



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



Машинство

АНАЛИЗА НА МЕХАНИЗМИТЕ НА ПРЕНОС НА ТОПЛИНА КАЈ
МОНОКРИСТАЛЕН ФОТОВОЛТАИЧЕН МОДУЛ ПРИ ПРОМЕНА НА АГОЛОТ
НА НАКЛОН
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	2
2. Преглед на литературата.....	3
2.1. Термодинамички основи на фотоволтаичните модули.....	3
2.2. Досегашни истражувања и сознанија за механизмите на пренос на топлина кај фотоволтаичните модули.....	4
3. Методи и материјали.....	6
3.1. Применети податоци и параметри за локацијата на фотоволтаичниот модул.....	6
3.2. Модел за пренос на топлина кај фотоволтаичниот модул.....	6
4. Резултати и дискусија.....	10
5. Заклучок.....	16
Користена литература	17

АНАЛИЗА НА МЕХАНИЗМИТЕ НА ПРЕНОС НА ТОПЛИНА КАЈ МОНОКРИСТАЛЕН ФОТОВОЛТАИЧЕН МОДУЛ ПРИ ПРОМЕНА НА АГОЛОТ НА НАКЛОН

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

Овој докторски проект претставува термодинамичка анализа на монокристален едностран фотоволтаичен модул при различни агли на наклон, каде главниот фокус е ставен на заемното дејство на механизмите на пренос на топлина – кондукција, конвекција и зрачење. Реални метеоролошки податоци за Битола, Северна Македонија, добиени од база на податоци за типична метеоролошка година (*Typical Meteorological Year – TMY*), се комбинирани со физички заснован термодинамички модел на фотоволтаичниот модул, имплементиран во програмскиот јазик *Python*.

Симулациите се изведени за агли на наклон во опсег од 20° до 34° и ориентација по азимут од 180° (југ). Сончевото зрачење на наклонетиот модул е пресметано со примена на моделот *Hay-Davies*, при што се земени во предвид директната, дифузната и рефлектираната компонента на зрачењето. Преносот на топлина е моделиран со пристапот на *Armstrong-Hurley*, кој ги опфаќа и присилната и природната конвекција, додека загубите на топлина поради зрачење се определени со примена на фактори на видливост кон небото и кон подлогата (земјата). Процесот на кондукција низ слоевите на модулот исто така е земен во предвид во анализата.

Резултатите покажуваат дека аголот на наклон има значително влијание врз температурата на површината на модулот, процесот на дисипација на топлина и ефикасноста на модулот. Докторскиот проект обезбедува применлив пристап за избор на оптимална ориентација на фотоволтаичните модули со цел подобро управување со топлината, што придонесува кон зголемено енергетско производство и оптимални перформанси на системот при реални работни услови.

Клучни зборови: фотоволтаичен модул, сончева енергија, пренос на топлина, агол на наклон, ефикасност

1. Вовед

Фотоволтаичните системи претставуваат ефикасна и одржлива технологија за претворање на сончевата енергија во електрична енергија, со бројни предности во однос на конвенционалните извори на енергија бидејќи покажува огромен потенцијал за задоволување на глобалните потреби за енергија, нема ограничувања во снабдувањето ниту физички нуспроизводи кои претставуваат закана од еколошки аспект.

Со исцрпувањето на традиционалните извори на енергија и зголемената потрошувачка на фосилни горива, потребата од одржливи алтернативи станува сè поизразена. Обновливите извори на енергија, вклучително и сончевата енергија, се од клучно значење за намалување на негативните влијанија врз животната средина и за справување со предизвиците од глобалното затоплување (Алаас – *Alaas*, 2024). Сончевата енергија е препознатлива како чист и сигурен извор на енергија (Апаласами – *Appalatomy*, 2025), додека фотоволтаичните системи имаат клучна улога во искористувањето на сончевата енергија како еден од одржливите енергетски ресурси што е потврдено и од Махмод (*Mahmod*, 2025).

Со текот на времето се направени значајни подобрувања кај фотоволтаичните модули со цел поефикасно искористување на Сонцето како ресурс. Сепак, и покрај овие унапредувања, фотоволтаичните модули сè уште се соочуваат со потешкотии во ефикасната конверзија на сончевата енергија во електрична енергија, што негативно влијае врз целокупната ефикасност на системите и го скратува нивниот работен век како што се забележува кај Елмнифи (*Elmnifi*, 2024).

Дополнително, архитектонските и конструктивните аспекти на фотоволтаичните инсталации претставуваат значителен предизвик, особено кога се настојува да се постигне изведба со исклучително поволни перформанси и долгорочна издржливост (Махмод – *Mahmod*, 2025). Фотоволтаичните технологии имаат централно место во глобалните стратегии за обновлива енергија, иако нивните перформанси сè уште се силно условени од топлинските процеси.

Фотоволтаичните модули ја претвораат сончевата енергија во електрична енергија со помош на полупроводнички материјали. За време на работата, приближно 85% од апсорбираното сончево зрачење се трансформира во топлина, додека преостанатиот дел се претвора во електрична енергија (Шмрух – *Shmroukh*, 2019). Зголемувањето на температурата придонесува кон влошување на перформансите на фотоволтаичните модули. Оттука, коректното моделирање на топлинското однесување на фотоволтаичните модули е од суштинско значење за оптимизација на нивната ефикасност. Фактори како што се интензитетот на сончевото зрачење, температурата на околниот воздух, брзината на ветерот и ориентацијата на модулот значително влијаат врз електричните својства и термодинамичките перформанси. Ваквото размислување го поддржува и Куче (*Cuce*, 2017).

Клучните одлуки во процесот на планирање, како што се изборот на аголот на наклон на модулот, насочувањето по азимут и проценката на топлинските загуби, директно влијаат врз годишниот енергетски биланс, топлинското оптоварување и долгорочната доверливост на опремата што се потврдува и со повеќе истражувања за влијанието на аголот на наклон и азимут врз производството на енергија во различни климатски региони (Нахим – *Nahim*, 2025; Телесфор – *Télesphore*, 2025; Голи – *Goli*, 2025). Оттука произлегува потребата од аналитички пристап кој истовремено ги опфаќа енергетските добивки и последиците од термодинамичка гледна точка.

Во овој докторски проект претставен е и имплементиран детално развиен нумерички модел на фотоволтаичен модул каде што главната цел е, по пат на анализа на механизмите на пренос на топлина во зависност од аголот на наклон на модулот да се испитаат неговите перформанси при реални климатски услови. Моделот како влез користи часовни климатски податоци, а термодинамичкиот дел овозможува пресметка на загубите на топлина поради кондукција, конвекција и зрачење.

2. Преглед на литературата

2.1. Термодинамички основи на фотоволтаичните модули

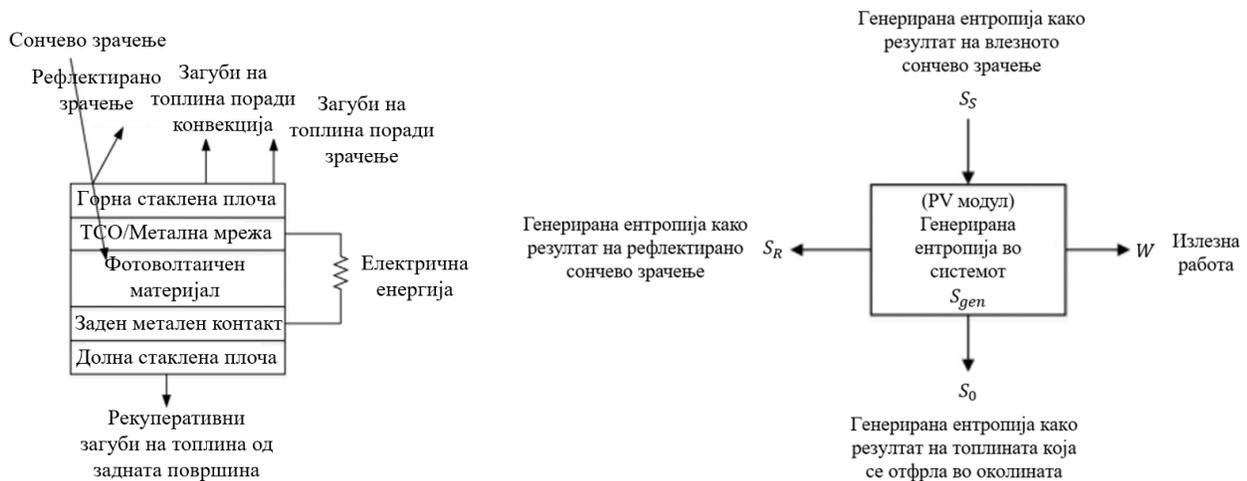
Термодинамиката на конверзија на сончевата енергија кај фотоволтаичните модули се истражува со примена на првиот и вториот закон на термодинамиката што е потврдено и според Рават (Rawat, 2017).

