

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Енергетика и процесна техника

Предмет: Соларна техника

Број индекса: 392/2017

Шћекић С. Вукашин

**Поређење карактеристика фотонапонских панела у
софтверском и реалном окружењу**

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Данијела Николић-ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру мастер рада кандидат треба да опише врсте и типове фотонапонских ћелија, њихов принцип рада, као и врсте фотонапонских система. Помоћу софтвера EnergyPlus симулирати рад фотонапонских система са различитим моделима фотонапонских панела. Приказати поређење основних величина фотонапонских панела (генерисана енергија и ефикасност), добијених помоћу моделирања у оквиру софтвера EnergyPlus, са мерењима која су добијена помоћу одговарајуће инсталације у реалним условима. Испитати утицај соларног зрачења, температуре и угла нагиба ФН панела на излазне велучине.

Препоручена литература:

- [1] V.V. Tyagi, Nurul A.A. Rahim, N.A. Rahim, Jeyraj A., L. Selvaraj, Progress in solar PV technology: Research and achievement, India, 2012.
- [2] T.M.Razykov, C.S. Ferekides, D. Morel, E. Stefanakos, H.S. Ullal, H.M. Upadhyaya, Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects, 2011.
- [3] Ламбић М., Соларне технологије – топлотни и фотонапонски системи, Београд 2013.
- [4] Д. Николић, М. Бојић, Ј. Радуловић, Ј. Скерлић, Д. Тарановић, Review of non-silicon and new photovoltaics technology for electricity generation, Proceedings of The Second International Conference on Renewable Electrical Power Sources MKOIE 2013, Београд 2013.

Ментор:

Крагујевац
фебруар 2021.

Др Данијела Николић, ванр. проф.

Списак илустрација

Слика 1- Поређење Сунчевог зрачења на годишњем нивоу на површини Земље са осталим залихама горива са годишњом потрошњом	2
Слика 2- Архимедово огледало (3)	3
Слика 3- Принцип рада Stirlingovog мотора	3
Слика 4- Вредности соларне константе током године	5
Слика 5- Дневно просечно трајање инсолације по месецима	6
Слика 6- Углови положаја Сунца	7
Слика 7- Расподела зрачења на Земљи у централној Србији	9
Слика 8- Сунчево зрачење на нагнуту површину	9
Слика 9- Фотонапонски ефекат у хелији	10
Слика 10- Кристалне ћелије	11
Слика 11- Czochralski метода	12
Слика 12- Силицијум високе чистоће у види гранула и штапова	13
Слика 13- Структура аморфне ћелије и њено практична примена у објектима	14
Слика 14- Фотонапонска ћелија израђена технологијом танког филма	14
Слика 14- Једноосно ротациони модул	15
Слика 15- Двоосно ротациони модул	15
Слика 16- Редна веза соларних ћелија	16
Слика 17- Паралелна веза соларних ћелија	16
Слика 18- Фотонапонска ћелија, модул, панел	17
Слика 19- Преглед ефикасности модула реномираних произвођача	18
Слика 20- Утицај зрачења на карактеристике модула	18
Слика 21- Ефикасност ПВ панела у односу на временске услове	19
Слика 22- Средње вредности ефикасности панела	19
Слика 23- Утицај температуре на карактеристике фотонапонске ћелије	20
Слика 24- Хлађење панела	20
Слика 25- Поређење промена температуре нехлађеног и хлађеног ПВ панела	21
Слика 26- Ефикасност нехлађеног и хлађеног ПВ панела	21
Слика 27- Утицај густине на ефикасност ПВ панела	22
Слика 28- Утицај наслага прашине на ефикасност ПВ панела	22
Слика 29- Самостални фотонапонски систем	23
Слика 30- Системи који су прикључени на јавну дистрибутивну мрежу	24
Слика 31- Фотонапонски пане, вентилатор, мерач температуре и дигитални мултиметри	25
Слика 32- Фотонапонски панели у експлоатацији	26
Слика 33- Покретни и фиксни панели у експлоатацији	27
Слика 34- Хлађење панела	27
Слика 35- Панели под углом од 60° (лево), и 30° (десно)	28
Слика 36- Функционисање EnergyPlus-a	29
Слика 37- Изглед фотонапонског генератора у програму EnergyPlus	31
Слика 38- Simple фотонапонски модел	32
Слика 39- Sandia фотонапонски модел	33
Слика 40- Еквивалентно коло у четворопараметарском моделу	42
Слика 41- Интезитет Сунчевог зрачења (W/m^2)	47
Слика 42- Електрична снага различитих модела симулације (ведро време)	47
Слика 43- Електрична снага различитих модела симулације (полуоблачно време)	49
Слика 44- Електрична снага различитих модела симулације (облачно време)	49

Слика 45- Теренске вредности симулације ПВ панела.....	50
Слика 46- Поређење промена температуре нехлађеног и хлађеног ПВ панела	51
Слика 47- Теренске и софтверске вредности електричне снаге	51
Слика 48- <i>EquivalentOne-Diode</i> модел.....	52
Слика 49- Зависност електричне снаге од температуре у <i>EquivalentOne- Diode</i> ...	53
Слика 50- Електрична снага различитих модела симулације (угао 0°).....	54
Слика 51- Електрична снага различитих модела симулације (угао 30°).....	54
Слика 52- Електрична снага различитих модела симулације (угао 60°).....	55
Слика 53- Електрична снага различитих модела симулације (угао 90°)	55
Слика 54- Панел под правим углом (<i>Google SketchUp</i>)	56

Резиме:

Соларна енергија представља обновљив и неограничени извор енергије, који својим зрачењем које греје нашу планету, ствара услове за живот и утиче на формирање климатских услова, а узрокује и стално обнављање енергије ветра, морских струја, таласа, водених токова. Соларна енергија се може трансформисати у топлотну енергију (преко соларних колектора) и у електричну енергију (преко фотонапонских панела).

Овај рад представља анализу и поређење карактеристика фотонапонских панела у софтверском и реалном окружењу. За моделирање фотонапонских панела коришћен је софтвер *EnergyPlus*, који поседује 3 модела фотонапонских панела. Симулације и мерења су вршена у граду Аранђеловцу.

Испитане су излазне карактеристике ПВ панела у зависности од услова експлоатације, као и од временских услова. На основу добијених резултата донети су закључци о оправданости коришћења фотонапонских (ФН или PV, енгл. Photovoltaic) панела у различитим условима експлоатације.

Кључне речи: Соларна енергија, Фотонапонски панели, Симулација, *EnergyPlus*, мерење

Abstract:

Solar energy is a renewable and unlimited source of energy, which with its radiation that warms our planet, creates living conditions and affects the formation of climatic conditions, and causes constant renewal of wind, sea currents, waves, water currents. Solar energy can be transformed into thermal energy (via solar collectors) and into electrical energy (via photovoltaic panels).

This paper presents an analysis and comparison of the characteristics of photovoltaic panels in a software and real environment. EnergyPlus software was used for modeling photovoltaic panels, which has 3 models of photovoltaic panels. Simulations and measurements were performed in the city of Arandjelovac.

The output characteristics of PV panels were examined depending on the operating conditions, as well as the weather conditions. Based on the obtained results, conclusions were made on the justification of the use of photovoltaic (PV) panels in different operating conditions.

Keywords: Solar energy, Photovoltaic panels, Simulation, *EnergyPlus*, measuring

Садржај:

1. УВОД.....	1
2. СОЛАРНА ЕНЕРГИЈА.....	2
2.1. Сунце као извор енергије	2
2.2. Историја коришћења соларне енергије	3
2.3. Енергија Сунца на земљиној површини	5
3. ИСКОРИШЋЕЊЕ СОЛАРНЕ ЕНЕРГИЈЕ.....	10
3.1. Принцип рада соларне ћелије.....	10
3.2. Подела соларних ћелија	11
3.2.1. Подела соларних ћелија према начину израде и типу истих.....	11
3.2.1.1. Монокристални силицијум.....	12
3.2.1.2. Поликристални силицијум.....	13
3.2.1.3. Аморфни силицијум	13
3.2.2. Подела соларних система према положају у експлоатацији	15
3.3. Повезивање соларних ћелија	16
3.4. Ефикасност соларних ћелија	17
3.5. Фактори који утичу на ефикасност соларних ћелија	18
3.6. Подела фотонапонских система	23
4. ОПРЕМА И ПОСТУПАК МЕРЕЊА ГЕНЕРИСАНЕ ЕНЕРГИЈЕ У ФОТОНАПОНСКИМ ПАНЕЛИМА.....	25
Опрема за експеримент.....	25
5. СОФТВЕРСКИ ПАКЕТИ КОРИШЋЕНИ ЗА СИМУЛАЦИЈУ	29
5.1. EnergyPlus.....	30
5.2. Google SketchUp.....	30
5.3. Модели фотонапонског система.....	30
5.3.1. Simple фотонапонски модел	31
5.3.2. Sandia фотонапонски модел	32
5.3.3. Equivalent One Diode модел	39
6. ИСПИТИВАЊЕ КАРАКТЕРИСТИКА ПАНЕЛА	46
6.1. Испитивање утицаја Сунчевог зрачења на излазне карактеристике фотонапонских панела	46

6.2.	Испитивање утицаја температуре на излазне карактеристике фотонапонских панела	50
6.3.	Испитивање утицаја нагиба на излазне карактеристике фотонапонских панела	53
7.	ЗАКЉУЧАК.....	57
8.	ЛИТЕРАТУРА.....	58

1. Увод

Настојање човека у блиској прошлости да створи себи што комфорније услове за живот проузроковало је велико повећање потрошње енергије. Као што знамо залихе те енергије се временом троше, па тако имамо процене са текућим стопама потрошње нафте и гаса да су довољне за наредних 40 до 60 година. Што се тиче резерви угља оне су лимитиране до наредних 250 година. Посматрајући нашу земљу и садашње стање које говори да се 70 % енергије добија из угља, те резерве су прорачунате на 3.3 милијарде тона угља, односно неких 50 до 70 година експлоатације. Поред ових чињеница морамо навести да су те залихе расуте по нашој земљи, добар део и на Косову. Велики део овог угља је лошег квалитета, а поред тога је и тешко допрети до њега. Тренутно је то наша реалност за производњом електричне енергије, што немора да значи да ће тако бити у скорој будућности [1].

Зато се соларна енергија намеће као реално решење, неисцрпног извора енергије, чијом употребом се може генерисати електрична енергија довољна да задовољи све светске потребе за енергијом. То је бесплатна енергија која не загађује животну средину, као горе наведена горива, не производи буку приликом коришћења... Са друге стране постоје одређене мане коришћења соларне енергије, где су највидљивије оне које се тичу самог интензитета Сунчевог зрачења (интензитет зрачења зависи од доба дана, годишњег доба, висине Сунца током дана, облачности, падавина, итд.)[1].

У овом раду ће бити представљени потенцијал као и могућности искоришћења соларне енергије. Описали смо поступак и технологију израде соларних ћелија, усредсредивши се на старије генерације ћелија које су израђене од поликристалног, монокристалног и аморфног силицијума. У оквиру последње тачке овог рада, навели смо један експеримент који је рађен, описали поступак и опрему која је коришћена у том раду.

2. Соларна енергија

2.1. Сунце као извор енергије

Сунце је Земљи најближа звезда и захваљујући његовој гравитацији, наша планета по елиптичној путањи кружи око њега. Наша звезда се око своје осе окрене за 25 дана (екватор), односно за 33 дана на половима, што указује на њено флуидно стање (заправо стање плазме). Сунце је ужарена лопта, масе од $1,99 \cdot 10^{30}$ kg, средње густине од 1410 kg/m^3 пречника $1\,391\,980 \text{ km}$ (фотосфера), која у спољашњем слоју садржи око 75% водоника, који се у унутрашњости, под високим притиском и температуром која достиже десетине милиона Келвина (процена је $13\,600\,000 \text{ K}$), у току процеса термонуклеарне физије претвара у хелијум [2].



Слика 1- Поређење Сунчевог зрачења на годишњем нивоу на површини Земље са осталим залихама горива са годишњом потрошњом

Та термонуклеарна физија производи огромну количину енергије која се излучује у Космос. Сунчева луминисценција (исијавање) износи $3,83 \cdot 10^{33} \text{ erg/sec}$ или $3,83 \cdot 10^{20} \text{ MW}$. Средња температура површине Сунца (далеко од „термонуклеарног реактора“ у унутрашњости) износи 5800 K . После брзином светлости пређеног пута од $149\,597\,892 \text{ km}$ (средње удаљење Земље од Сунца), Сунчево зрачење стиже до Земље. Од укупне Сунчеве енергије, на горњу границу Земљине атмосфере стигне $174,3 \cdot 10^9 \text{ MW}$, што представља њен $4,55 \cdot 10^{-10}$ део [2].

Потенцијал Сунчевог зрачења је јако велики, што је и приказано горе на слици 1. Целокупна наранџаста коцка приказује да је годишње Сунчево зрачење 50 пута већа од свих залиха горива који се на годишњем нивоу троше. И поред добро потенцијала постоје одређене препреке које спречавају огроман део коришћења соларне енергије а везане су првенствено за технологију искоришћења исте, као и цене самог система. На нашем подручју друга препрека која је везана за цену система је још израженија због ниске цене електричне енергије, па је самим тим период отплате таквог система дужи.

2.2. Историја коришћења соларне енергије

Још од праисторије, (тачније V век пре н.е.) у човеку се јавља свест о коришћењу соларне енергије. Сократ је вршио експерименте, односно проучавао утицај кретања Сунца на положај и конструкцију куће, а све у циљу да она лети буде хладнија, а зими топлија.

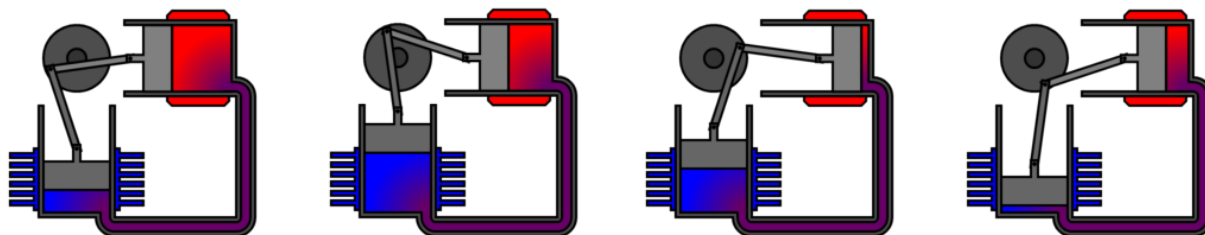
Архимед долази на идеју 212. године пре н.е. да искористи соларну енергију, прецизније Сунчев зрак који би пао на мноштво полираних штитова који би представљали конкавно огледало, како би упалио римску флоту, што је и приказано на слици 2.



