишното енергетско производство и ја задржува ефикасноста во поволни граници, но води кон поголемо вкупно генерирање на ентропија поради поголеми температурни градиенти во услови на големо сончево зрачење на површината на панелот. Како што тежинските коефициенти постепено се поместуваат кон намалување на ентропијата, решението се движи кон помали агли на наклон и поизразени отстапувања по азимут, што придонесува кон значително намалување на генерираната ентропија и пад на производството на енергија.

Оптимално балансираните решенија обезбедуваат стабилна просечна ефикасност и умерена вредност на годишното производство на енергија, а притоа редуцирана ентропија во однос на чисто енергетскиот максимум. Оваа градација по тежини покажува дека предложениот пристап не дава едно решение, туку комплетна слика на можни решенија, што овозможува избор на режим соодветен за конкретни приоритети: максимално производство, минимални неповратни топлински процеси или конфигурација која е во рамнотежа.

Валидација на применетиот модел е извршена врз основа на споредба со референтна база на податоци *PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System)* на годишно ниво што покажува усогласени резултати по агол на наклон и азимут и мали апсолутни разлики во производството, што е очекувано со оглед на различните климатски бази и претпоставки за загуби. Ова потврдува дека моделот е соодветно параметризиран, а оптимизацијата преку *GA* наоѓа решенија кои се во согласност со физичките закони и практично применливи.

Еден од клучните заклучоци е дека генерирањето на ентропија е корисен индикатор за квалитетот на конверзијата на сончевата енергија и за топлинското оптоварување на фотоволтаичниот панел. Намалувањето на генерирањето на ентропија не претставува само термодинамичка цел, туку може да биде поврзано со поумерени работни температури на панелот и потенцијално со побавно застарување на панелот, што индиректно придонесува за одржливост на енергетското производство во текот на животниот циклус.

И покрај тоа, постојат ограничувања што треба да се потенцираат. Моделот е разработен врз основа на фиксни геометријски параметри без интегриран систем за следење на Сонцето, каде што оптималната конфигурација може значително да се промени. Освен тоа, не постои ниту систем за ладење на панелот. Потоа, локалните влијанија како сенки, нечистотии на површината на панелот и сезонски промени на коефициентот на рефлексија, промената на релативната влажност и притисокот на атмосферскиот воздух не се експлицитно моделирани. Температурата на панелот, како клучна влезна големина за ентропискиот биланс, е пресметана со поедноставен, но често користен модел во литературата и праксата. Понатаму, примената на податоци за типична метеоролошка

година го ограничува моделот, бидејќи истата прикажува просечни климатски услови и не ги опфаќа екстремните и краткотрајните промени што можат значително да влијаат врз реалните перформанси на фотоволтаичниот панел. Прецизно спроведени мерења со точно подесени мерни инструменти, како и дополнителни искусствени податоци би можеле да ја намалат неизвесноста во резултатите. Дополнително, генетскиот алгоритам, како стохастичка метода, не може секогаш да гарантира апсолутно глобално оптимално решение. Сепак, конзистентноста на петте оптимизации и стабилната конвергенција на целната функција по генерации укажуваат дека добиените резултати се приближуваат до оптимални решенија.

Во поглед на понатамошни разгледувања, препорачливо е проширување на моделот кон оптимизација со повеќе параметри која вклучува и економски критериуми, како пазарната вредност на енергијата, енергетските трошоци и парично вреднување на загубите, со што би се добила една комбинирана техно-економска и термодинамичка оптимизација. Понатаму, корисно е да се применат мерени податоци за температурата на панелот, брзината на ветер на локацијата, релативната влажност и притисокот на атмосферскиот воздух, како и да се разгледаат сценарија со делумно засенување и нечистотии на површината на панелот. Исто така, проширувањето кон распоред со повеќе редови со ограничувања за меѓусебно засенување би ја зголемило применливоста на моделот.

Во секој случај, може да се заклучи дека примената на методата на минимизирање на генерирање на ентропија (*Entropy Generation Minimization – EGM*) во комбинација со генетски алгоритам (*Genetic Algorithm – GA*) ја покажува својата вредност како сеопфатен и практично применлив пристап за оптимизација на фотоволтаични панели. Придобивките не се само во поголемото годишно производство на енергија, туку и во намалена ентропија, односно во подобар квалитет на конверзијата, со потенцијални позитивни ефекти врз долговечноста на панелот. Валидацијата на моделот со помош на референтни вредности и со широко применувана база на податоци со помош на *PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System)* ја потврдува доверливоста на резултатите, а предложените насоки за подобрување на моделот ја отвораат можноста истиот да прерасне во целосна алатка за проектирање, проценка и долгорочно управување со фотоволтаични системи при реални климатски услови.