Енергетскиот модел е базиран на првиот закон на термодинамиката, кој покажува дека сончевото зрачење (Q_S) примено на површината на фотоволтаичен модул делумно се рефлектира назад од горното покривно стакло (Q_R) и делумно се апсорбира од фотоволтаичниот модул. Апсорбираната енергија од сончевото зрачење е распределена во следните компоненти:

- енергетски загуби во околината од горното покривно стакло преку пренос на топлина со зрачење (Q_{RD}) и конвективен пренос на топлина (Q_C);
- корисна топлинска енергија од задната површина на PV модулот (Q_U);
- електрична енергија (P_M).

Иако енергетскиот биланс обезбедува детален приказ за распределбата на сончевата енергија во фотоволтаичниот модул, тој не овозможува увид во квалитетот на енергијата ниту во неповратните процеси што се јавуваат при процесот на конверзија. Поради тоа, за целосна термодинамичка анализа на фотоволтаичниот модул неопходно е разгледување и на вториот закон на термодинамиката, односно анализа на генерирањето на ентропија во системот. Всушност, земајќи ја во предвид Слика 1 (а), може јасно да се забележат главните извори на топлински загуби во фотоволтаичниот модул. Генерирањето на ентропија се јавува како резултат на неповратните процеси поврзани со кондукцијата во внатрешноста на фотоволтаичниот модул, преносот на топлина од модулот кон околината преку зрачење и конвекција, како и при конверзијата на апсорбираната сончева енергија во електрична енергија. Овие процеси се придружени со зголемување на ентропијата и претставуваат главни извори на енергетска деградација во системот. Поради наведените неповратни процеси и присуството на значителни топлински загуби, во анализата на термодинамиката на фотоволтаичните системи е воведен и ентропискиот модел. Овој модел овозможува квантитативна проценка на генерирањето на ентропија и идентификација на процесите кои во најголем дел придонесуваат за намалување на ефикасноста на фотоволтаичниот модул. Ентропискиот биланс на фотоволтаичен систем е прикажан на Слика 1 (б).

Анализата на фотоволтаичните системи врз основа на првиот и вториот закон на термодинамиката овозможува не само проценка на количината на произведената енергија, туку и определување на критичните точки каде се јавуваат најголеми термодинамички загуби. Со тоа се создава основа за примена на методи за минимизирање на генерирањето на ентропија и подобрување на вкупните перформанси на системот.



Слика 1: Дијаграм на, (а) енергетски и, (б) ентрописки биланс на фотоволтаичен модул (Рават – Rawat, 2017)

Всушност, од термодинамичка гледна точка, механизмот на енергетска конверзија кај фотоволтаичните системи опфаќа и квантитативна и квалитативна проценка на трансформацијата на енергијата, која е регулирана со првиот и вториот закон на термодинамиката (Каушик – *Kaushik*, 2017). Фотоволтаичните системи истовремено произведуваат електрична енергија, но генерираат и топлина како резултат на апсорпција на нискоквалитетна сончева енергија, која во голема мера останува неискористена. Различни видови на оптички, топлински, спектрални и електрични загуби, доведуваат до генерирање на ентропија, со што се намалуваат и теоретските и практичните граници на ефикасноста на фотоволтаичните модули (Рават – *Rawat*, 2017).

2.2. Досегашни истражувања и сознанија за механизмите на пренос на топлина кај фотоволтаичните модули

Топлинските процеси на фотоволтаичните модули се предмет на бројни истражувања, при што некои автори ги поедноставуваат моделите со занемарување на одредени механизми на пренос на топлина, како што се забележува кај Ламаамар (*Lamaamar*, 2022). Работната температура на фотоволтаичниот модул претставува рамнотежа помеѓу генерираната топлина и топлината што се одведува во околината (Калеро Гомез – *Calero Gómez*, 2009). За проценка на температурата на сончевите ќелии, врз основа на метеоролошките параметри и својствата на модулот, предложени се различни емпириски равенки (Ламаамар – *Lamaamar*, 2022).

Бидејќи значителен дел од апсорбираната сончева енергија се дисипира како топлина во самиот модул, од суштинско значење е разбирањето на механизмите на кондукција, конвекција и зрачење, како што е посочено од Хасанијан (*Hassanian*, 2024). Процесот на кондукција се случува поради температурните разлики во фотоволтаичниот модул (предната и задната површина). Конвективниот пренос на топлина во голема мера зависи од условите на ветерот, додека загубите на топлина поради зрачење се поврзани со долгодбрановото зрачење од површината на модулот (Калеро Гомез – *Calero Gómez*, 2009). При типични работни услови, конвекцијата и зрачењето се доминантни механизми на одведување на топлина од површината на фотоволтаичниот модул кон околината (Хасанијан – *Hassanian*, 2024).

Од друга страна, аголот на наклон на модулот игра клучна улога во определувањето на количината на сончево зрачење апсорбирано од фотоволтаичниот модул, како и во

активирањето на механизмите на пренос на топлина на површината на модулот. Кога фотоволтаичните модули се поставени нормално на сончевите зраци, се постигнува максимална апсорпција на сончево зрачење, но истовремено се зголемуваат и температурните ефекти, при што ваквиот став се забележува кај Перовиќ (Perovic, 2017). Аголот на наклон влијае врз природната конвекција, присилната конвекција и зрачењето. Голем број истражувања ја анализираат природната конвекција од наклонети површини преку примена на емпириски равенки за изотермни рамни плочи, при што често се користи моделот на *Nusselt-Rayleigh* за квантификација на конвективниот пренос на топлина (Перовиќ – Perovic, 2017).

На пример, Перовиќ (Perovic, 2017) презентира сеопфатен модел за природна конвекција од двете површини на изотермна плоча за агли на наклон од 0° до 90° , со посебен акцент на ламинарната конвекција кај фотоволтаични модули со топлински изолирана долна површина. Користени се равенки за пресметка на коефициентите на пренос на топлина кај фотоволтаични модули поставени на тло, под различни амбиентални услови, земајќи ги предвид сончевото зрачење, присилната конвекција и зрачењето. Дополнително, истите равенки се применети и за моделирање на преоден и турбулентен режим на струење, обезбедувајќи унифициран пристап за термодинамичка анализа на фотоволтаични системи.

Понатаму, во студијата на Махмод (Mahmod, 2025) се истражува конструктивната оптимизација на фотоволтаични системи со примена на напредни нумерички симулации, при што фокусот е ставен на фактори како интензитетот на сончевото зрачење, распределбата на температурата и отпорноста на ветерот. Како заклучок се добива дека оптималниот агол на наклон на модулот изнесува 33° , во споредба со другите агли разгледувани во студијата, вклучувајќи 25° , 30° и 40° .