Слика 2- Архимедово огледало (3)

Међу првом индустријском употребом соларне енергије долази током 18 века кад се развијају соларне пећи за топљење метала. Примера ради, једна таква пећ француског научника *Antoine Lavoisier* састављена од примарног сочива пречника 1.32 m, и секундарног пречника 0.2 m, могла је достићи температуру од 1750 °C.

Напретку савремених соларних система допринео је и шкотски министар *Dr Robert Stirling*, који је изумео пумпу за воду која је била напајана преко соларне енергије. Мотор те пумпе је добијао снагу из загрејаног гаса који се налазио у цилиндричном суду, који се састојао од две спојене коморе које су биле потпуно затворене. Услед загревања гаса долази до разлике температура у цилиндрима, што има за циљ покретање клипова у цилиндрима који су директно везани за замајац, како што је и представљено на слици 3 [4].



Слика 3- Принцип рада Стирлинговог мотора

Постоји још доста извора везаних за коришћење соларне енергије, али у даљем раду ћемо се усредсредити директно на фотонапонске ћелије које заузимају добар део овог рада.

Енергија Сунчевог зрачења се посредством фотонапонских ћелија претвара у електричну енергију, коју даље можемо користити за обављање жељених активности. Значење речи (*photovoltaic*) потиче од грчке речи *photo* (светло) и *volt* (по Александру Волту). Овај термин се први пут налази у употреби крајем 19 века, и у "грубом" преводу би означавао производњу "струје из светла".

Француски научник *Edmond Becquerel* 1839. године открива фотонапонски ефекат, са свега 19 година. Вероватно разлог овако раног истраживања се везује за постојаност лабораторије његовог оца и великог научника из области физиологије, електрохемије, метеорологије и пољопривреде *Antoine-a Cesara*. Он је овај ефекат описао као производњу електричне енергије када се две плоче начињене од платине или злата уроне у киселину, неутрални или алкални раствор, па се затим изложе на одговарајући начин сунчевом зрачењу.

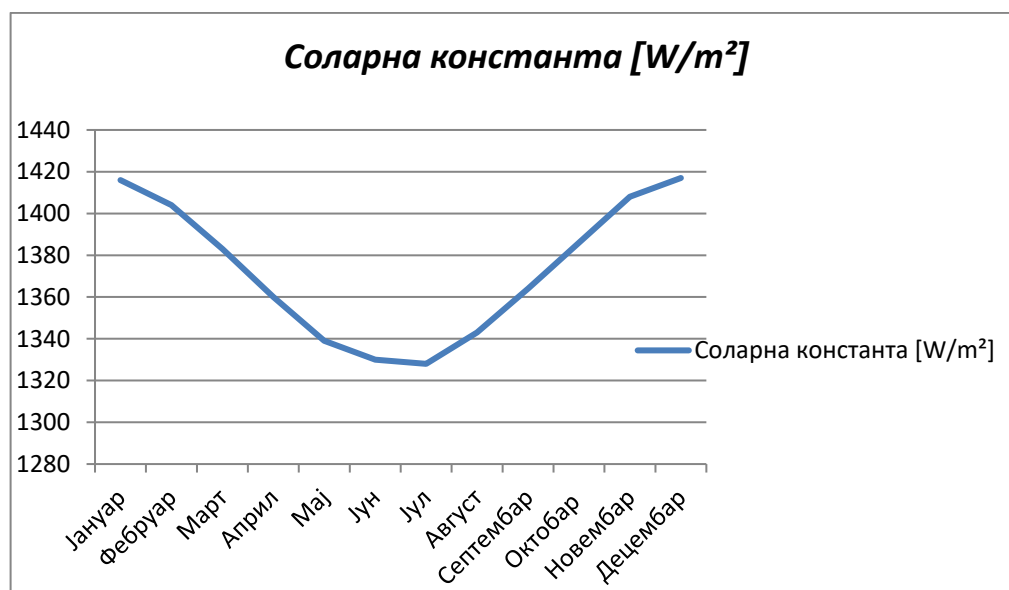
Овај његово откриће пашће у заборав све до 1883. године када је *Charles Fritts* направио прву праву соларну ћелију депондирајући на полупроводнички селен слој злата, чиме је остварио потенцијалну баријеру на контакту метал-полупроводник. Ова револуционарна ћелија је у то време имала ефикасност свега 1%. (5)

Било је доста покушаја до 1954. године да се направи соларна ћелија која ће имати већу ефикасност од горе наведене. Углавном се радило о употреби и истраживању различитих материјала као што је и данас случај у овој грани енергије, па су тако коришћени материјали попут кадмијум селенида (CdSe), германијум (Ge)... Након поменуте године долази до наглог развоја соларних ћелија у *Bell Laboratories* од стране америчких научника *Pearson, Fuller I Chapin* који развијају монокристалну силицијумску ћелију, која је имала почетну ефикасност од 4%, да би недуго затим та ефикасност била 11%. Ова испитивања су вршена у оквиру свемирских програма, за напајање свемирских сателита. Разлог за оваквом почетном применом лежи у цени која је била јако висока за цивилну употребу, у односу на сателите чији су то били прихватљиви трошкови у односу на остале огромне трошкове. Све до енергетске кризе 1970-их година није се кренуло са популарисањем коришћења овог али и других обновљивих видова енергије. Произведена снага од 1kW соларне енергије коштала би око 250 \$ у поређењу са 2\$-3\$ снаге добијене из електране на угаљ.

Након 1990. године фотонапонска индустрија приказује константан годишњи раст са преко 20 %, а од 1997. године и преко 33%. Почетком овог века светски инсталисани капацитети су достигли 1000 MW. У 2017. години та вредност је капацитета око 404,5 GW, а највећи произвођачи соларних панела су углавном из Кине.

2.3. Енергија Сунца на земљиној површини

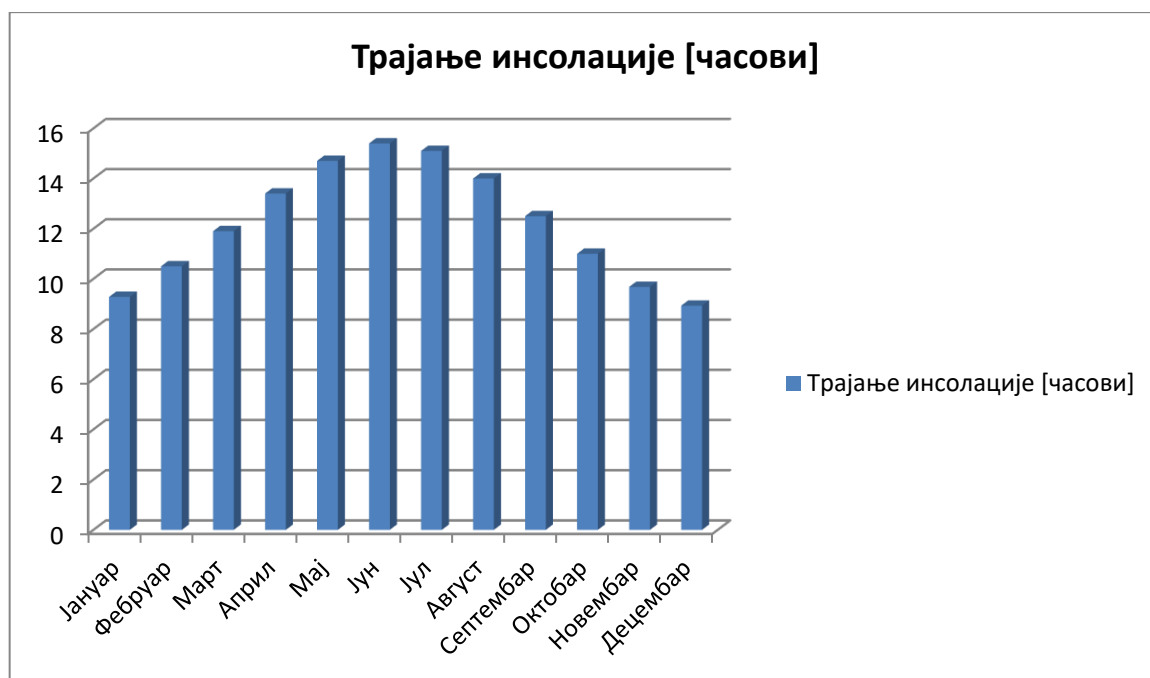
Сунце поседује огромну количину енергије коју исијава у атмосферу, чији један део стиже и до Земље. Иако је та енергија значајно умањена од оне коју Сунце исијава са своје површине, може бити задовољавајућа уколико се употреби на исправан начин. Енергија Сунца која стигне на површину Земљине атмосфере се назива соларном константом и износи $I_0=1367 \text{ W/m}^2$. Иако у свом опису носи назив "константа", то се баш не може тумачити тако. Због благо елиптичне путање Земље долази до промене одстојања Сунца, што ће директно утицати и на интензитет те енергије коју прима земљина атмосфера. Максималне и минималне вредности соларне константе се дешавају при најближем, односно најудаљенијем положају Земље према Сунцу и износе 1417 W/m^2 , тј. 1328 W/m^2 .



Слика 4- Вредности соларне константе током године

Услед утицаја атмосфере, интензитет соларне константе слаби па као нов термин који означава просечно сунчево зрачење на годишњем нивоу на јединичну хоризонталну површину уводимо назив инсолација. Вредности инсолације у односу на оно зрачење које стиже на површини земљине атмосфере се разликује због географске ширине места, годишњег доба, доба дана, чистоће атмосфере, облачности, оријентације и нагиба површине. То зрачење које пада на површину Земље и има просечну вредност 343 W/m^2 , се даље процентуално распоређује: 30% отпада на Земљин албедо, 25% апсорбују гасови и аеросоли(облаци), а 45% загрева површину Земље(водене и копнене површине). Како инсолација представља битан податак приликом прорачуна исплативости соларних система, у доле приказаној табели имали дневни просек трајања инсолације за сваки месец у току године. Просечне вредности трајања инсолације за Србију се крећу око 2000 часова годишње.

Део сунчевог зрачења пробија се кроз атмосферу директно. Међутим, рефлектовано зрачење се простире у свим правцима, па се делимично враћа у свемир, а само делом доспева на Земљу. Слично је и са апсорбованим зрачењем, које се накнадно емитује, такође у најразличитијим правцима, па тако и у правцу Земље. На тај начин површина Земље прима сунчево зрачење директним и индиректним путем, па се тако разликује директно и дифузионо сунчево зрачење. Веће слабљење директног зрачење прати пораст дифузионог, и обрнуто.



Слика 5- Дневно просечно трајање инсолације по месецима

Директно Сунчево зрачење

То је компонента укупног Сунчевог зрачења које директно стиже до површине Земље. Уколико хоћемо да израчунамо колика нам енергија директног Сунчевог зрачења стиже на јединичну површину нагнуту под одређеним углом Σ у односу на хоризонталну раван на Земљи, у идеалним условима (при јасном и ведром дану) користимо следећи израз:

$$I_{BC} = I_B \cos \theta,$$

где је I_B – енергија директног Сунчевог зрачења које у јединици времена доспева нормално на квадратни метар површине, θ – упadni угао Сунчевих зрака на квадратни метар површине и Σ – угао нагиба пријемне површине у односу на хоризонталну раван на Земљи. [2]

Упадни угао Сунчевих зрака (θ) који доспевају на јединичну површину нагнуту под неким углом Σ у односу на хоризонталну раван на Земљи се може изразити помоћу следеће релације:

$$\cos \theta = \cos \beta \cos (\phi_s - \phi_c) \sin \Sigma + \sin \beta \cos \Sigma$$

где је β – висина Сунца, ϕ_s – азумит Сунца, ϕ_c – азумитни угао јединичне површине.

Сунчево зрачење након проласка кроз Земљину атмосферу слаби због расејавања и апсорпције на атомима, молекулима и јонима присутних гасова. То слабљење је повезано са дужином пута Сунчевог зрачења кроз атмосферу, као и њеним физичким и хемијским карактеристикама, а све то је описано у Bouquer-Lambert-Berovog закону:

$$I_B = A e^{-km}$$

где је: I_B – енергија Сунчевог зрачења која у јединици времена пада нормално на квадратни метар површине Земље (W/m^2),

$A = 1160 + 75 \sin \left[\frac{360 \cdot (n-275)}{365} \right]$ - енергија екстратерестичног зрачења које у јединици времена пада наормално на квадратни метар површине (W/m^2)

$k = 0,174 + 0,035 \left[\frac{360 \cdot (n-100)}{365} \right]$ - коефицијент атеунације Сунчевог зрачења у Земљиној атмосфери који зависи од састава и промене у атмосфери,

m – оптичка ваздушна маса, која зависи од упадног угла Сунчевог зрачења и

n – редни број дана у години почевши од 1. Јануара.

У соларној енергетици оптичка ваздушна маса представља однос дужине пута Сунчевих зрака кроз атмосферу и дужине пута Сунчевих зрака кроз Земљину атмосферу када је Сунце у зениту:

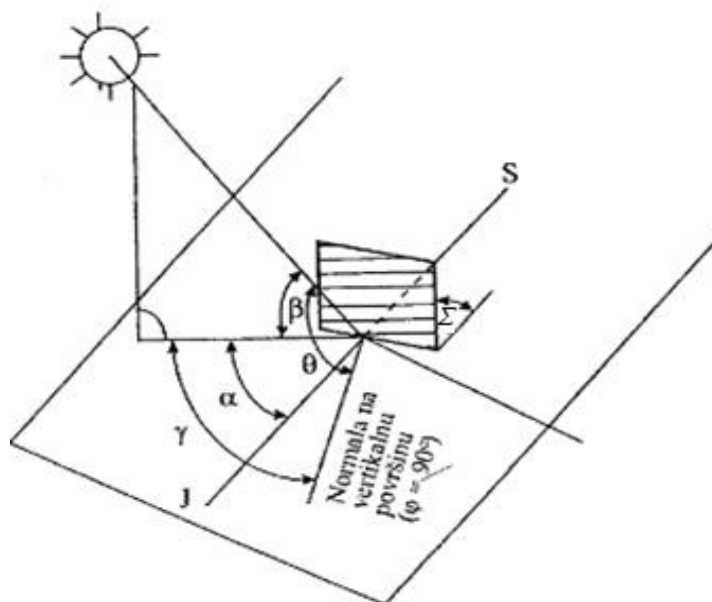
$$m = \frac{1}{\cos \alpha}$$

где је α угао између упадних Сунчевих зрака и нормале на површину Земље.