Користена литература

- Стефаноска, Е., Ставрева, С. (2026-а). *Анализа на механизмите на пренос на топлина кај монокристален фотоволтаичен модул при промена на аголот на наклон*. Годишна конференција (зимска сесија) на студентите на трет циклус студии за презентација на докторски проекти. Технички факултет – Битола, Универзитет „Св. Климент Охридски“ – Битола.
- Antony, A., Wang, Y. D., Roskilly, A. P. (2019). A detailed optimisation of solar photovoltaic/thermal systems and its application. *Energy Procedia*, 158, 1141-1148. (<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.295>).
- Armstrong, S., Hurley, W. G. (2010). A Thermal Model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions. *Applied Thermal Engineering*, 30, 1488-1495. (<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.03.012>).
- Arsova, E., Tsankov, P. (2023). *Implementation of 40 MW Photovoltaic Power Plant Bitola in the Republic of North Macedonia*. International Scientific Conference UniTech, Gabrovo, 17-18 November. (<https://doi.org/10.70456/WBRM3599>).
- Bardhi, M., Grandi, G., Tina, G. M. (2012). *Comparison of PV cell temperature estimation by different thermal power exchange calculation methods*. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ), Santiago de Compostela, Spain, 28-30 March.
- Bejan, A. (1996). Entropy generation minimization: The new thermodynamics of finite-size devices and finite-time processes. *Journal of Applied Physics*, 79(3), 1191-1218, American Institute of Physics Inc. (<https://doi.org/10.1063/1.362674>).

- Bell, I. H., Wronski, J., Quoilin, S., Lemort, V. (2014). Pure and pseudo-pure fluid thermophysical property evaluation and the open-source thermophysical property library CoolProp. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(6), 2498-2508. (<https://doi.org/10.1021/ie4033999>).
- Chekerovska, M., Chekerovski, T., Serafimovski, D., Filkoski, R. V. (2021). Optimization of flat solar collector based on the principle of entropy. *International Scientific Journal "Industry 4.0"*, 6(1), 18-20.
- Cuce, E., Cuce, P. M., Bali, T. (2018). Impact of humidity on current parameters of solar cells. *Journal of Energy Systems*, 2(3), 84-96. (<https://doi.org/10.30521/jes.441643>).
- Deline, C., Peláez, S. A., Marion, B., Sekulic, B., Woodhouse, M., Stein, J. (2019). *Bifacial PV system performance: Separating fact from fiction*. IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Chicago, IL, USA, June 16-21, Proceedings, 1298-1304.
- Fadhil Abbas Al-Showany, E. (2016). The Impact of the Environmental Condition on the Performance of the Photovoltaic Cell. *American Journal of Energy Engineering*, 4(1), 1-7. (<https://doi.org/10.11648/j.ajee.20160401.11>).
- Gürtürk, M., Benli, H., Ertürk, K. N. (2018). Effects of different parameters on energy-exergy and power conversion efficiency of PV modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 426-439. (<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.117>).
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons.
- Kalogirou, S. A. (2009). *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*, 1st ed. Academic Press/Elsevier, USA.
- Kazem, H. A., Chaichan, M. T. (2015). Effect of humidity on photovoltaic performance based on experimental study. *International Journal of Applied Engineering Research*, 10(23), 43572-43577.
- Kenny, R. P., Huld, T. A., Iglesias, S. (2006). *Energy Rating of PV Modules Based on PVGIS Irradiance and Temperature Database*. 21st European Photovoltaic Energy Conference, Dresden, Germany, 4-8 September.
- Kovač, P. P., Petrović, V. M., Pucovsky, V. V., Birčanin, B. S., Savković, B. S., Gostimirović, M. P. (2016). Energy efficiency cart modeling of solar energy collectors by genetic programming. *Thermal Science*, 20, S471-S479. (<https://doi.org/10.2298/TSCI150929031K>).
- Krismadinata, K., Asnil, A., Husnaini, I., Lapisa, R., Maulana, R., Yuhendri, M., Astrid, E., Logamani, P. (2023). Photovoltaic Energy Harvesting with Static and Dynamic Solar Modules Employing IoT-Enabled Performance Monitoring. *TEM Journal*, 12(3), 1354-1363. (<https://doi.org/10.18421/TEM123-15>).
- Mittag, M., Vogt, L., Herzog, C., Pfreundt, A., Shahid, J., Neuhaus, D. H., Wirth, H. (2019). *Thermal Modelling of Photovoltaic Modules in Operation and Production*. 36th EU PV Solar Energy Conference and Exhibition, Marseille, France, 9-13 September.
- Muñoz, M., Roa, M., Correa, R. (2020). Entropy generation analysis for the design of a flat plate solar collector with fins. *DYNA*, 87(212), 199-208. (<https://doi.org/10.15446/dyna.v87n212.80111>).
- Nabwey, H. A., Ashraf, M., Nadeem, H., Rashad, A. M., Chamkha, A. J. (2024). Optimizing renewable energy systems: A comprehensive review of entropy generation minimization. *AIP Advances*, 14(12), American Institute of Physics. (<https://doi.org/10.1063/5.0245560>).
- Njok, A. O., Ogbulezie, J. C. (2018). The effect of relative humidity and temperature on polycrystalline solar panels installed close to a river. *Physical Science International Journal*, 20(4), 1-11. (<https://doi.org/10.9734/PSIJ/2018/44760>).
- Ordóñez, J. C., Cavalcanti, E. J. C., Carvalho, M. (2022). Energy, Exergy, Entropy Generation Minimization, and Exergoenvironmental Analyses of Energy Systems-A Mini-Review. *Frontiers in Sustainability*, 3, Frontiers Media S.A. (<https://doi.org/10.3389/frsus.2022.902071>).
- Ozemoya, A., Swart, J., Pienaar, H. C., Schoeman, R. M. (2013). *Factors impacting on the surface temperature of a PV panel*. South African Telecommunications and Network Applications Conference (SATNAC), Stellenbosch, South Africa.
- Ramírez-Minguela, J.J., Rangel-Hernández, V.H., Alfaro-Ayala, J.A., Elizalde-Blancas, F., Ruiz-Camacho, B., López-Núñez, O.A., Alvarado-Rodríguez, C.E. (2023). Performance Comparison of Different Flat Plate Solar Collectors by Means of the Entropy Generation Rate Using Computational Fluid Dynamics. *Entropy* 2023, 25, 621. (<https://doi.org/10.3390/e25040621>).
- Rawat, R., Lamba, R., Kaushik, S.C. (2017). Thermodynamic study of solar photovoltaic energy conversion: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 630-638. (<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.089>).
- Rubavathy, S. J., Kannan, N., Dhanya, D., Shinde, S. K., Soni, N. B., Madduri, A., Mohanavel, V., Sudhakar, M., Sathyamurthy, R. (2022). Machine Learning Strategy for Solar Energy optimisation in Distributed systems. *Energy Reports*, 8, 872-881. (<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.09.209>).