И покрај обемните истражувања за перформансите на фотоволтаичните системи, постои ограничен број на трудови кои систематски го анализираат влијанието на аголот на наклон врз сите три главни механизми на пренос на топлина – кондукција, конвекција и зрачење, конкретно кај монокристални фотоволтаични модули. Поголемиот дел од постојните истражувања или воведуваат поедноставувања во термодинамичките модели, или се фокусираат на еден единствен механизам, или ја проценуваат температурата преку емпириски пристап без воспоставување јасна поврзаност помеѓу топлинското однесување и ориентацијата на модулот. Како резултат на тоа, преносот на топлина кај фотоволтаичните модули, со земање во предвид на трите главни механизми, не е доволно проучуван, особено под реални работни и амбиентални услови.

Според тоа, целта на ова истражување е да се спроведе сеопфатна термодинамичка анализа на монокристален фотоволтаичен модул преку евалуација на влијанието на различни агли на наклон врз интензитетот и распределбата на кондуктивниот пренос на топлина, конвективниот пренос на топлина, и преносот на топлина со зрачење. Добиените резултати имаат за цел да придонесат кон продлабочување на разбирањата кои се однесуваат на топлинската динамика на фотоволтаичните системи и да понудат насоки за оптимизација на ориентацијата на фотоволтаичните модули со цел да се постигне подобрување на фотоволтаичните перформанси.

3. Методи и материјали

3.1. Применети податоци и параметри за локацијата на фотоволтаичниот модул

За потребите на истражувањето користени се податоци за локација во Битола, за типична метеоролошка година (*Typical Meteorological Year – TMY*) (*Repository of Building Simulation Climate Data*), со географски и метеоролошки параметри:

- Географска ширина: 41,050° N
- Географска должина: 21,367° E
- Надморска височина: 589 [m]
- *WMO* (*World Meteorological Organization*) код: 135830 – официјален идентификатор на Светската Метеоролошка Организација за локацијата во Битола
- Извор/метод: *SRC-TMYx*, со составен период 2009-2023, т.е. репрезентативната година е создадена од статистичка селекција на часовни записи во наведениот временски распон, за да се добие „просечна“ година погодна за технички пресметки. Од изворот за *TMY* се преземаат следните податоци за година/месец/ден/час:
 - *GHI* (*Global Horizontal Irradiance*) – глобално хоризонтално зрачење [W/m^2];
 - *DNI* (*Direct Normal Irradiance*) – директно нормално зрачење [W/m^2];
 - *DHI* (*Diffuse Horizontal Irradiance*) – дифузно хоризонтално зрачење [W/m^2];
 - T_a – температура на воздух [$^{\circ}\text{C}$];
 - w – брзина на ветер [m/s].

Податоците за типична метеоролошка година за локацијата во Битола користени се за пресметување на вкупното дневно/месечно/годишно производство на енергија, како и вкупните топлински загуби согласно трите основни механизми на пренос на топлина кај фотоволтаичниот модул (кондукција, конвекција и зрачење), користејќи ги претходно пресметаните температури на модулот и сите останати потребни влезни параметри во согласност со моделот кој е развиен во докторскиот проект. Покрај глобалното хоризонтално зрачење (*GHI*) кое се отчитува од податоците достапни за *TMY*, со помош на применетиот модел на *Hay-Davies* за сончево зрачење (Калогиру – *Kalogirou*, 2009) се пресметува и зрачењето на наклонета површина т.е. фотоволтаичниот модул (G_t).

3.2. Модел за пренос на топлина кај фотоволтаичниот модул

Предмет на анализа во докторскиот проект е едностран монокристален модул *Canadian Solar HiKu5 (CS3Y-490MS)*. Во продолжение се сумирани релевантните карактеристики од производителот, параметрите и инженерските претпоставки при имплементација на моделот.

Димензии на модул: 2252 × 1048 × 35 [mm]	Ном. раб. температура (T_{NOCT}): 42 ± 3 [$^{\circ}\text{C}$]
Површина (A): 2,360 [m^2]	Референтна температура (T_{ref}): 25 [$^{\circ}\text{C}$]
Маса (m): 25,7 [kg]	Температурен коефициент (β_T): 0,0034 [$1/^{\circ}\text{C}$]
Технологија на ќелии: монокристални	Коефициент на апсорпција (α_A): 0,90
Вид на стакло: калено стакло (<i>tempered glass</i>)	Фактор на емисија (ϵ): 0,88
Рамка: анодизирана алуминиумска легура	Коеф. на топл. спровод. (k): 0,63 [W/mK]
Номинална моќност (P_N): 490 [W]	Ефективна дебелина на слој (d): 0,0046 [m]
Напон на отворено коло (V_{oc}): 53,3 [V]	Густина на материјал (ρ): 2400 [kg/m^3]
Струја на краток спој (I_{sc}): 11,67 [A]	Топлински капацитет (c): 900 [J/kgK]
Ефикасност на модул (η): 20,8%	Карактеристична должина (L): 2,252 [m].

Геометријата на поставување на фотоволтаичниот модул ја условува проектираната компонента на директното сончево зрачење, распределбата на дифузното зрачење и рефлексијата од површината на земјата:

- Азимут (ориентација во однос на страните на светот): анализирана ориентација е југ (180°).
- Агол на наклон: се спроведуваат симулации за опсег [20° , 34°] (со чекор 2°).
- Сончеви агли: зенит/азимут/часовен агол се добиваат со примена на модулот *pvlb.solarposition* во *Python* кој служи за определување на положбата на сонцето на небото за дадено време и локација. Сончевото зрачење на наклонета површина (фотоволтаичниот модул) се пресметува со *Hay-Davies* модел (Калогире – *Kalogirou*, 2009), со коефициент на рефлексија на подлогата од 0.20 (Делин – *Deline*, 2019). На директната компонента се применува корекционен фактор на инцидентниот агол – *IAM (Incidence Angle Modifier)* (*pvlb.iam.ashrae*) со примена на моделот за пренос на сончевото зрачење на *ASHRAE (American Society of Heating, Refrigeration, and Air Conditioning Engineers)* (Соука – *Souka*, 1966; *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, 1977), со параметар за прилагодување на корекциониот фактор на инцидентниот агол, во случајот $b = 0,06$ (*PVsyst*).

Методолошкиот пристап е заснован на примена на физички базиран термодинамички модел на фотоволтаичен модул, интегриран со нумеричка симулација. Основната цел е да се поврзат реалните климатски податоци со геометриските параметри на модулот и да се анализираат механизмите на пренос на топлина кои се јавуваат во фотоволтаичниот модул. Моделот е имплементиран во *Python*, со комбинација на научни библиотеки и специјализирани модули за анализа на сончево зрачење и симулација на фотоволтаични системи.

Постапно, методологијата опфаќа употреба на *TMY* датотеката и издвојување на часовните вредности за сончевото зрачење и климатските параметри. Потоа следува пресметка на инцидентниот агол, примена на корекционен фактор и распределба на сончевото зрачење (директна, дифузна, рефлектирана компонента).

Моделот за пресметка на вкупните топлински загуби е базиран на моделот на Армстронг – *Armstrong*, 2010, кој разгледува фотоволтаичен модул под променливи климатски услови. Моделот вклучува определување на топлинските загуби поради кондукција, конвекција и зрачење, како функција од променливите атмосферски услови и влијанието на аголот на наклон на модулот.