Како би нам ови изрази били што разумнији, на слици 6 објаснићемо наведене појмове.

Висина сунца представља тренутни положај Сунца према некој тачки на Земљи, тј. на слици то је угао који заклапају директни сунчеви зраци са хоризонталном равни. Вредности овог угла варираће услед промене међусобног одстојања Земље и Сунца, географске ширине места (l), часовног угла (h) и деклинације Сунца (δ). За израчунавање користимо следећи образац:

$$\sin \beta = \sin \delta \sin l + \cos \delta \cos l \cos h$$



Слика 6. Углови положаја Сунца- α - азумит Сунца према југу; β - висина сунца; γ - Сунчано-зидни азумит; θ - упадни угао; Σ - угао нагиба површине на коју доспева сунчево зрачење

Упадн угао дефинише онај угао под којим сунчеви зраци падају на одређену површину, у односу на њену нормалу. Овај угао директно зависи од висине сунца и нагиба површине према хоризонталној равни. [2]

Азумит представља угаоно растојање између хоризонталне пројекције директних сунчевих зрака и правца север-југ. Одређује положај Сунца према странама света, и најчешће се изражава у степенима, као угао од 0° до 360° према правцу севера. Може се одредити као:

$$\cos \alpha = \frac{(\sin \beta \cdot \sin l - \sin \delta)}{(\cos \beta \cdot \cos l)}$$

Дифузионо Сунчево зрачење

Израчунавање дифузионе компоненте сунчевог зрачења је јако компликовано. Сунчево зрачење на путу до земљине површине доспева до молекула гасова и честица, чиме их побуђује на осциловање и зрачење, тако да они постају извор електромагнетног зрачења. То зрачење се сада предаје неједнако у свим смеровима, чиме је одређивање ове компоненте знатно отежано. Зато су развијени одређени модели функције расподеле дифузионог зрачења, а међу најједноставнијим је изотропни модел Lui, Jordan i Klein. Они су дефинисали ово зрачење као зрачење које има исти интензитет из свих праваца, пропорционално је директној компоненти зрачења, независно од позиције Сунца на небуу том тренутку, а изражава се као:

$$I_{DH} = C I_B$$

где је I_{DH} – дифузиона компонента Сунчевог зрачења које у јединици времена пада на јединичну хоризонталну површину на Земљи, I_B – компонента директног Сунчевог зрачења које у јединици времена пада нормално на јединичну површину на Земљи и C -дифузни фактор.

Дифузни фактор се може израчунати помоћу апроксимативног израза:

$$C = 0,095 + 0,04 \cdot \sin \left[\frac{360 \cdot (n-100)}{365} \right]$$

где је n - редни број дана у години почевши од 1. Јануара.

Оно што нас много више занима јесте колико дифузино зрачење добија површина нагнута под углом према хоризонталној равни. То се може приказати помоћу следећег обрасца:

$$I_{DC} = I_{DH} \left(\frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right) = C I_B \left(\frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right)$$

Дифузиони утицај може бити двојак. Оно што је неповољно јесте да смањује јачину директног Сунчевог зрачења, а други утицај је узроковање распршеног зрачења неба. [2]

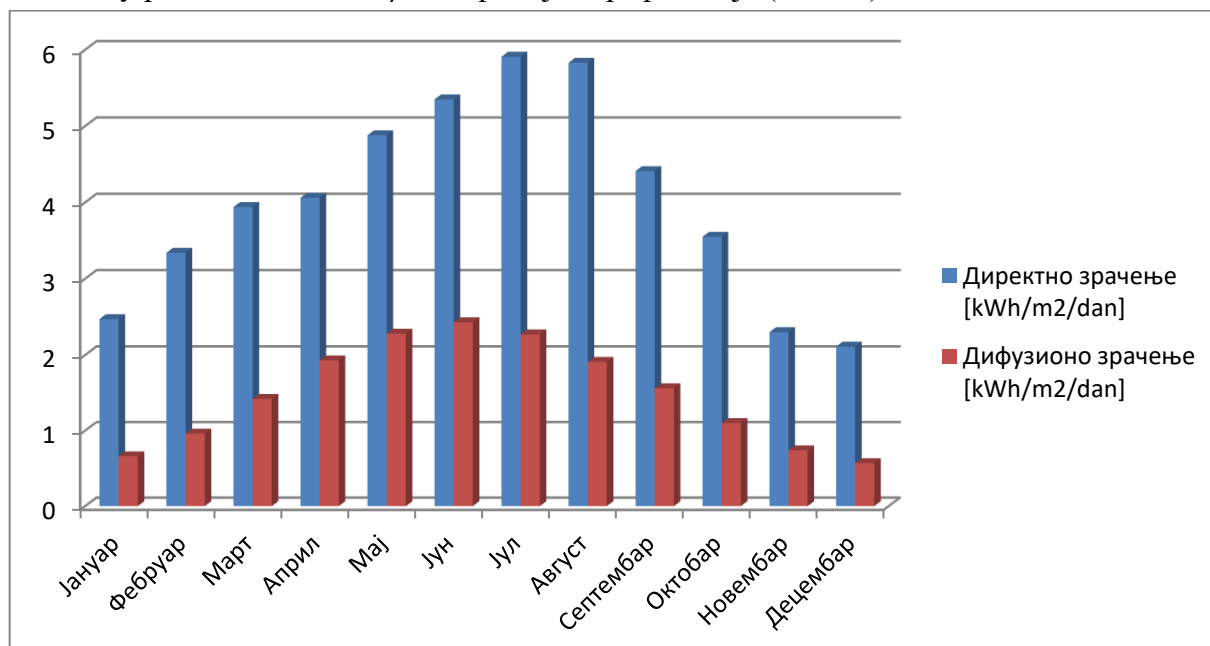
Рефлектовано Сунчево зрачење

Појава рефлексије се дешава када Сунчево зрачење наилази на тло или водене површине, где ће се у зависности од карактеристике подлоге већи или мањи део рефлектовати. Ово својство подлоге да одбије зрачење изражава се коефицијентом рефлексије, или такозваним албедом. Алbedo представља однос јачине рефлектоване зрачења према укупном упадном зрачењу на посматрано тело. Потпуно бело тело има алbedo 1,0 јер потпуно одбија зрачење, а потпуно црно тело има алbedo нула. Ако тело има алbedo 0,5 значи да одбија половину зрачења које пада на њега.

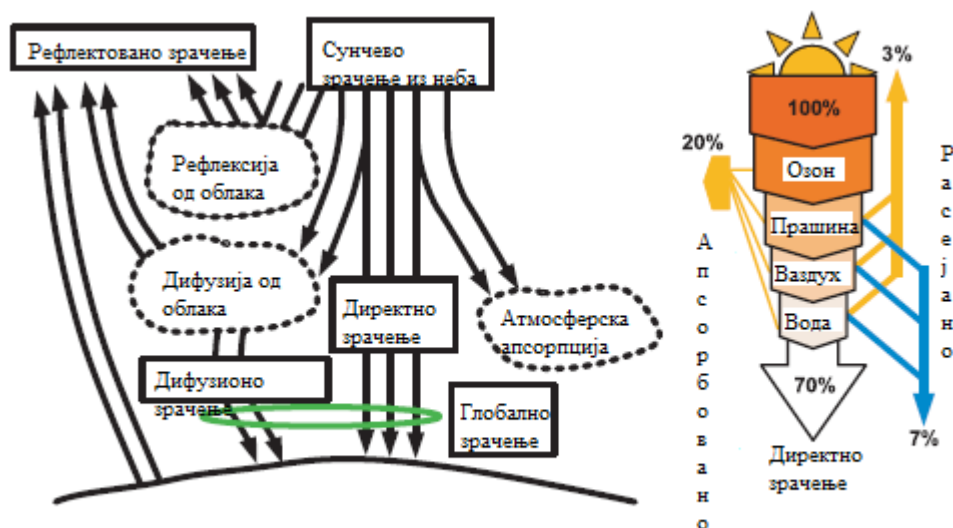
За израчунавање енергије рефлектованог Сунчевог зрачења (I_{RC}) које у јединици времена пада на квадратни метар површине нагнуте под углом Σ у односу на хоризонталну раван на Земљи при јасном и ведром дану погодна је користити апроксимативни израз :

$$I_{RC} = \rho (I_{BH} + I_{DH}) \left(\frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right) = \rho I_B (C + \sin \beta) \left(\frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right)$$

где је β - висина Сунца, Σ - угао нагиба једничне површине у односу на хоризонталну раван на Земљи и ρ - коефицијент рефлексије (алbedo) [2].



Слика 7- Расподела зрачења на Земљи у централној Србији

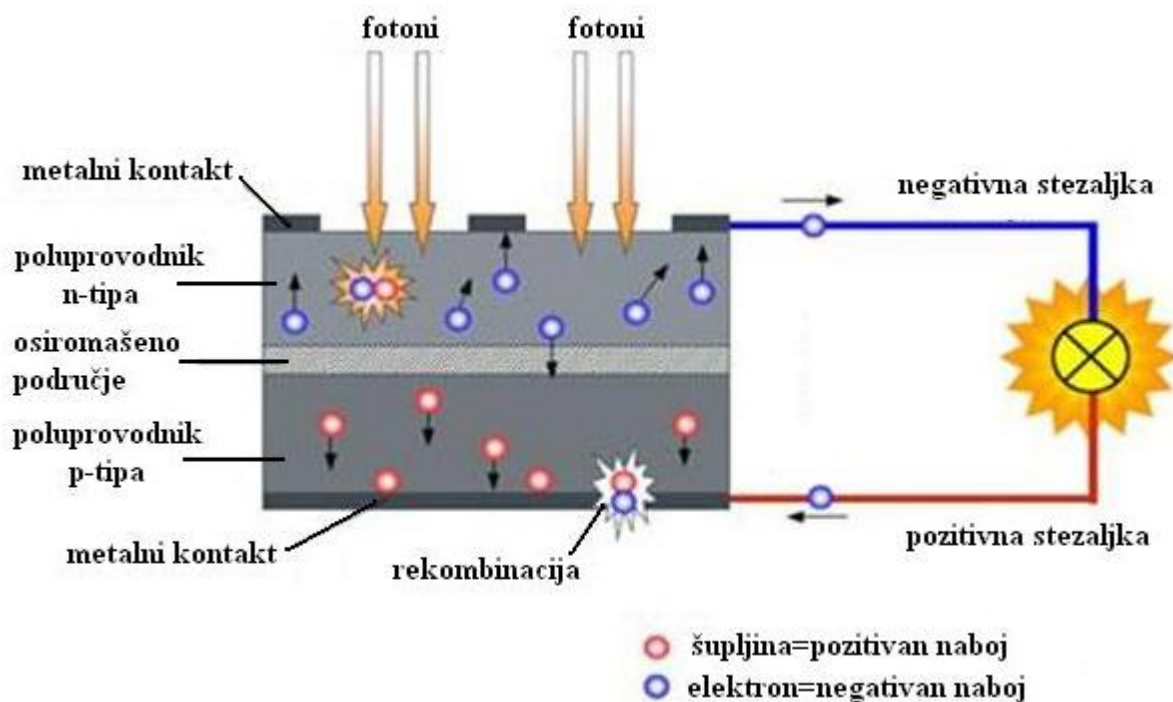


3. Искоришћење соларне енергије

Два основна директна начина конверзије Сунчевог зрачења се могу поделити на конверзију енергије у топлотну и електричну енергију. Нашу пажњу у даљем раду ћемо усмерити на претварање соларне енергије у електричну. За ову конверзију енергије користе се фотонапонски панели који су састављени од више фотонапонских модула, који су сачињени од скупа соларних ћелија.

3.1. Принцип рада соларне ћелије

Соларна ћелија је елемент соларног система који директно претвара Сунчеву енергију у електричну. Када дође до апсорбовања Сунчевог зрачења, на њеним крајевима се јавља електромоторна сила, и као што је приказано на слици 9, таква ћелија постаје извор електричне енергије. Код најприступачније силицијумске соларне ћелије на површини плочице п-типа дифундирају се примесе, као што су на пример фосфор, тако да на површинском слоју настаје подручје н-типа полупроводника. Да би се скупила наелектрисања која су настала апсорпцијом фотона из Сунчевог зрачења, на предњој страни се налази метална решетка, док је са задње стране метални контакт. Површина решеткастог контакта је мала, око 5% укупне површине, што неће у великој мери утицати на апсорпцију Сунчевог зрачења. Када се соларна ћелија осветли, апсорбовани фотони производе парове електрон-шупљина. Ако апсорпција настане далеко од п-н споја настали пар ће се убрзо рекомбиновати. Али ако апсорпција настане унутар или у близини п-н споја, унутрашње електрично поље, које постоји у осиромашеном подручју, одваја настали електрон и шупљину (електрон се креће према н-страни, а шупљина према п-страни). Такво скупљање електрона и шупљина на одговарајућим странама п-н споја проузрокује електромоторну силу на крајевима ћелије. Предња страна ћелије је обично прекривена провидним антирефлексијским слојем који смањује рефлексију светлости, па самим тим повећава ефикасност ћелије. [6].



Слика 9- Фотонапонски ефекат у ћелији

Основни параметри који описују једну соларну ћелију су снага исте, као и ефикасност претварања соларне енергије у електричну.

Снагу можемо дефинисати као производ напона и струје :

$$P = U \cdot I [W]$$

Ефикасност представља однос између максималне снаге соларне ћелије P_m , и снаге Сунчевог зрачења P_u које пада на површину ћелије A .