- Sahin, G., van Sark, W. G. J. H. M. (2025). Machine Learning-Based Evaluation of Solar Photovoltaic Panel Exergy and Efficiency Under Real Climate Conditions. *Energies*, 18, 1318. (<https://doi.org/10.3390/en18061318>).
- Santbergen, R., van Zolingen, R. J. C. (2008). The absorption factor of crystalline silicon PV cells: A numerical and experimental study. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(4), 432-444. (<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2007.10.005>).
- Sicuaio, T., Zhao, P., Pilesjö, P., Shindyapin, A., Mansourian, A. (2024). A Multi-Objective Optimization Approach for Solar Farm Site Selection: Case Study in Maputo, Mozambique. *Sustainability*, 16, 7333. (<https://doi.org/10.3390/su16177333>).
- Singh, M., Saini, S. (2023). Understanding Solar Power: Analyzing and Predicting Photovoltaic Energy Output. *International Journal of Innovative Research in Engineering and Management*, 10(4), 8-67. (<https://doi.org/10.55524/ijirem.2023.10.4.7>).
- Stefanoska, E., Stavreva, S., Andreevski, I., Angelevska, V., Popovski, P., Dimovski, B. (2026-b). *Overview and Recent Developments of Optimization Methods for Solar Energy Systems*. 61st International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST 2026), Niš, Serbia, July 1-3, Proceedings, 507-512. (<https://doi.org/10.1109/ICEST71230.2026.11623608>).
- Stefanoska, E., Stavreva, S., Andreevski, I., Popovska-Vasilevska, S., Popovski, P., Veljanovski, G. (2026-c). *Thermal Behavior and Energy Performance Analysis of a Monocrystalline Photovoltaic Module under Different Tilt Angles*. 61st International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST 2026), Niš, Serbia, July 1-3, Proceedings, 513-518. (<https://doi.org/10.1109/ICEST71230.2026.11623561>).
- Tan, C. M., Chen, B. K. E., Toh, K. P. (2010). Humidity study of a-Si PV cell. *Microelectronics Reliability*, 50(9-11), 1871-1874. (<https://doi.org/10.1016/j.microrel.2010.07.021>).
- Tiwari, G. N., Dubey, S. (2010). *Fundamentals of Photovoltaic Modules and their Applications*, 2nd ed. RSC Energy Series, Cambridge, UK.
- Zhao, G., Yu, B., An, R., Wu, Y., Zhao, Z. (2021). Energy system transformations and carbon emission mitigation for China to achieve global 2°C climate target. *Journal of Environmental Management*, 292(112721). (<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112721>).
- Distributed Evolutionary Algorithms in Python (DEAP), <https://deap.readthedocs.io/en/master/>.
- European Commission, Joint Research Centre, "Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS).", https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/.
- Repository of Building Simulation Climate Data, <https://climate.onebuilding.org/>.