Загубите на топлина поради кондукција во внатрешните слоеви на модулот се:

$$Q_{cond} = \frac{k \cdot A}{d} (T_{PV} - T_b) [W] \quad (3.1)$$

k – коефициент на топлинска спроводливост на материјалот [W/mK]

d – дебелина на слојот [m]

T_{PV} – температура од предната страна на модулот [$^\circ C$]

T_b – температура од задната страна на модулот [$^\circ C$]

Загубите на топлина поради конвекција од предната површина на модулот се:

$$Q_{conv,front} = h_{c,front} \cdot A \cdot (T_{PV} - T_a) [W] \quad (3.2)$$

Загубите на топлина поради конвекција од задната површина на модулот се:

$$Q_{conv,rear} = h_{c,rear} \cdot A \cdot (T_b - T_a) [W] \quad (3.3)$$

$h_{c,front}$ – конвективен коефициент на пренос на топлина од предната страна [W/m²K]

$h_{c,rear}$ – конвективен коефициент на пренос на топлина од задната страна [W/m²K]

За пресметување на загубите на топлина поради конвекција, потребно е да се пресметаат конвективните коефициенти на пренос на топлина, притоа земајќи во предвид дека станува збор за два различни процеси на конвекција кои се јавуваат и за двете страни, и тоа според *Armstrong-Hurley* моделот:

- Присилна конвекција

Во овој случај конвективниот коефициент на пренос на топлина се пресметува од предна и од задна страна како:

$$h_{c,forced,front} = 2,56 \cdot w + 8,55 \left[\frac{W}{m^2K} \right] \quad (3.4)$$

$$h_{c,forced,rear} = 0,4 \cdot h_{c,forced,front} \left[\frac{W}{m^2K} \right] \quad (3.5)$$

- Природна конвекција

Во овој случај се применува формулата за *Nusselt*-ов број, и тоа:

- за природна конвекција од задната површина на модулот:

$$\overline{Nu}_{rear} = \left[0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra_{rear}^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0,492}{Pr_{rear}} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right]^2 \quad (3.6)$$

- за природна конвекција од предната површина на модулот се пресметува *Nusselt*-ов број според равенката:

$$\overline{Nu}_{front} = 0,14 \cdot \left[(Gr_{front} \cdot Pr_{front})^{\frac{1}{3}} - (Gr_{cr} \cdot Pr_{front})^{\frac{1}{3}} \right] + 0,56 \cdot (Gr_{cr} \cdot Pr_{front} \cdot \cos \theta)^{\frac{1}{4}} \quad (3.7)$$

Ако е исполнет условот $10^5 < Gr_{front} \cdot Pr_{front} \cdot \cos \theta < 10^{11}$ и $15^\circ < \theta < 75^\circ$.

Ако претходниот услов не е исполнет, тогаш се преминува на равенката за природна конвекција од задната страна на модулот (Равенка 3.6).

Re – *Reynolds*-ов број [-]

Ra – *Rayleigh*-ев број [-]

Pr – *Prandtl*-ов број [-]

Gr – *Grashof*-ов број [-]

k_{air} – коефициент на топлинска спроводливост на воздух [W/mK]

L – карактеристична должина на модул [m]

$\theta = 90^\circ - \beta$ – агол на наклон од вертикалата [°]

Потребно е да се нагласи дека критичниот *Grashof*-ов број е вредноста за која *Nusselt*-овиот број започнува да варира од ламинарно однесување. Во практичната имплементација се користи критична вредност за производот $(Gr \cdot Pr)_{cr} = 10^9 = Ra_{cr}$ (Бејан – *Bejan*, 2013).

Температура на филмот за предната и задната страна на модулот е дефинирана како:

$$T_{film,front} = \frac{T_{PV} + T_a}{2} [K] \quad (3.8)$$

$$T_{film,rear} = \frac{T_b + T_a}{2} [K] \quad (3.9)$$

Од изразот за пресметка на *Nusselt*-овиот број:

$$\overline{Nu} = \frac{h_c \cdot L}{k_{air}(T_{film})} \quad (3.10)$$

Се добива дека:

$$h_{c,free,front} = \frac{\overline{Nu}_{front} \cdot k_{air}(T_{film,front})}{L} \left[\frac{W}{m^2K} \right] \quad (3.11)$$

$$h_{c,free,rear} = \frac{\overline{Nu}_{rear} \cdot k_{air}(T_{film,rear})}{L} \left[\frac{W}{m^2K} \right] \quad (3.12)$$

За вкупниот конвективен коефициент на пренос на топлина се добива изразот:

$$h_{c,front} = \sqrt[3]{h_{c,forced,front}^3 + h_{c,free,front}^3} \left[\frac{W}{m^2K} \right] \quad (3.13)$$

$$h_{c,rear} = \sqrt[3]{h_{c,forced,rear}^3 + h_{c,free,rear}^3} \left[\frac{W}{m^2K} \right] \quad (3.14)$$

Може да се пресметаат вкупните загуби поради конвекција:

$$Q_{conv} = h_{c,front} \cdot A \cdot (T_{PV} - T_a) + h_{c,rear} \cdot A \cdot (T_b - T_a) [W] \quad (3.15)$$

Загубите на топлина поради зрачење се пресметуваат (Армстронг – *Armstrong*, 2010):

- Загуби на топлина поради зрачење кон небото (од предната и од задната површина):

$$Q_{rad,front-sky} = \varepsilon \cdot F_{front-sky} \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_{PV}^4 - T_s^4) [W] \quad (3.16)$$

$$F_{front-sky} = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta) \quad (3.17)$$

$$Q_{rad,rear-sky} = \varepsilon \cdot F_{rear-sky} \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_b^4 - T_s^4) [W] \quad (3.18)$$

$$F_{rear-sky} = \frac{1}{2}(1 + \cos(\pi - \beta)) \quad (3.19)$$

- Загуби на топлина поради зрачење кон земјата (од предната и од задната површина):

$$Q_{rad,front-ground} = \varepsilon \cdot F_{front-ground} \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_{PV}^4 - T_g^4) [W] \quad (3.20)$$

$$F_{front-ground} = \frac{1}{2}(1 - \cos \beta) \quad (3.21)$$

$$Q_{rad,rear-ground} = \varepsilon \cdot F_{rear-ground} \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_b^4 - T_g^4) [W] \quad (3.22)$$

$$F_{rear-ground} = \frac{1}{2}(1 - \cos(\pi - \beta)) \quad (3.23)$$

ε – коефициент на емисија на површината на модулот [-]

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2K^4} \right]$ – Стефан-Болцманова константа

T_s – температура на небото [K]

T_g – температура на земјата (еднаква на T_a според Армстронг (*Armstrong*, 2010))[K]

F – фактор на гледање поради загуби на топлина од зрачење [-]

Температурата на небото може да се пресмета според Митаг (*Mittag*, 2019):

$$T_s = 0,0553 \cdot T_a^{1.5} [K] \quad (3.24)$$

Според тоа, вкупните загуби поради зрачење на површината од модулот се:

$$Q_{rad} = Q_{rad,front-sky} + Q_{rad,rear-sky} + Q_{rad,front-ground} + Q_{rad,rear-ground} [W] \quad (3.25)$$

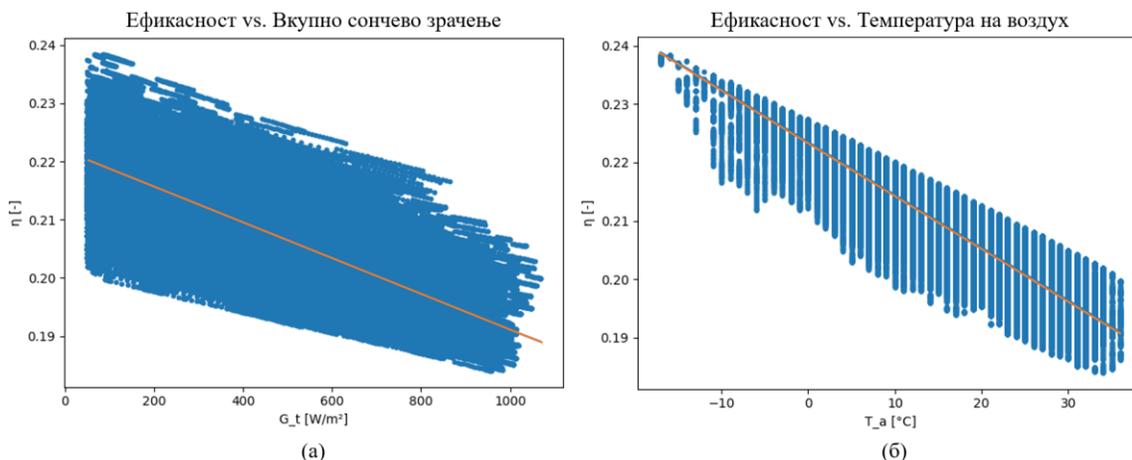
За часови со многу мало сончево зрачење ($G_t < 30 \text{ [W/m}^2\text{]}$) се претпоставува дека $Q_{conv} \approx 0$ и доминираат загубите на топлина поради зрачење.