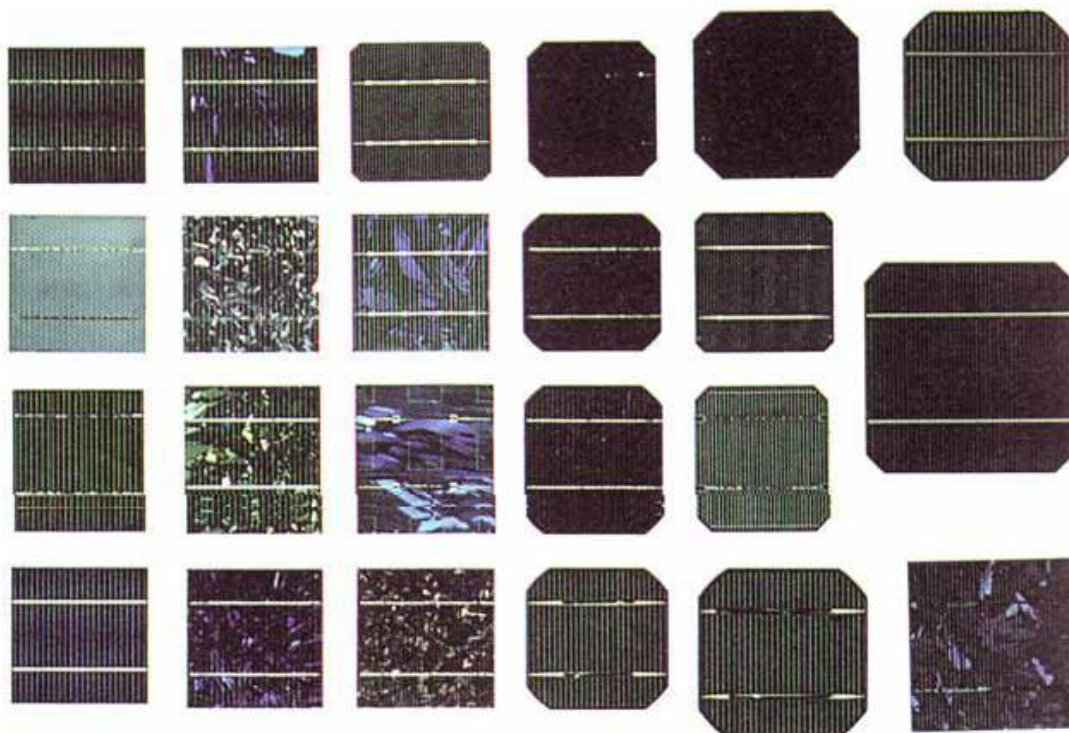
$$\eta = \frac{P_m}{P_u} = \frac{P_m}{EA} = \frac{ImUm}{EA}$$

где је E Сунчево зрачење.

3.2. Подела соларних ћелија

3.2.1. Подела соларних ћелија према начину израде и типу истих

Израда фотонапонских ћелија се базира на различитим типовима полупроводника, који могу бити сложени у различите структуре, а све у корист њихове ефикасности. Технологија производње фотонапонских ћелија базира се на силицијуму, који може бити подељен на монокристални, поликристални, и аморфни.



Слика 10- Кристалне ћелије

Силицијум припада четвртој групи периодног система, и после кисеоника то је најзаступљенији елемент у земљиној кори. Може се јавити као кварц, аметист, калцедон, ахат, опал. Поседује стабилност на температурама до 200°C , и представља главни

полупроводнички елемент како у тренутној тако и у надлазећој електронској индустрији.

3.2.1.1. Монокристални силицијум

Овај тип материјала за израду соларних ћелија има једнослојну структуру, односно састављен је од материјала који је модификован тако да се на једној страни ћелије налази р-спој, а на другој п-спој полупроводника. Карактеристике овог типа ћелије су задовољавајуће, имајући у виду њихову ефикасност од 22%, тј. стварну ефикасност од око 15%. Као једини недостатак овим ћелијама се може приписати висока цена производње, која је везана за компликованост процеса производње. Од свих процеса производње могу се издвојити најпоузданији попут *Czochralski (Cz)Float-zone(FZ)*, док се у задње време све више користе такозвани *Ribbon growth* технологија. *Czochralski* методом, силицијум високе чврстоће се загрева на високој температури док се на растопи, као што је приказано на слици 11. Затим се површински део растопљеног силицијума који се налази у цилиндричном калупу додаје зрнце монокристалног силицијума. Како се зрнце полагамо уздиже из калупа, атоми растопљеног силицијума крећу да се згрушавају и стварају монокристалну структуру.



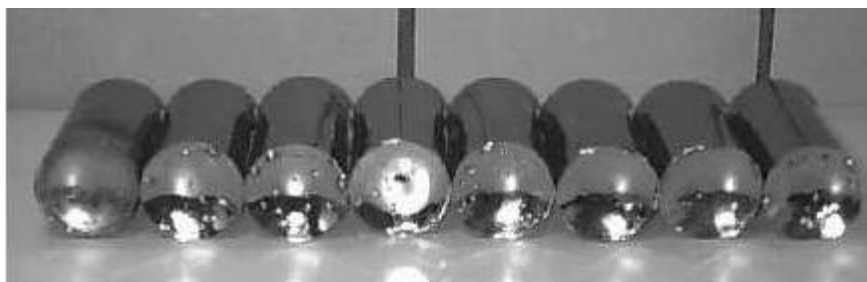
Слика 11- Czochralski метода

Поређењем *Float-zone* у односу на *Czochralski* добијамо чистију кристалну структуру због непостојања посуде за топљење. У овом процесу полуга сачињена од силицијума високе чистоће поставља се изнад монокристалног зрна те се пропушта кроз електромагнетну завојницу. Магнетно поље које ствара завојница ће проузроковати електрично поље унутар полуге, а све у циљу загревања и топљења површинског споја између полуге и зрна. Са уздицањем завојнице, унутар споја полуге и зрна формира се монокристални силицијум који "расте на горе". Ова два процеса који производе монокристални силицијум у облику калупа или подлоге, потребно је резати у јако танке плочице које проузрокују губитак скупо произведеног материјала, који може бити око 20%. Како би се избегла наведена непогодност, појавила се нова технологија названа *Ribbon-growth*. Процес почиње са два монокристала силицијума који расту те заузимају површину танког оквира док се полагамо извлаче из посуде са течним силицијумом. Након извлачења оквира из посуде вади се готова танка плочица. Поред малог губитка материјала као предности овог процеса, јавља се мана у лошијем квалитету монокристалног силицијума који није на висини *Czochralski* и *Float-zone*.

Након описаних процеса, да бисмо произвели једну употребљиву ћелију, неопходно је прво допирати такву ћелију да бисмо добили р-тип, односно п-тип полупроводника. Затим се врши пресвлачење ћелије антирефлексијским средством како би се повећала ефикасност исте, и потом им се додају електрични контакти. [7]

3.2.1.2. Поликристални силицијум

За добијање поликристалног силицијума користи се кварцни песак, редукцијом угљеника на високим температурама (1500-1700°C) чиме се остварује чистоћа силицијума од 99%. За производњу индустријског силицијума потребно је искористити 14 kWh електричне енергије и три килограма кварцног песка. Како је за потребе електронике овај силицијум некористан, потребно је извршити хемијско пречишћавање, и то Сименсовим поступком на 300 °C.



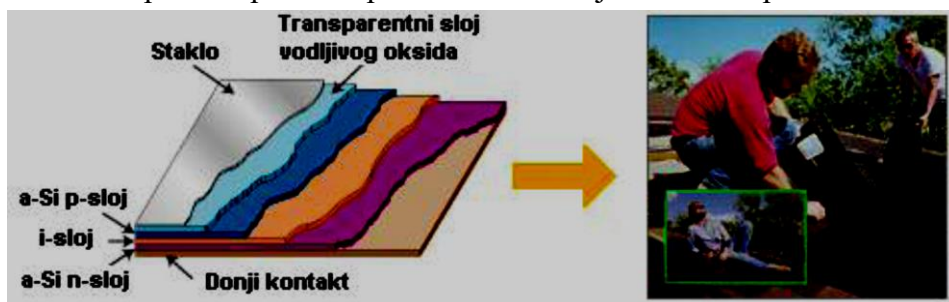
Слика 12- Силицијум високе чистоће у види гранула и штапова

Поликристални силицијум је сачињен од више мали кристала, за разлику од монокристалног силицијума, због чега долази до појаве границе, које спречавају ток електрона па их подстичу на рекомбиновање са шупљинама што резултира смањењем излазне снаге. Овај силицијум је могуће произвести на више начина, најшире методе се састоје тако што се излива течни силицијум у калупе, затим се оставља да се згусне у четвртаст облик. За добијање танке плочице врши се исецање оваквог четвртастог комада. Овај процес производње је доста јефтинији у односу на процес производње монокристалног силицијума, што директно утиче на ефикасност ових ћелија која се креће у опсегу за теоријску ефикасност од око 18%, тј. стварну ефикасност од 10 до 13% [7].

3.2.1.3. Аморфни силицијум

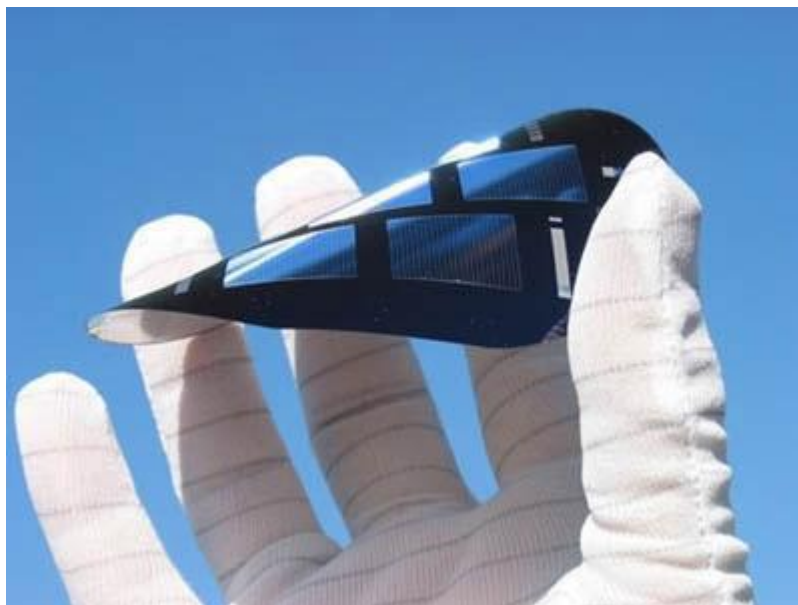
Прва појава аморфног силицијума се дешава 1974. године, да би 1980. године настала прва комерцијална соларна ћелија ефикасности 3%. Оно што разликује ову врсту ћелија у односу на друге је то да атоми не формирају кристалну структуру унутар материјала. је материјал који има низ предности, и као такав обећава много у будућности. Он упија сунчево зрачење 40 пута ефикасније у односу на монокристални силицијум, тако да кад се ћелија обасја, слој дебљине од 1 μm може упити и до 90 % енергије сунчевог зрачења. Ово својство аморфног силицијума би могло знатно снижити цену ФН технологије. Велика предност аморфног силицијума тиче се економског карактера, то је да се овај материјал може произвести на ниским температурама, да може бити положен на неке јефтиније подлоге попут пластике, стакла, метала и сл., где се може уграђивати као саставни део објеката. Међу највећим недостацима аморфног силицијума је нестабилност. Након првог излагања сунчевом зрачењу, долази до смањења излазне снаге кроз одређени временски период. Ови губици излазне снаге су од 20 %, док се ћелија аморфног силицијума нестабилизује. Теоријска ефикасност ћелије аморфног силицијума је око 11.5 %, док је стварна ефикасност око 7 % [7].

На слици 13 је приказан начин интегрисања аморфног силицијума у објекте, тачније на кров једног објекта који производи електричну енергију. Због једноставног својства аморфног силицијума, ове ћелије су тако израђене да имају ултра танак горњи р-слој ($0.008\mu\text{m}$), дебљи ($0.5\text{--}1\mu\text{m}$) недопирани i-слој, те изразито танак доњи п-слој ($0.02\mu\text{m}$). Оваква структура се назива р-і-п структура. Знајући да је горњи слој ултра танак, већина светлости ће проћи директно кроз њега на i-слој где ће генерисати слободне електроне.



Слика 13- Структура аморфне ћелије и њено практична примена у објектима

Поређење ћелија базираним на кристалном силицијуму, технологија танког филма је јефтинија услед мање количине коришћених материјала и производних процеса. Коришћењем мање количине материјала имамо за последицу дебљину ћелије од 25-260 nm. Овакве ћелије имају степен корисности око 5-12 %. [7]



Слика 14- Фотонапонска ћелија израђена технологијом танког филма

3.2.2. Подела соларних система према положају у експлоатацији

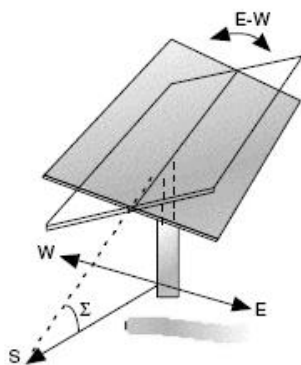
Сви соларни системи се у зависности од оптималног положаја могу поделити на фиксне пријемнике, и пријемнике који прате кретање Сунца.

Фиксни пријемници

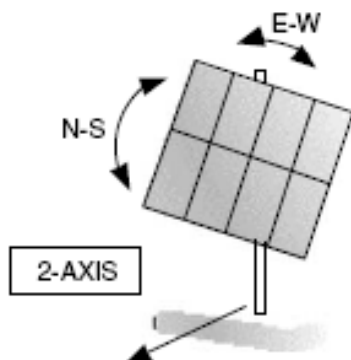
То су они пријемници који немају могућност праћења позиције Сунца у току дана. Такви системи се најчешће причвршћују на кровове или фасаде зграде, куће, итд... Због самог фиксирања степен искоришћења је мањи у односу на оне системе који прате кретање Сунца. Јако битан услов који би требао да буде задовољен јесте да фиксно постављен пријемник Сунчевог зрачења за локације које се налазе на северној хемисфери треба да буде усмерен према источној хемисфери под оптималним углом који је у вредностима географске ширине, а то је у нашем случају око 35° .

Пријемници који прате кретање Сунца

Системи који прате кретање Сунца су осмишљени у циљу што већег искоришћења енергије Сунчевог зрачења која пада на површину пријемника. Овакви системи постижу знатно бољу ефикасност у односу на фиксне, што је и практично испитано у [8]. Ови системи се могу поделити на оне са једном и две осе ротације. Први системи омогућавају праћење позиције Сунца у току дана само у правцу исток-запад. Такав систем би требало да има ефикасност од 25-30%. Системи са две осе имају поред осе која прати кретање Сунца од истока ка западу, и другу осу ротације која прати кретање север-југ. Ефикасност ових система је од 30-40%.



Слика 14- Једноосно ротациони модул

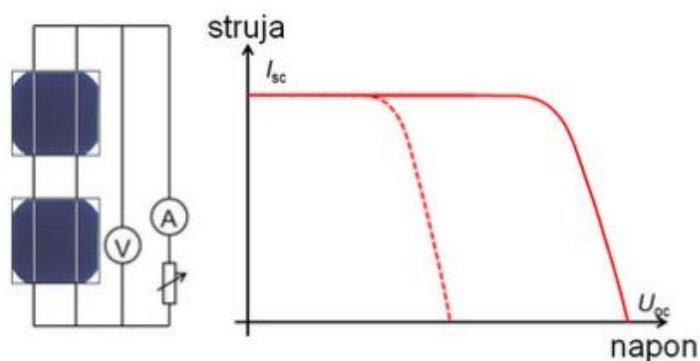


Слика 15- Двоосно ротациони модул

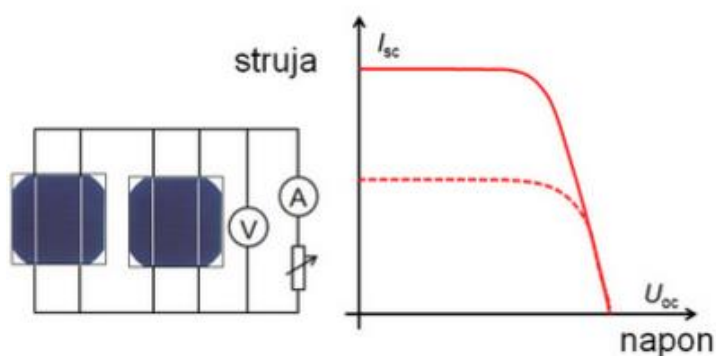
Наравно, уз овако знатно повећање ефикасности морамо сагледати и недостатке које носи овај систем, пошто ниједан систем није тако идеалан. Овакви системи поскупљују инсталацију због додатних компонента који омогућавају несметан рад истог, повећавају масу самог система, отежавају одржавање. Поред тога за закретање се користе електромотори, који изискују коришћење електричне енергије да ли из мреже, или одређених акумулатора, па самим тим у старту рачунајући овај трошак енергије, систем мора имати мању ефикасност.

3.3. Повезивање соларних ћелија

Соларна ћелија као самостални извор енергије може произвести јако малу снагу, па се приступа повезивању већег броја ћелија како бисмо добили жељену снагу на излазу. Таква самостална ћелија има максимални напон око 600mV, па је потребно ћелију повезати редно и паралелно, чиме можемо управљати како напонам тако и струјом. Паралелним повезивањем ћелије добићемо повећање струје, док се редним повезивањем добија на повећању напона.

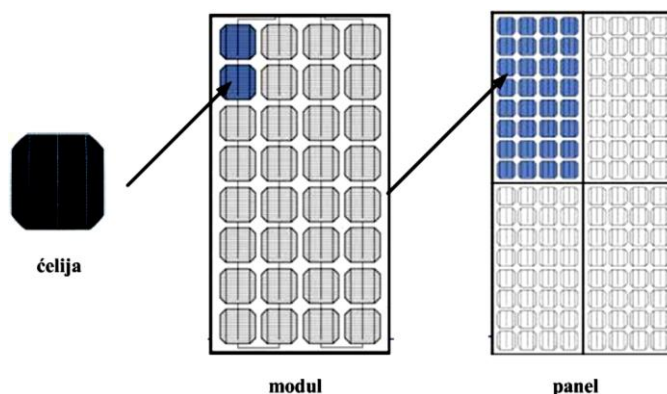


Слика 16- Редна веза соларних ћелија



Слика 17- Паралелна веза соларних ћелија

Електричним везивањем ћелије у групу ствара се модул, затим се модул спаја комбинованом везом у фотонапонски панел који производи снагу знатно већег интензитета. Најчешћи случај се своди на везивање 36 ћелија серијском везом, стварајући модуле номиналног напона 12 V.

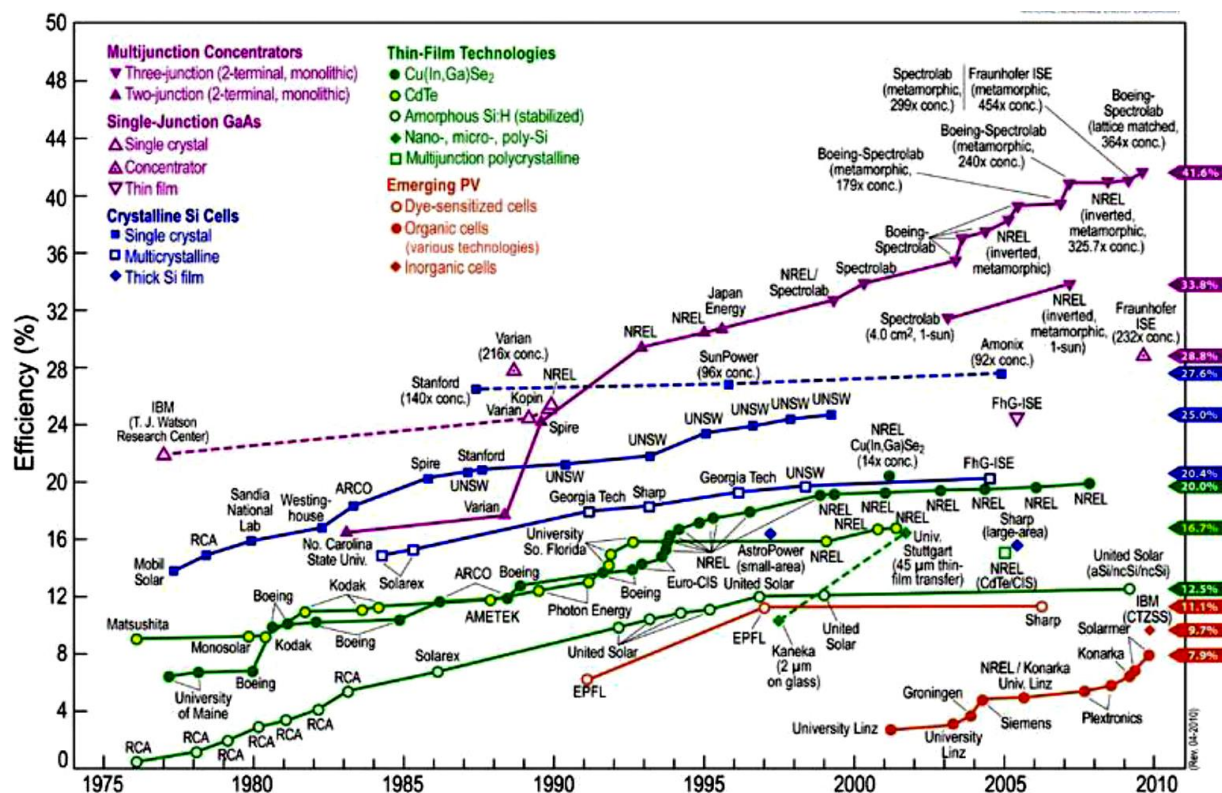


Слика 18- Фотонапонска ћелија, модул, панел

3.4. Ефикасност соларних ћелија

Када причамо о ефикасности неког сиситема треба узети у обзир у којој мери су ресурси попут времена, трошкова, енергије итд., добро искоришћени за намењени задатак. Ефикасност треба да нам покаже на способност одређене радње или активности, да произведе што боље резултате, са минималном количином отпада и најмањим трошковима. Ефикасност било ког система се може процентуално исказати у границама од 0 до 100%.

У овом раду смо приказали основне материјале и технологије за производњом соларних ћелија, где смо као најповољнији материјал означили силицијум, како због своје ефикасности, тако и због своје доступности где се налази на другом месту лако доступних сировина. Како је соларна технологија међу најбрже растућим технологијама, велики број компанија и истраживача из целог света покушавају да пронађу нове технологије у циљу снижавања трошкова производње соларних ћелија, тј. побољшања ефикасности. До данас као једина адекватна замена се истакла технологија танког филма, искључиво због економских разлога, јер се користи мања количина материјала у односу на друге технологије, што има директан утицај на смањене производне трошкове. Са стране ефикасности, ова технологија има још увек ниску ефикасност. Истраживачи су усмерили своја интересовања на три материјала танког филма, аморфни силицијум, кадмијум сулфид, кадмијум телурид (CdS/CdTe), бакар-индијум-селен (CIS) . Технологија танког филма нуди решења за коришћење полимерних материјала. Поред тога што не загађују животну средину, што се не може рећи за горе наведене материјале, имају првенствено ниску цену, релативно малу масу. Оно што би требало да буде реално за очекивати у наредних неколико година, наспрам огромног напора који се улаже у истраживања, јесте ефикасност ћелије од 45%, док су прогнозе за дужи низ година и 50% [9].

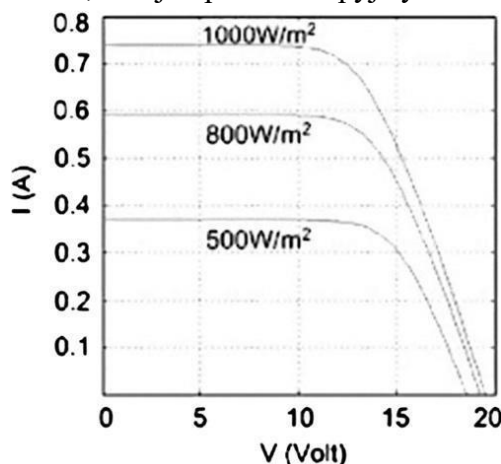


Слика 19- Преглед ефикасности модула реномираних произвођача

3.5. Фактори који утичу на ефикасност соларних ћелија

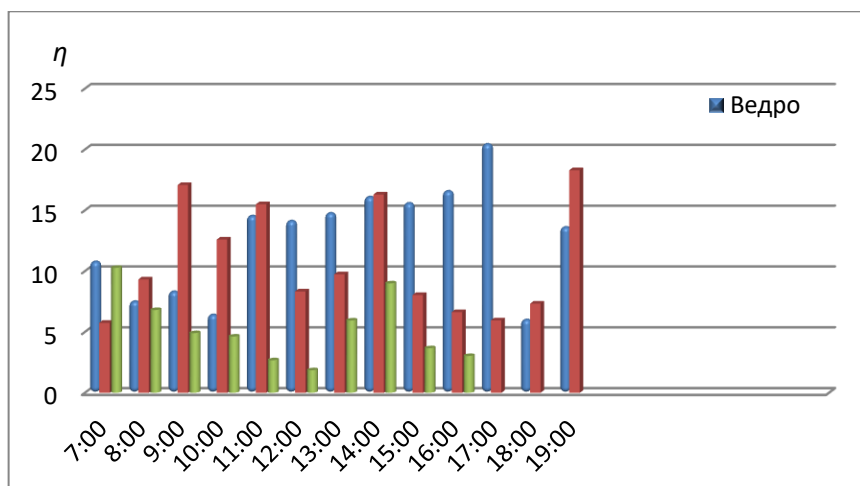
У овој тачки навешћемо неке факторе који у мањој или већој мери утичу на ефикасност соларних ћелија.

Међу првим факторима навешћемо утицај **сунчевог зрачења**. Услед повећања сунчевог зрачења расте и ефикасност соларне ћелије, због све већег броја фотона који падају на ту ћелију, тј. због формирања електрон парова, који ће за крајњи циљ имати стварање електричне енергије. На следећој слици је приказана зависност ефикасности ћелије од интензитета сунчевог зрачења. Примећујемо да је промена напона незнатна у зависности од интензитета зрачења, док је промена струје уочљива у зависности од истог.

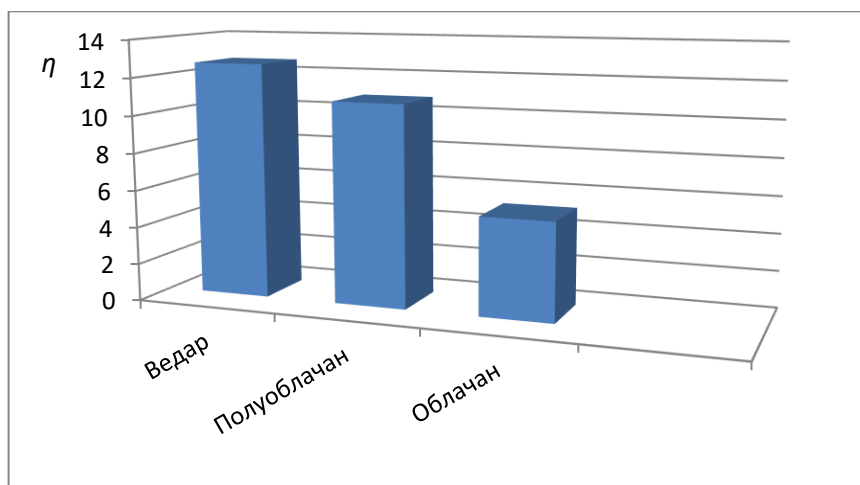


Слика 20- Утицај зрачења на карактеристике модула

Постоји доста података који су везани за испитивање ефикасности фотонапонских панела у различитим условима зрачења, где су потврђене претпоставке да са повећањем зрачења расте и ефикасност поједних типова ћелија. Оно што је још потврђено је да су карактеристике панела које су направљене технологијом танког филма показале боље у условима слабијег зрачења. Испитивања која су вршена за нашу земљу, тачније за град Аранђеловац [8], су показали следеће резултате. Мерење је вршено за временске услове облачног, полуоблачног, и сунчаног дана. Панел је израђен од поликристалног панела, постављен као фиксни под углом од 44° према хоризонталној равни, и усмерен према југу.