4. Резултати и дискусија

Врз основа на развиениот модел за пренос на топлина кај фотоволтаичниот модул кој е предмет на истражување во овој докторски проект, со локација во Битола и при анализи спроведени за типична метеоролошка година (*Typical Meteorological Year – TMY*), во продолжение е претставена дискусија на резултатите од анализата на перформансите на фотоволтаичниот модул за различни агли на наклон (20° - 34°), претставени преку соодветни графички зависимости на годишно ниво (зависност на ефикасноста и електричната моќност од вкупното сончево зрачење на површината на модулот и од температурата на воздухот), а потоа и на часовно ниво за типичен метеоролошки летен ден.

Графикон 1 (а) ја прикажува врската помеѓу ефикасноста на модулот и вкупното сончево зрачење на површината на разгледуваниот модул, добиено врз основа на применетиот модел на *Hay-Davies* за сончево зрачење (Калогиру – *Kalogirou*, 2009) и симулација со климатски податоци за локација во Битола за типична метеоролошка година. Анализата на Графиконот 1 покажува дека кога сончевото зрачење на површината на модулот се зголемува од околу $50 \text{ [W/m}^2\text{]}$ до над $1000 \text{ [W/m}^2\text{]}$, ефикасноста се намалува од приближно 0,24 на околу 0,19. Причината за ваквата ефикасност на модулот е неговото загревање – со поголемо сончево зрачење се зголемува и температурата модулот, а тоа ја намалува ефикасноста со што се нагласува потребата од примена на системи за ладење кај фотоволтаичните модули, став кој се забележува и кај Шмрух (*Shmroukh*, 2019).

Со анализа на Графикон 1 (б) се забележува дека ефикасноста на фотоволтаичниот модул на годишно ниво опаѓа со зголемување на амбиенталната температура. Регресионата линија е со негативен нагиб – приближно од 0,238 при ладни услови ($-10 \text{ [}^\circ\text{C]}$) ефикасноста опаѓа до околу 0,186 при топли услови ($35 \text{ [}^\circ\text{C]}$). При помали температури на воздухот често има поголема ефикасност бидејќи ладењето е поефикасно и електричните загуби во полупроводникот се помали.

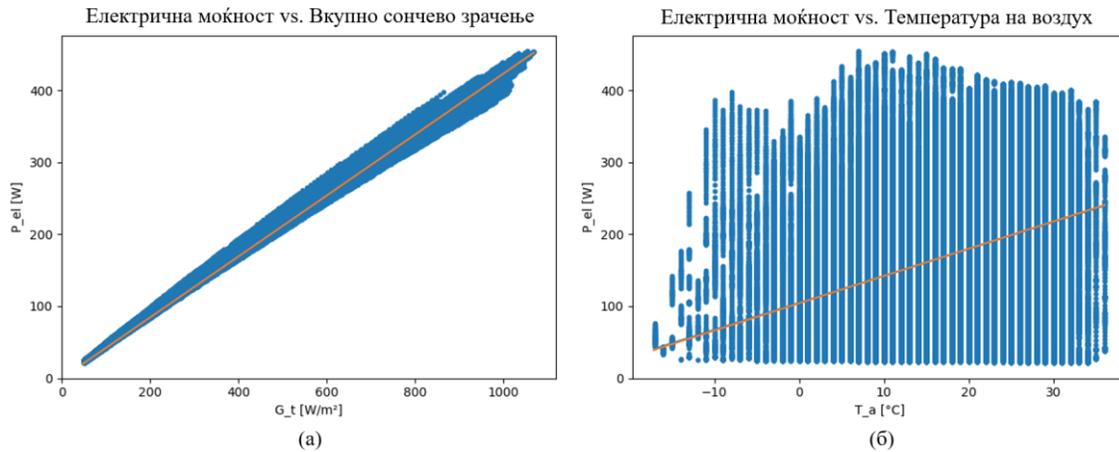


Графикон 1: Зависност на ефикасноста на годишно ниво од, (а) сончевото зрачење, (б) температурата на воздухот

Графикон 2 (а) покажува дека со зголемување на сончевото зрачење на површината на модулот електричната моќност се зголемува речиси пропорционално, што се потврдува

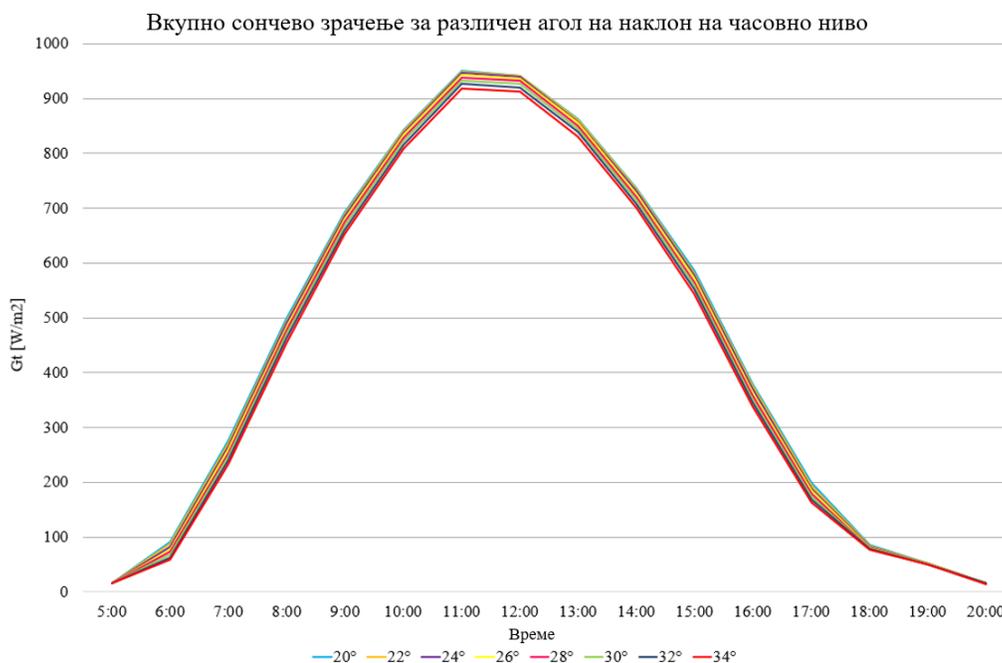
и во истражувањето на Апаласами (Appalasamy, 2025). За сончево зрачење на површината на модулот од $1000 \text{ [W/m}^2\text{]}$ се достигнува пик на моќноста од 450 [W] , што е во согласност со очекувањата за модул со дадената номинална површина и ефикасност. Во зоната на многу мало сончево зрачење на површината на модулот ($G_t < 30\text{-}50 \text{ [W/m}^2\text{]}$) електричната моќност е многу мала.

Графикон 2 (б) ја прикажува зависноста помеѓу електричната моќност на фотоволтаичниот модул и температурата на околниот воздух на годишно ниво, при што вертикалните линии по должината на температурната оска се резултат на спроведената анализа со реални климатски податоци, каде за иста температура на воздухот има појава на различни вредности на сончево зрачење. Ова покажува дека електричната моќност е помалку директно зависна од температурата на околниот воздух, а во поголем дел зависи од сончевото зрачење на површината на модулот. За температура на воздухот од околу $5\text{-}15 \text{ [}^\circ\text{C]}$, се појавуваат најголемите пикови ($430\text{-}460 \text{ [W]}$), а потоа моќноста полска опаѓа за поголеми температури. Со затоплување се зголемува и температурата на модулот, ефикасноста се намалува, и максималната моќност опаѓа што е потврден резултат во постоечката литература.