Слика 21- Ефикасност ПВ панела у односу на временске услове

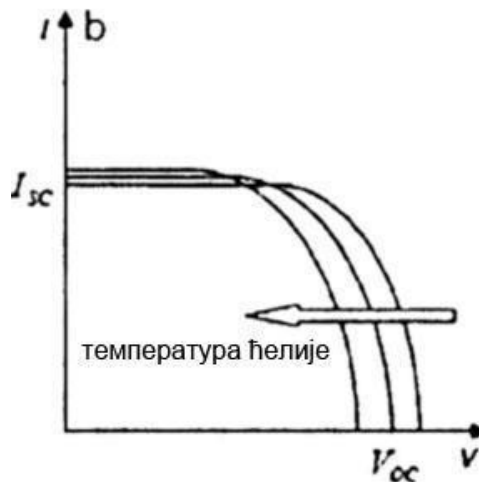


Слика 22- Средње вредности ефикасности панела

Слика 22 нам потврђује оно што смо и претпостављали. Оно што је нас као истраживаче јако изненадило поред овако мале ефикасности за облачно време и просечним дневним сунчевим зрачењем од 200 W/m^2 , јесте и дневна производња електричне енергије, која је била око 120 W/m^2 . То би практично значило да би ова дневна производња електричне енергије могла да покрије рад једне кућне сијалице са ужареним влакном снаге 60 W , свега два сата.

Следећи утицај који можемо навести јесте **утицај температуре** на излазне параметре модула. За сваки панел произвођач дефинише температуру при номиналним условима рада (*NOCT-Nominal Operation Cell Temperature*). *NOCT* је температура панела при амбијентној температури 20°C , соларној ирадијацији 800 W/m^2 , брзини ветра 1 m/s .

Теоријски гледано, температура је критичан фактор који обара ефикасност и снагу фотонапонског модула, односно долази до смањења енергетског процепца услед чега се јавља пад у напону отвореног кола.



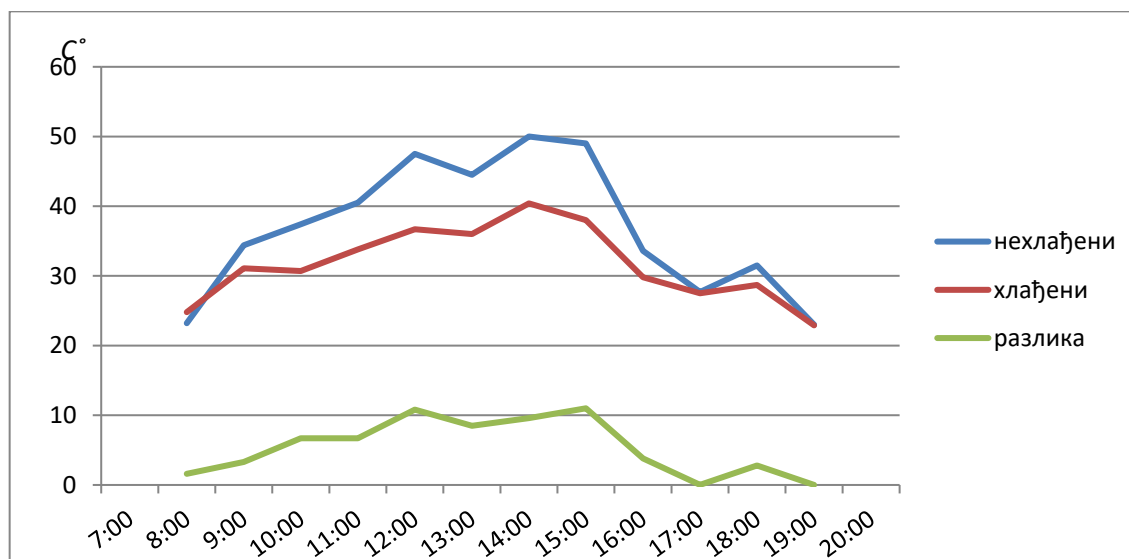
Слика 23- Утицај температуре на карактеристике фотонапонске ћелије

Знатно већи утицај температуре се јавља код монокристалног силицијума за пад ефикасности од 15%, док је за ћелије танког филма тај пад од 5%. Занимљиво је да је *Rodriguez et al* проучавао рад соларне ћелије која је била изложена температурама од 100 до 200 °C, што се морамо сложити није баш карактеристична температура панела за наше подневље. Вишак топлоте је у хибридном систему био коришћен приликом оцењивања целокупне ефикасности соларне ћелије, где су користили топлотни мотор (Stirlingov) како би искористили ту топлоту. Закључили су да механичка енергија може бити конвертована у електричну са ефикасношћу од преко 90%, чиме је ефикасност хибридног система преко 30%, без било какве нове технологије или употребе скувих материјала.

Оно што је било испитано у [8] јесте утицај температуре на излазне параметре фотонапонског панела. Ради се о истом случају као у горе наведеној подтачки, где се након препоруке [6], да се након температуре панела од 25 °C крене са хлађењем панела. Приликом овог експеримента коришћен је вентилатор који је служио за хлађење поменутог панела, како би се одржала оптимална температура, како је и приказано на слици 24.

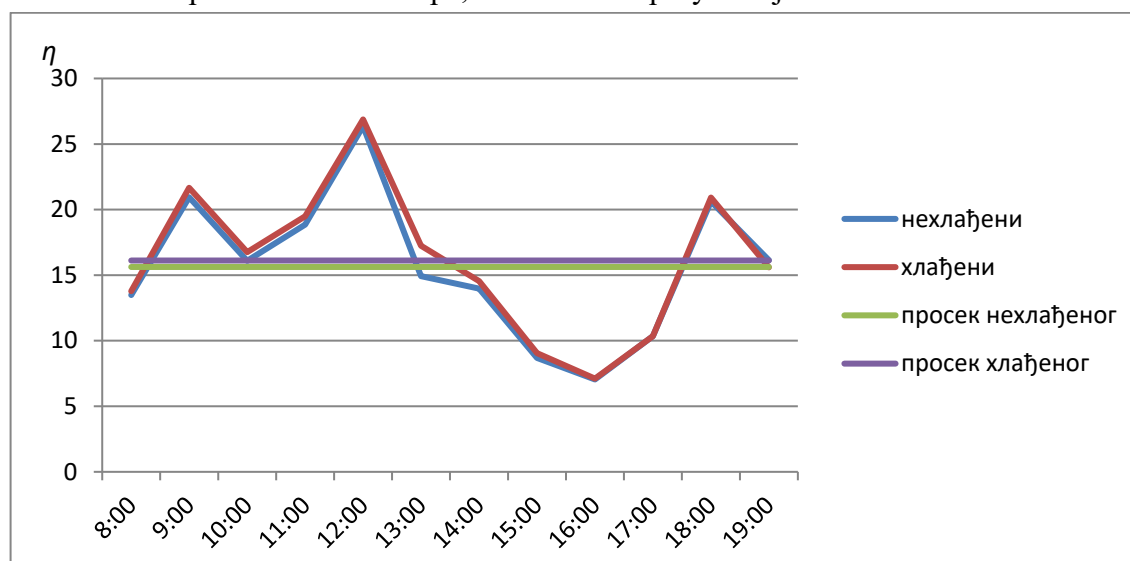


Слика 24- Хлађење панела



Слика 25- Поређење промена температуре нехлађеног и хлађеног ПВ панела

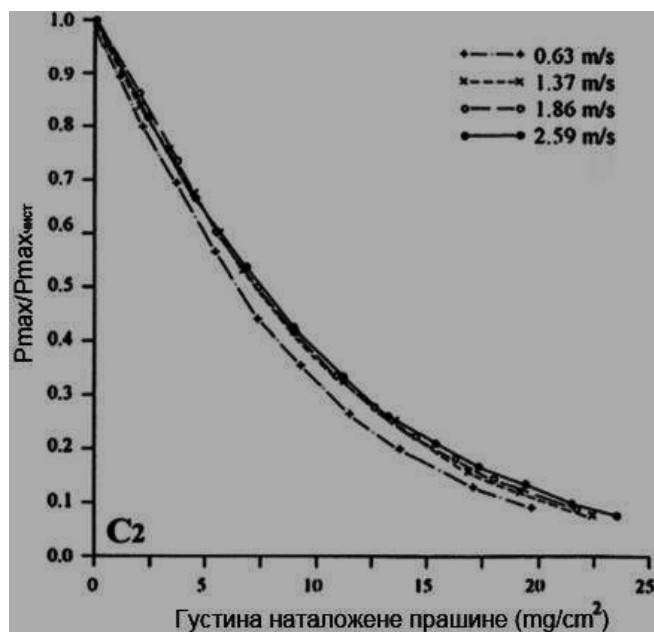
На графику који је приказан на слици 25, видимо да у подневном периоду није остварено контролисати оптималну температуру, сва произведена енергија панела је коришћена на покретање вентилатора, а очекивани резултат је изостао.



Слика 26- Ефикасност нехлађеног и хлађеног ПВ панела

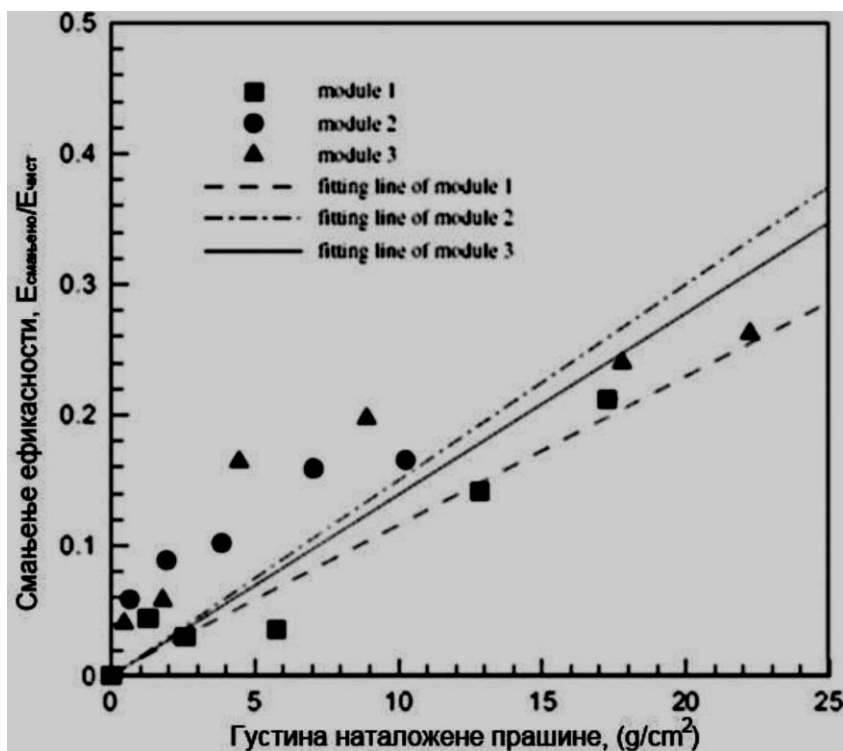
Побољшана ефикасност од 3% је незнатно имајући у виду сву енергију која је потрошена на покретање вентилатора.

Наредни утицај је везан за **запрљање фотонапонских модула**. *Goossens* и *Kerschaever* су се бавили утицајем концентрације прашине у ваздуху и брзине ветра на карактеристике фотонапонског модула. Они су експериментално проучавали снагу модула у зависности од наведених услова којима су били изложени. Дошли су до закључка да снага драстично пада са порастом густине прашине и различите брзине ветра.



Слика 27- Утицај гуштине на ефикасност ПВ панела

Сазнања до којих је *Jiang* дошао експерименталним испитивањем у лабораторијским условима са монокристалним, поликристалним, и аморфним силицијумом, казују да ефикасност фотонапонских модула опада линеарно са порастом гуштине наслага прашине. Густина наслага прашине од 0 до 22 g/m², извршиће редукцију ефикасности модула од 0 до 26%.



Слика 28- Утицај наслага прашине на ефикасност ПВ панела

Приликом практичног експеримента у [7] указали смо на овај фактор, без мерења густине наслага прашине, тако да овај експеримент треба узети са резервом, јер се ради о одокативном задрљању панела.

Још један од утицаја који се често јавља јесте **рефлексција на површини соларне ћелије**. Рефлексција на површини ћелије зависи од микрохрапавости исте, где ће са повећањем долазити до смањења рефлексције. Како би се избегла ова појава рефлексције, користе се оговарајући антирефлексујући слојеви, чиме се смањује рефлексција за 3 % [9].

3.6. Подела фотонапонских система

Фотонапонски системи представљају скуп појединих компонената који врше претварање сунчеве енергије у финални облик енергије који нам стоји на располагању. Ови системи се могу поделити на фотонапонске системе који нису прикључени на мрежу (off-grid), тј. самостални системи, и системи који су прикључени на јавну електроенергетску мрежу (on-grid).

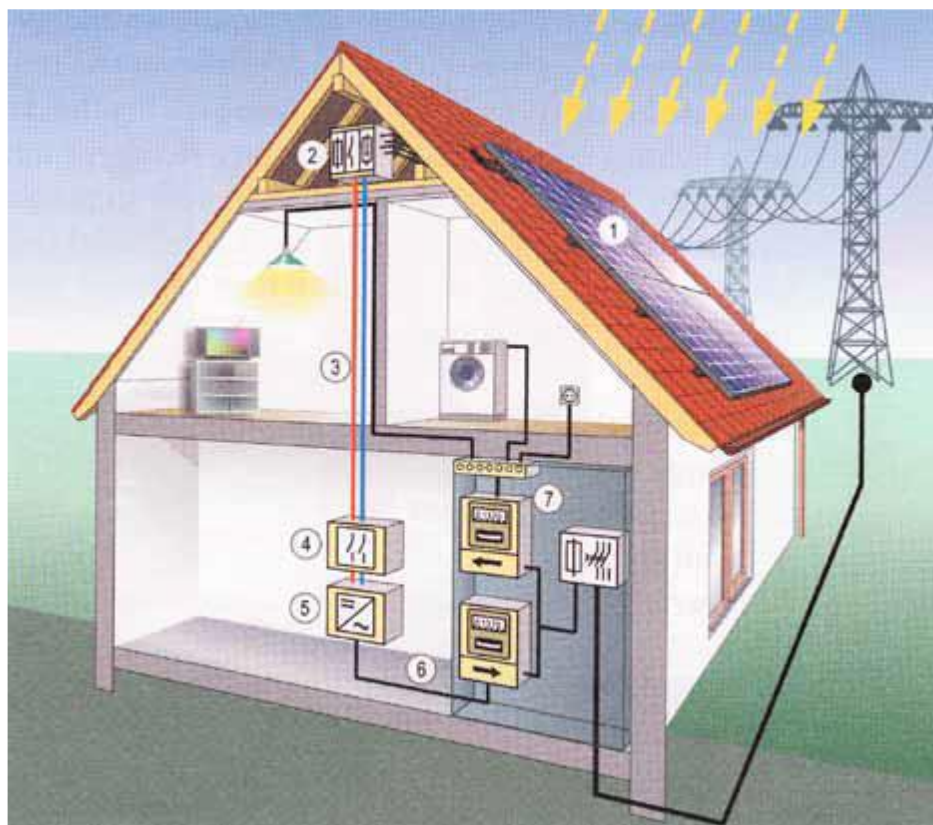
Самостални фотонапонски системи представљају системе који су одвојени од електродистрибутивне мреже а могу бити са и без складиштења енергије. То су одлични извори енергије за удаљене објекте, камп кућице, једрилице, итд... Фотонапонски системи који складиште енергију се могу користити за напајање телекомуникационих репетитора, електричних ограда, итд.. Ови системи су сачињени од фотонапонских модула, регулатора пуњења, акумулатора, потрошача, и измењивача уколико потрошачи раде на наизменичну струју.



Слика 29- Самостални фотонапонски систем

Соларни панел врши конверзију сунчевог зрачења у једносмерну струју, тако да она преко регулатора пуњења буде складиштена у соларној батерији. Регулатор пуњења прати стање и пуњење батерије, спречава прекомерно пуњење, али и потпуно пражњење батерије. Инвертор је уређај који једносмерну струју претвара у наизменичну како би била погодна за коришћење електричних апарата одговарајућег напона и фреквенције, као што је и приказано на слици 29.

Системи који су прикључени на јавну мрежу омогућавају производњу електричне енергије за потребе објекта за који је систем намењен, као и у случају прекомерне производе енергије, иста се може дистрибуирати у јавну мрежу.



Слика 30- Системи који су прикључени на јавну

Једносмерна струја произведена у соларним модулима се уводи у разводни ормарић (2). Одатле се преко каблова једносмерног развода (3) одводи преко главне склопке за одвајање (4), према соларном измењивачу (5). Како смо горе невели, измењивач претвара једносмерну струју у наизменичну на одговарајућем енергетском нивоу, где се након тога преко каблова наизменичног развода (6) преноси до кућног прикључка на електроенергетску мрежу, тачније нама познатог електричног ормарића, где су смештена бројила електричне енергије. Бројила региструју произведену енергију предату у мрежу и потрошену енергију преузету из мреже.

У случају недовољне производње електричне енергије помоћу соларних модула, напајање се врши преузимањем енергије из мреже. Овако произведена енергија је еколошки чиста енергија, и има знатну цену на тржишту у односу на друге начине производње енергије [10].

4. Опрема и поступак мерења генерисане енергије у фотонапонским панелима

Како смо већ навели у [8], вршена су испитивања појединих утицаја на ефикасност претварања сунчеве енергије, у електричну. Зато ћемо даље у раду описати сам поступак мерења као и опрему коју смо користили за испитивање ових експеримената.

Опрема за експеримент

Опрема коју смо имали на располагању је произвођача *h-tec*, осим бесконтактнoг инфрацрвеног мерача температуре чији је произвођач *EXTECH*.

Најбитнији део овог система су свакако фотонапонски панели, чијим посредним деловањем се врши претварање сунчеве енергије у електричну, због којих се и врши испитивање како бисмо проверили њихове карактеристике. За ово испитивање смо имали два фотонапонска панела израђени од поликристалног силицијума, чије су димензије 135x95x30mm. Остале важне карактеристике су номинални напон панела од 2V, и номиналне струје 600mA. Панели имају магнетну основу, тако да се закретање истих може вршити за различите углове по 30°.

Поменути мерач температуре смо користили за мерење температуре површине панела, који има мерни опсег од -50÷538 °C.

Мерни инструменти, тј дигитални мултиметри су коришћени за мерење једносмерног напона и струје коју производи фотонапонски панел. Поред тога ови инструменти имају могућност мерења отпорности и наизменичног напона и струје.

За потребе хлађења панела коришћен је вентилатор снаге 10mW, и све то је приказано на слици 31.

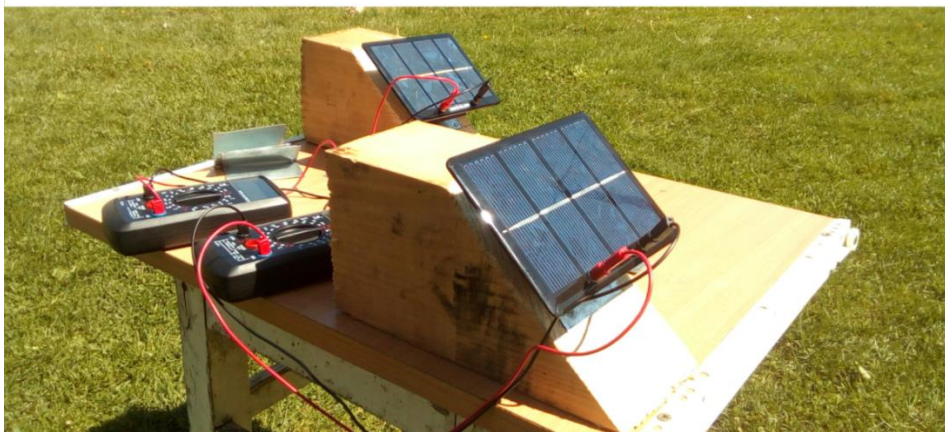


Слика 31- Фотонапонски панел, вентилатор, мерач температуре и дигитални мултиметри

Поступак мерења генерисане енергије

Мерењем смо обухватили више потенцијалних експлоатационих услова за које смо сматрали да могу учествовати на излазне параметре фотонапонских панела.

Први експеримент који смо извели јесте утицај *сунчевог зрачења на излазне параметре*.

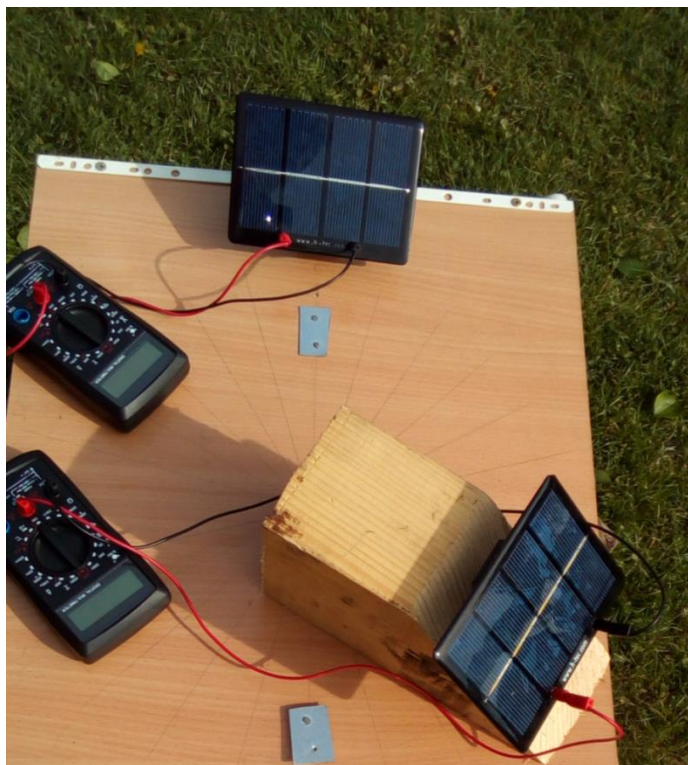


Слика 32- Фотонапонски панели у експлоатацији

Као што можемо видети на слици 32, панели су постављени под оптималним углом за град Аранђеловац од 44° према хоризонталној равни, и усмерени према истоку. Мерења су почела од 7:00 часова ујутро, до 19:00 часова увече, за ведро, облачно и полуоблачно време. Помоћу црвеног и црног конектора, електрична енергија доспева до дигиталних мултиметра који мере једносмерни напон и струју. Поред овог подешавања, мерни инструменти морају бити подешени и за мерни опсег који је везан за мерени напон и струју. Ово подешавање се врши због грешке мерења која може бити знатна. То подразумева да уколико као у нашем случају имамо номиналну струју од 600mA, можемо подесити мерни опсег на прву већу вредност од наведене, како би резултати мерења били валиднији. Исти принцип примењујемо за мерење напона. Излазну снагу панела на њеним крајевима добијамо као производ напона и струје. Мерења су вршена на сваких петнаест минута, и записивани у одговарајуће табеле које су представљени у [8].

У другом експерименту смо пратили *разлику између покретног и фиксног панела на излазне параметре*. Вршили смо ручно закретање панела по једној оси, где смо пратили кретање Сунца на небу. На дрвеној основи на којој се налазе фотонапонски панели имали смо уцртане подеке померене за 15° , или временски подешене за 1 час за који је панел постављен на том подеку. То би значило да је панел подешен у подне на 90° , у односу на правац севера, тј. усмерен је према истоку.

Исти поступак мерења као и подешавање опреме за испитивање је примењено и у овом случају.



Слика 33- Покретни и фиксни панели у експлоатацији

У трећем испитивању смо пратили *утицај температуре на излазне параметре фотонапонског панела*.



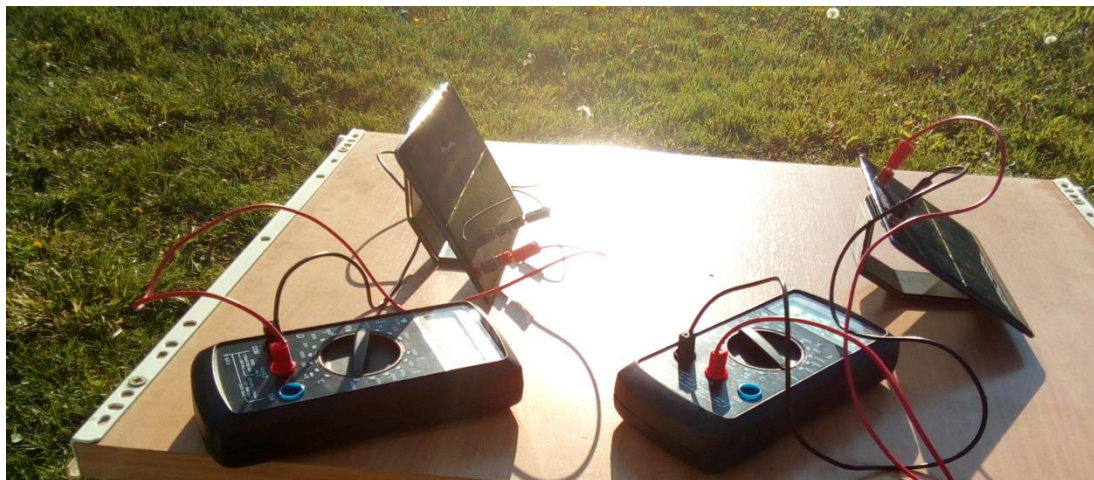
Слика 34- Хлађење панела

Енергија која је створена у фотонапонском панелу је коришћена за покретање вентилатора како бисмо успели да охладимо панел до оптималне температуре од 25° како је наведено у [10]. Помоћу другог панела који има исте карактеристике као и први мерили

смо снагу у току дана. Користили смо и безконтактни инфрацрвени мерач температуре, где смо пратили температуру панела како бисмо евентуално увидели разлику излазних параметара услед промене темпеатуре.

Четврто испитивање смо базирали на *испитивању задрљаности панела*. Поступак испитивања као и опрема за извођење овог експеримента је иста као и у првом случају, са једином разликом што смо имали умерено задрљане панеле земљаном прашином.

Наредно испитивање смо посветили *утицају нагиба панела на излазне параметре*.

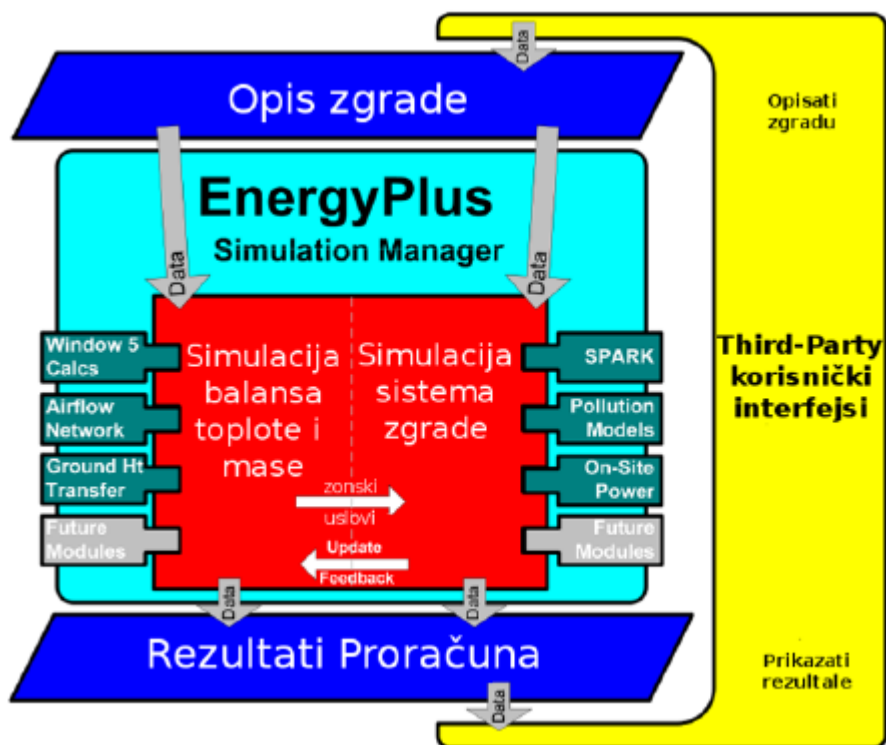


Слика 35- Панели под углом од 60° (лево), и 30° (десно)

Као што се може видети са слике 35, од опреме смо користили фотонапонске панеле који су претварали енергију сунчевог зрачења у електричну. Панели поседују магнетну основу која има могућност промене угла за вредности 0,30,60 и 90°. Управо смо то искористили и помоћу дигиталних мултиметра мерили једносмерну струју и напон на крајевима панела. На слици изнад примећујемо одсјај који се јавља приликом рефлексије, ефекат познат као албедо. То ће свакако имати утицај на добијене резултате, а са овом опремом за мерење не можемо апсолутно веровати добијеним резултатима.