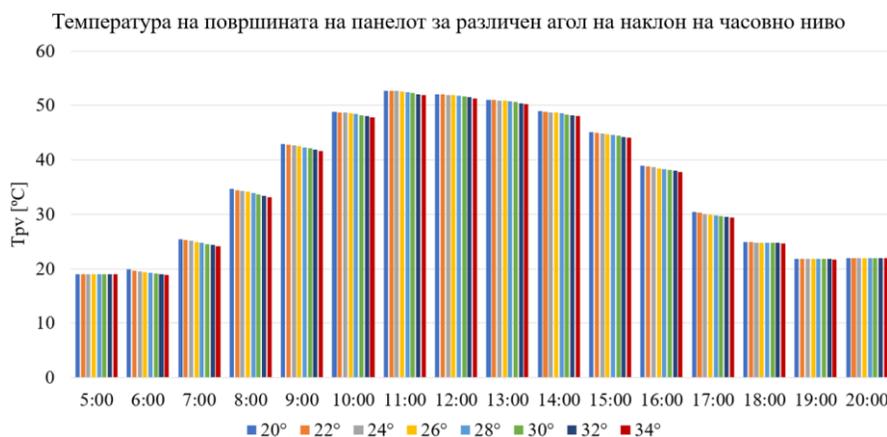
Графикон 2: Зависност на електричната моќност на годишно ниво од, (а) сончевото зрачење, (б) температурата на воздухот

Добиените резултати за вкупното сончево зрачење (G_t), за типичен метеоролошки летен ден, прикажани на Графикон 3, покажуваат дека вредностите за вкупното сончево зрачење на фотоволтаичниот модул постепено се зголемуваат од 5:00 часот и достигнуваат изразен максимум помеѓу 11:00 и 12:00 часот. Во овој временски интервал е регистрирана најголема вредност на зрачење од приближно $950 \text{ [W/m}^2\text{]}$ за агол на наклон од 20° . Анализата покажува дека помалите агли на наклон ($20^\circ\text{-}26^\circ$) обезбедуваат поголемо зрачење во текот на целиот ден, особено во утринските и доцните попладневни часови, каде споредувани со најголемиот разгледуван агол (34°) разликите достигнуваат до 36% во 6:00 часот и околу 18% во 17:00 часот. Во близина на пладне, разликите помеѓу добиените вредности за сончевото зрачење за различни агли на наклон се намалуваат на приближно 3%, што е очекувано поради големата висина на Сонцето. При летни услови, оптималниот агол на наклон за максимизирање на дневното сончево зрачење е приближно 20° . Поголемите агли на наклон ($30^\circ\text{-}34^\circ$) континуирано резултираат со помало сончево зрачење, бидејќи ја намалуваат нормалната изложеност на сончевите зраци.



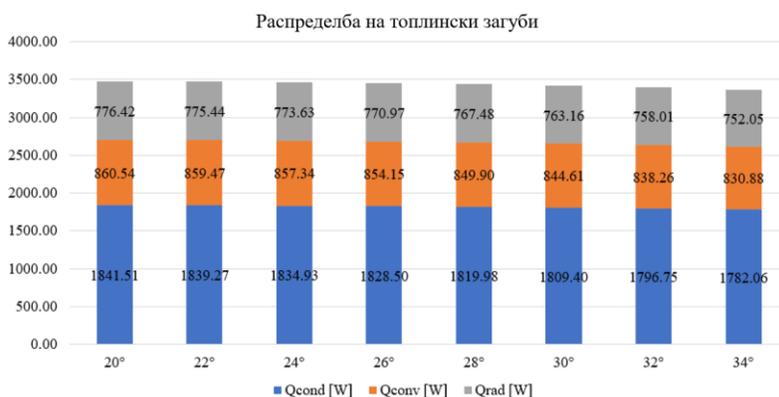
Графикон 3: Часовно вкупно сончево зрачење за различен агол на наклон за типичен метеоролошки летен ден

Графиконот 4 го прикажува часовниот температурен профил на фотоволтаичниот модул за типичен метеоролошки летен ден за локација во Битола, кој укажува на голема зависност од интензитетот на сончевото зрачење. Температурата на фотоволтаичниот модул постепено се зголемува од раноутрински вредности од 18-20 [°C] до изразен максимум од приближно 52-54 [°C] помеѓу 11:00 и 13:00 часот, што се совпаѓа со периодот на максимално глобално зрачење. Во текот на сите часови, помалите агли на наклон (20°-26°) доведуваат до нешто повисоки површински температури на фотоволтаичниот модул, од 2-3 [°C] повеќе во периодот на максимум, бидејќи овие ориентации апсорбираат повеќе нормална компонента од сончевото зрачење, што резултира со поголема апсорбирана топлина. Наспроти тоа, поголемите агли на наклон (30°-34°) покажуваат умерен ефект на ладење, поради намаленото инцидентно сончево зрачење, особено во утринските и доцните попладневни часови кога Сонцето е поставено повисоко во однос на рамнината на модулот. По 14:00 часот, температурите постепено опаѓаат со намалувањето на зрачењето, достигнувајќи вредности од 22-24 [°C] околу 19:00-20:00 часот. Генерално, топлинското однесување директно се совпаѓа со зрачењето: аглие што го максимизираат вкупното сончево зрачење на површината на модулот (G_t), истовремено ја максимизираат и температурата на површината на модулот (T_{PV}), што ја потврдува големата поврзаност помеѓу сончевата геометрија и работната температура на фотоволтаичниот модул. Ова има значителни влијанија врз перформансите, бидејќи повисоката T_{PV} обично доведува до намалување на електричната ефикасност и зголемување на топлинските загуби.



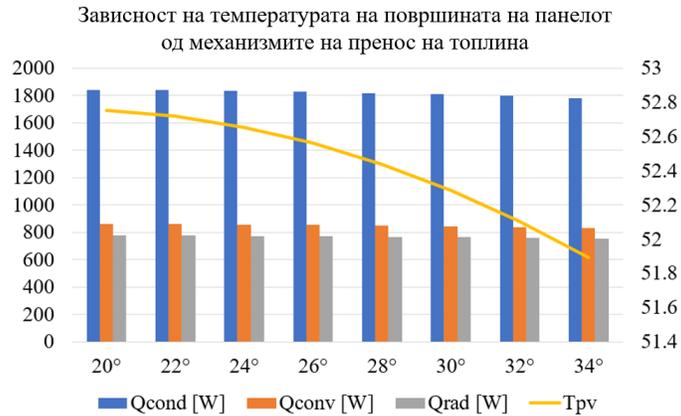
Графикон 4: Температура на површината на модулот на часовно ниво за различен агол на наклон за типичен метеоролошки летен ден

На Графикон 5 прикажани се пресметаните топлински загуби во 11:00 часот за типичен метеоролошки летен ден врз основа на моделот за пренос на топлина на фотоволтаичниот модул со локација во Битола. Може да се забележи дека кондукцијата доминира во вкупните топлински загуби на фотоволтаичниот модул, со континуиран придонес од приближно 1,78-1,84 [kW], што одговара на повеќе од 60% од вкупните топлински загуби. Конвекцијата претставува втор најзначаен механизам, со вредности во опсег од 831-861 [W], додека загубите поради зрачење се најмали, со приближно 752-776 [W]. Јасно опаѓање е забележано кај сите три компоненти на топлинските загуби со зголемување на аголот на наклон од 20° до 34°, при што кондуктивните загуби се намалуваат за околу 59 [W], конвективните за приближно 30 [W], а загубите поради зрачење за околу 24 [W]. Ова намалување е директно поврзано со редукцијата на апсорбираната сончева енергија кај поголемите агли на наклон, што резултира со пониски површински температури на фотоволтаичниот модул и, соодветно, со помали температурни градиенти. Забележливо е дека пропорционалниот однос помеѓу трите механизми останува речиси константен за сите агли, што укажува дека аголот на наклон влијае на интензитетот на топлинските загуби, но не и на нивната релативна распределба. Овие резултати се во согласност со температурните анализи и потврдуваат дека помалите агли на наклон го зголемуваат топлинското оптоварување на фотоволтаичниот модул, што може негативно да влијае врз електричната ефикасност преку зголемено генерирање на ентропија.



Графикон 5: Анализ на механизмите на пренос на топлина за различен агол на наклон на фотоволтаичниот модул (за типичен метеоролошки летен ден во 11:00 часот)

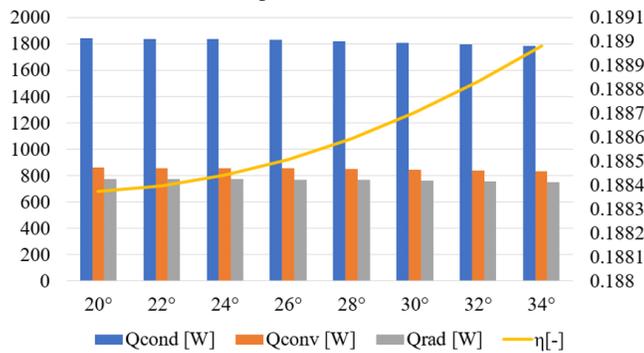
Комбинираната анализа на површинската температура на фотоволтаичниот модул (T_{PV}) и механизмите на пренос на топлина за типичен метеоролошки летен ден (Графикон 6) открива јасна зависност помеѓу топлинското оптоварување и распределбата на кондуктивните, конвективните и загубите на топлина поради зрачење. Со зголемување на аголот на наклон од 20° на 34° , температурата на фотоволтаичниот модул се намалува од $52,75 [^\circ\text{C}]$ на $51,89 [^\circ\text{C}]$, што е придружено со постепено намалување на сите компоненти на топлинските загуби. Опаѓачката крива на T_{PV} директно ја следи редукцијата на топлинските загуби, потврдувајќи дека нивниот интензитет е директно пропорционален на температурата на фотоволтаичниот модул и апсорбираното сончево зрачење.



Графикон 6: Промена на температурата на површината на модулот во зависност од механизмите на пренос на топлина за различен агол на наклон на фотоволтаичниот модул за типичен метеоролошки летен ден

Поврзаноста помеѓу механизмите на пренос на топлина и ефикасноста на фотоволтаичниот модул за разгледуваните агли на наклон за типичен метеоролошки летен ден е конзистентна и физички оправдана, како што е прикажано на Графикон 7. Како што е претходно наведено, со зголемување на аголот на наклон од 20° до 34° , сите компоненти на топлинските загуби, кондукција, конвекција и зрачење, континуирано се намалуваат. И покрај ова, ефикасноста на модулот (η) покажува монотон и благо нелинеарен пораст, зголемувајќи се од $0,18837$ на $0,18898$. Ова подобрување, иако релативно мало во апсолутна смисла, е во согласност со очекуваното топлинско однесување: намалената акумулација на топлина доведува до пониски температури на фотоволтаичните ќелии, со што се намалуваат внатрешните загуби и се подобрува ефикасноста на конверзија на енергијата. Обратнопропорционалната зависност помеѓу топлинските загуби и ефикасноста потврдува дека поголемите агли на наклон го намалуваат топлинското оптоварување и ја подобруваат работата на модулот. Сепак, малата промена на ефикасноста укажува дека топлинските ефекти се присутни, но не и доминантни во овој опсег на агли, што значи дека оптичките фактори остануваат главен двигател на перформансите. Сепак, забележаната поврзаност помеѓу топлинските загуби и ефикасноста ја нагласува важноста на оптимизацијата на аголот на наклон во насока на намалување на генерирањето на ентропија и подобрувањето на работните услови на фотоволтаичниот модул.

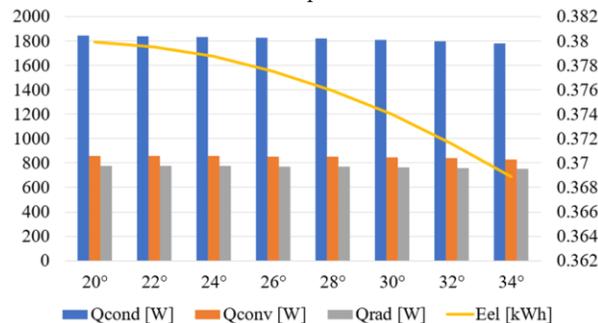
Зависност на ефикасноста на панелот од механизмите на пренос на топлина



Графикон 7: Промена на ефикасноста во зависност од механизмите на пренос на топлина за различен агол на наклон на фотоволтаичниот модул за типичен метеоролошки летен ден

Промената на производството на електрична енергија (E_{el}) на фотоволтаичниот модул во однос на топлинските загуби кај разгледуваните агли на наклон за типичен метеоролошки летен ден покажува јасна инверзна зависност (Графикон 8). И покрај постепено намалување на дисипацијата на топлина, производството на електрична енергија континуирано опаѓа, намалувајќи се од 0,3799 [kWh] при 20° на 0,3688 [kWh] при 34°. Ова однесување ја истакнува значајната улога на топлинските и оптичките ефекти: иако поголемите агли на наклон го намалуваат загревањето на фотоволтаичниот модул, тие истовремено воведуваат геометриска несогласност што го намалува инцидентното зрачење на модулот. За овој типичен метеоролошки летен ден и локација во Битола, загубата на сончево зрачење на влез на модулот поврзана со поголемите агли на наклон преовладува над придобивките од помалата работна температура, што резултира со помало енергетско производство. Иако топлинската оптимизација позитивно придонесува кон перформансите на фотоволтаичните системи, реалното енергетско производство во најголема мера останува управувано од геометријата на сончевото зрачење, што ја потврдува потребата од балансиран избор на агол на наклон кој ги минимизира енергетските загуби и обезбедува оптимално искористување на сончевата енергија.

Зависност на производството на енергија од механизмите на пренос на топлина



Графикон 8: Промена на производството на енергија во зависност од механизмите на пренос на топлина за различен агол на наклон на фотоволтаичниот модул за типичен метеоролошки летен ден

5. Заклучок

Ова истражување обезбедува детална термодинамичка анализа на едностран монокристален фотоволтаичен модул при различни агли на наклон, со посебен акцент на улога на кондукцијата, конвекцијата и зрачењето како механизми на пренос на топлина. Добиените резултати јасно укажуваат дека дури и мали промени на аголот на наклон доведуваат до значајни промени во вкупното сончево зрачење и температурата на површината на фотоволтаичниот модул, а со тоа и до промени во интензитетот и распределбата на топлинските загуби.

Помеѓу анализираните механизми, кондуктивниот пренос на топлина останува доминантниот пат на загуби, силно условен од внатрешниот температурен градиент помеѓу предната површина на фотоволтаичниот модул и неговата задна страна. Конвективните загуби континуирано се намалуваат со зголемување на аголот на наклон, главно поради намалената изложеност на предната површина на природна конвекција. Загубите на топлина поради зрачење покажуваат најмала чувствителност на промената на аголот на наклон, но сепак претставуваат значаен дел од вкупниот топлински биланс.

Потребно е да се нагласи дека помалите агли на наклон (20° - 26°) се поврзани со повисоки температури на фотоволтаичниот модул, што предизвикува поголеми кондуктивни и конвективни загуби и, како последица, доведува до намалување на електричната ефикасност. Наспроти тоа, поголемите агли на наклон (30° - 34°) имаат тенденција умерено да ја намалат површинската температура и да ги подобрат перформансите, иако овој ефект е делумно ограничен поради намаленото инцидентно сончево зрачење.

Анализата на карактеристичниот час (11:00) за типичен метеоролошки летен ден ја потврдува дека доминираат кондуктивните загуби, по кои следуваат конвективните и загубите на топлина поради зрачење.

Утврдените зависимости помеѓу температурата на фотоволтаичниот модул, топлинските загуби, ефикасноста и производството на енергија ја потенцираат изразената термодинамичка меѓузависност која постои во рамките на модулот. Овие сознанија ја нагласуваат клучната улога на интегрираната термодинамичко-геометриска оптимизација при дефинирањето на оптималната работна конфигурација на фотоволтаичните системи.

Моделот има одредени ограничувања, пред сè поради фиксната геометрија на фотоволтаичниот модул без систем за следење на Сонцето или систем за ладење, како и поради исклучувањето на локални ефекти како што се засенување, нечистотии на површината на модулот и сезонски промени на рефлексијата од површината на која е поставен модулот. Дополнително, примената на податоци за типична метеоролошка година (*Typical Meteorological Year – TMY*) опфаќа само просечни услови и не ги зема во предвид екстремните или брзо променливи климатски услови кои можат значително да влијаат врз реалните перформанси на фотоволтаичните системи.

Во секој случај, овој докторски проект ја истакнува важноста на прецизното топлинско моделирање при оценувањето на перформансите, идентификацијата на механизмите на пренос на топлина и подобрувањето на работата на фотоволтаичните модули. Претставената методологија може едноставно да се прилагоди на различни климатски услови, типови модули и конфигурации, со што се обезбедува цврста основа за идни истражувања во областа на топлинските перформанси и енергетската оптимизација на фотоволтаичните системи.

Добиените резултати покажуваат дека применетиот модел за фотоволтаичен модул со локација во Битола кој е предмет на истражување во овој докторски проект, при типични метеоролошки климатски услови со променлив агол на наклон од (20°-34°), е физички валиден и теоретски конзистентен, при што вредностите на температурата, ефикасноста и топлинските загуби на фотоволтаичниот модул се во согласност со постојните истражувања, што ја потврдува неговата применливост за термодинамичка анализа на фотоволтаични модули.

Користена литература

- Alaas, Z. M. (2024). The Effects of Temperature on Photovoltaic and Different Mitigation Techniques: A Review. *IEEE Access*, 12, 180309-180327. (<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3504009>)
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (1977). *ASHRAE Standard 93-77: Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors*. National Bureau of Standards (NBS).
- Appalasaamy, K., Mamat, R., Kumarasamy, S. (2025). Smart Thermal Management of Photovoltaic Systems: Innovative strategies. *AIMS Energy*, 13(2), 309-353. (<https://doi.org/10.3934/energy.2025013>)
- 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>).
- Bejan, A. (2013). *Convection Heat Transfer*, 4th ed. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Calero Gómez, G. (2009). Heat Transfer in a Photovoltaic Panel, Project Report, 2009 *MVK160 Heat and Mass Transport*. Lund, Sweden.
- Cuce, E., Cuce, P. M., Karakas, I. H., Bali, T. (2017). An Accurate Model for Photovoltaic (PV) Modules to Determine Electrical Characteristics and Thermodynamic Performance Parameters. *Energy Conversion and Management*, 146, 205-216. (<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.05.022>)
- Deline, C., Peláez, S. A., Marion, B., Sekulic, B., Woodhouse, M., Stein, J. (2019). *Bifacial PV System Performance: Separating Fact from Fiction*. 2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-46), Chicago, IL, USA, 16-21 June. (<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23189.27365>).
- Elmnifi, M., Mansur, A. N., Hassan, A. K., Raheem, A., Ayed, S. K., Majdi, H. S., Haneen, L. (2024). Experimental and Simulation Study for Improving the Solar Cell Efficiency by Using Aluminum Heat Sinks. *Proceedings on Engineering Sciences*, 6(1), 161-170. (<https://doi.org/10.24874/PES06.01.018>)
- Goli, P., Gampa, S. R., Alluri, A., Gutta, B., Jasthi, K., Das, D. (2025). Optimum Sizing of Solar Photovoltaic Panels at Optimum Tilt and Azimuth Angles Using Grey Wolf Optimization Algorithm for Distribution Systems. *Inventions*, 10, 79. (<https://doi.org/10.3390/inventions10050079>).
- Hassanian, R., Yeganeh, N., Riedel, M. (2024). Wind Velocity and Forced Heat Transfer Model for Photovoltaic Module. *Fluids*, 9(1). (<https://doi.org/10.3390/fluids9010017>)
- Kalogirou, S. A. (2009). *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*, 1st ed. Academic Press/Elsevier, USA.
- Kaushik, S. C., Rawat, R., Manikandan, S. (2017). An Innovative Thermodynamic Model for Performance Evaluation of Photovoltaic Systems: Effect of Wind Speed and Cell Temperature. *Energy Conversion and Management*, 136, 152-160. (<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.01.011>)
- Lamaamar, I., Tilioua, A., Benzaid, Z., Hamdi Alaoiu, M. A. (2022). Modelling Investigation of the Heat Transfer in a Polycrystalline Photovoltaic Module. *E3S Web of Conferences*, 336, 00038. (<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202233600038>)
- Mahmod, Z. M., Mohammed, A. J., Hussein, A. A. (2025). Numerical Simulation and Structural Optimization of Photovoltaic Systems: Investigating Environmental and Material Impacts on Efficiency and Durability. *Proceedings on Engineering Sciences*, 7(3), 2045-2056. (<https://doi.org/10.24874/pes07.03b.005>)
- 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. (<https://doi.org/10.4229/EUPVSEC20192019-4CO.2.4>).
- Nahim, H. M., Ibrahim, T., Faraj, J., Ali, S., Khaled, M., Darwiche, M. (2025). Optimizing Solar Panel Tilt Angles for Enhanced Energy Production: Case Studies in Lebanon. *Case Studies in Thermal Engineering*, 73, 106720. (<https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106720>).

Perovic, B., Klimenta, J., Tasić, D., Peuteman, J., Klimenta, D., Andjelkovic, L. (2017). Modeling the Effect of the Inclination Angle on Natural Convection from a Flat Plate: The Case of a Photovoltaic Module. *Thermal Science*, 21(2), 925-938. (<https://doi.org/10.2298/TSCI140821059P>)

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>).

Shmroukh, A. N. (2019). Thermal Regulation of Photovoltaic Panel Installed in Upper Egyptian Conditions in Qena. *Thermal Science and Engineering Progress*, 14, 100438. (<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.100438>)

Souka, A.F., Safwat, H.H. (1966). Determination of the optimum orientations for the double exposure flat-plate collector and its reflections. *Solar Energy*, 10, 170-174. ([https://doi.org/10.1016/0038-092X\(66\)90004-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(66)90004-1)).

Télesphore, N. C., Richy, A. M., Fiacre, Z., Melhyas, K., Audace, D. K. B., Pierre, A. D., Isaac, A., Clarence, S. G., François-Xavier, F. (2025). GIS-based Optimization of Photovoltaic Panel Orientation in Benin Using Genetic Algorithms and K-Means Clustering. *Solar Compass*, 16, 100142. (<https://doi.org/10.1016/j.solcom.2025.100142>).

pvlib.iam.ashrae, <https://pvlib-python.readthedocs.io/en/latest/reference/generated/pvlib.iam.ashrae.html>.

pvlib.solarposition, <https://pvlib-python.readthedocs.io/en/stable/reference/solarposition.html>.

PVsyst, <https://www.pvsyst.com>.

Repository of Building Simulation Climate Data, <https://climate.onebuilding.org/>.