5. Софтверски пакети коришћени за симулацију

У даљем делу рада акценат ћемо ставити на софтверским пакетима који су потребни за симулацију и оптимизацију објекта са инсталираним системима за генерисање енергије. Програме које смо користили су првенствено *EnergyPlus*, који је коришћен за симулацију, као и *GoogleSketchUp* коришћен за виртуелни дизајн објекта. Повезаност ова два програма се заснива на томе да *GoogleSketchUp* даје геометрију објекта који се симулира у *EnergyPlus*-у. [11].



Слика 36- Функционисање *EnergyPlus-a*

На слици 36 је приказан начин функционисања поменутог програма. Како сам програм не поседује кориснички интерфејс за предпроцесирање, као и постпроцесирање морамо користити програме који постоје, а да се могу користити и за креирање објекта и за приказ резултата. Ти постојећи програми су горе на слици приказани жутим пољем. Најчешће коришћени програм за дефинисање геометрије објекта је *GoogleSketchUp*, а за приказивање добијених резултата се могу користити *HTML* фајл, који табеларно приказује резултате, или уколико хоћемо графички приказати резултате можемо користити програмски пакет попут *Microsoft Excel-a*. Након *SketchUp-a*, и корекције у *IDF* едитору добијамо улазну датотеку коју можемо користити за симулацију у *EnergyPlus* (на слици дефинисано као опис зграде, плаво поље). Улазни фајл се даље прослеђује у главни програм, *EnergyPlus Simulation Manager*. Симулација биланса топлоте и масе се рачуна и преко зонских услова се преноси на цео дан модел објекта, а уколико добијене промене утичу на систем враћају се назад у симулацију биланса [12].

5.1. *EnergyPlus*

Овај софтвер моделира грејање, хлађење, вентилацију, и друге енергетске токове као и водену мрежу у домаћинству. Укључује многе иновативне способности симулације као што су временски размаци мањи од једнога сата, аутоматски системи, топлотно билансирање зоне симулације, проток ваздуха кроз све термичке зоне, термичку угодност, коришћење воде, као и природну вентилацију. *EnergyPlus* има своје корене у *BLAST I DEO-2* програмским пакетима. Оба ова пакета, *BLAST(Building Loads Analysis and System Thermodynamics*- термичка анализа зграде и система термодинамике) и *DEO 2-a*, су развијени и објављени у касним седамдесетим и раним осамдесетим годинама прошлога века, као алат за термичку и енергетску симулацију. Корисници ових алата били су инжењери дизајна и архитекте који би на прави начин одредили неопходну HVAC опрему, развијали различите студије о анализи животног циклуса, оптимизовали енергетске перформансе итд. Рођени из потребе коју је изазвала енергетска криза раних седамдесетих година и самог сазнања да је потрошња енергије за загревање просторија највећа компонента статистике потрошње енергије у Америци, ова два програма су покушала да реше исти проблем из две мање-више различите перспективе. Као и његови предходници, и *EnergyPlus* је програм за енергетску и термичку анализу и симулацију.

Заснован на корисниковој дефиницији зграде, у смислу физичких ограничења и зависних механичких параметара, *EnergyPlus* ће израчунати неопходне грејне и расхладне параметре који су неопходни како би се одржала термичка контрола на специфичним тачкама објекта.

Сам програм користи податке о времену за локацију објекта за који се врши симулација. Ови подаци се налазе у посебним датотекама које *EnergyPlus* може аутоматски читавати, а постоје за више од 2000 локација [13].

5.2. *Google SketchUp*

Током 2000-их година компанија *Last Software Boulder* из Колорада, САД, развија бесплатан 3D софтерски алат *SketchUp* који ће се користити за виртуелно дизајнирање стамбених објеката. Овај програм своју примену налази код градитеља, архитеката, дизајнера, инжењера, итд...

Овај програм је предвиђен да буде што што флексибилнији и лакши за употребу од осталих многобројних 3D програма за дизајн.

Главна карактеристика *SketchUp-a* је *3D Warehouse* који омогућава корисницима да претражују моделе израђене од других корисника овог програма. Корисници могу да користе њихову електронску пошту за скидање модела, а затим да разгледају *3D Warehouse* који је за многобројне компоненте и моделе.

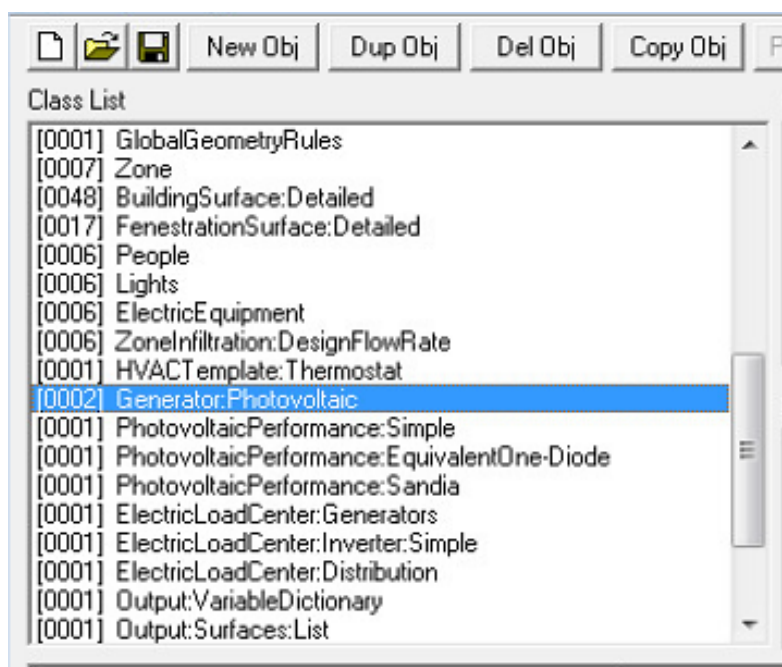
5.3. *Модели фотонапонског система*

У склопу софтверског пакета *EnergyPlus* постоје и различите опције за израчунавање количине електричне енергије која се може генерисати фотонапонским системима. Избором неких од модела формирају се математички модели(и улазни подаци) који се користе за одређивање енергије коју производе фотонапонски панели. Модели који се користе су: *Simple, Equivalent One-Diode i Sandia*, приказано на слици 37.

Морамо знати да неки изрази из терминологије се преклапају са терминологијом која се користи у програмима *Fortran*. Као пример тога можемо дати реч модул, која се може односити на фотонапонски панел, или као ентитет програмирања у наведеном програму. Још један од примера је и модел, који може означавати производни модел произвођача одређене врсте панела, или математички модел који се користи за инжењерску анализу.

Креће се од претпоставке да ће фотонапонски модули радити уколико је Сунчево зрачење веће од 0.3 V. У супротном модули неће давати никакву снагу. Овим модулима управља центар електричног оптерећења (Electrit Load Center). То је објекат који се користи за моделирање целокупног фотонапонског система. Поред тога што управља радом фотонапонског система, он и даје потребне податке о количини произведене и испоручене електричне енергије, као и о вишку електричне енергије која се продаје електро-мрежи [14].

Ограничење *EnergyPlus* програма је у томе што не укључује моделе за помоћну опрему фотонапонског система, као што је на пример уређај за праћење Сунца и контролор складиштења код система са складиштењем енергије.



Слика 37- Изглед фотонапонског генератора у програму EnergyPlus

5.3.1. *Simple* фотонапонски модел

Simple модел објекта је најједноставнији модел за предвиђање фотонапонске производње енергије. У овом моделу корисник одређује ефикасност са којом површина конвертује соларно зрачење у електричну енергију. У другим моделима ова ефикасност се одређује као део модела. Користи се потпуни геометријски модел Сунчевог зрачења, укључујући и сенчење и рефлексију, како би се утврдио учинак соларних ресурса. Модел прихвата произвољне вредности конверзије ефикасности и не захтева да стварне производне јединице буду тестиране за добијање емпиријских коефицијената учинака.

Корисна електрична енергија произведена од стране ФН површине се рачуна користећи:

$$P = A_{surf} \cdot f_{activ} \cdot G_T \cdot \eta_{cell} \cdot \eta_{invert}$$

где је:

P - снага електричне енергија произведена фотонапонским панелом (W)

A_{surf} - укупна површина фотонапонских панела (m^2)

f_{activ} - део површине фотонапонског панела са активним соларним ћелијама (-)

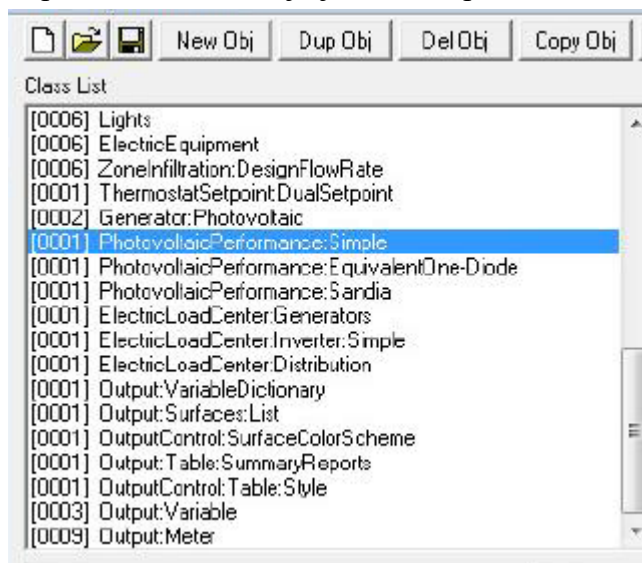
G_T - укупно соларно зрачење на фотонапонском систему (W/m^2)

η_{cell} - ћелијска ефикасност фотонапонског панела (-)

η_{invert} - ефикасност конверзије једносмерне у наизменичну струју (-)

На десној страни ове једначине само величина G_T је израчуната од стране *EnergyPlus*-а а све остало су улази дефинисани од стране корисника.

Постоје два начина који могу бити изабрани од стране корисника који регулишу како је фотонапонски систем постављен на површинама зграде. То су "растављен" (*Decoupled*) и "интегрисани" (*Integrated*) модел. Код њих се битно разликује прорачун температуре соларних ћелија која значајно утиче на њихову ефикасност, па се самим тим разликује и прорачун површинских преноса топлоте који је за интегрисане системе веома важан.



Слика 38- Simple фотонапонски модел

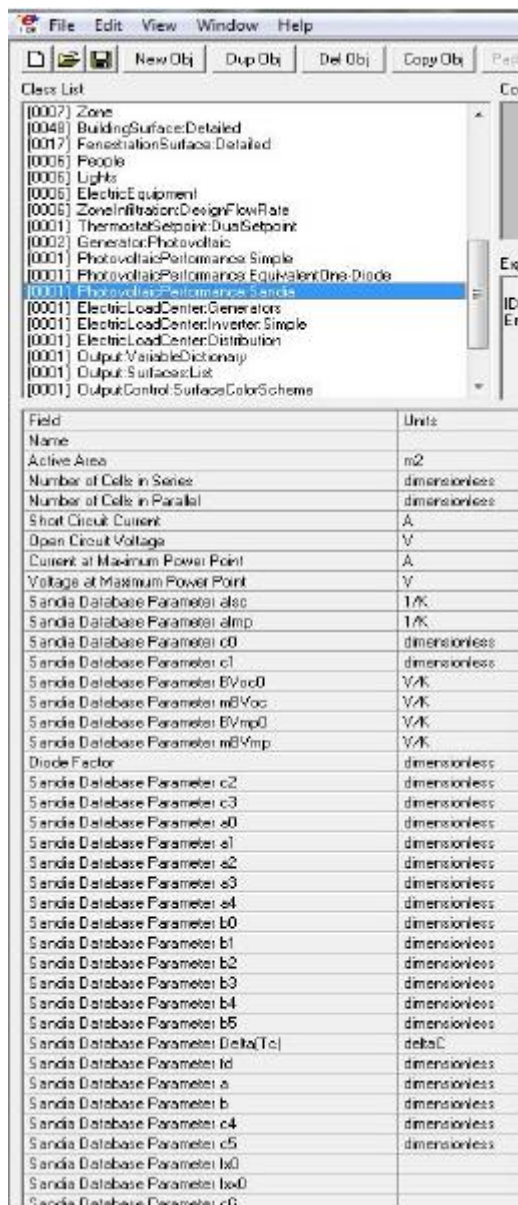
5.3.2. Sandia фотонапонски модел

Овај модел доступан у *EnergyPlus* за предвиђање електричне енергије коју генерише фотонапон назива се *Sandia* модел, приказан на слици 39. Овај модел заснива се на раду извршеним у лабораторији *Sandia National, Albuquerque, NM Deivid King*- уз помоћ многих других.

Модел се састоји од низа емпиријских односа са коефицијентима који су изведени из стварног испитивања. Када су коефицијенти за одређени модул на располагању, јасна је ствар да се користе једначине модела за израчунавање пет изабраних тачака на струјно-напонској криви.

Имплементација у *EnergyPlus* се такође заснива на раду који је извршио *Greg Barker (2003)* за народну лабораторију за обновљиву енергију *Sandia*, који је имплементирао модел *Sandi* у *FORTRAN77* као прилагођени тип (*Type101*) за *TRANSYS* компјутерски програм.

Постоји неколико климатских улаза у модел којима се управља на другом месту у *EnergyPlus* укључујући: температуру сувог термометра, температуру росе, релативну влажност, атмосферски притисак, директно нормално зрачење, дифузионо хоризонтално зрачење, облачност, смер ветра, брзина ветра, надморска висина.



Слика 39- *Sandia* фотонапонски модел

Математички опис

Ова секција представља математички опис *Sandia* модела из нацрта извештаја *King et, al. (2003)*. Суштина модела предвиђа карактеристику једног ФН модела. Следећа номенклатура и једначине описују *Sandia* модел.

Математички**модел****Опис**

I_{sc}	Струја кратког споја (A)
I_{mp}	Струја у тачки максималне снаге (A)
I_x	Струја у модулу $V = 0.5 V_{oc}$, дефинише четврту тачку на кривој струја-напон
I_{xx}	Струја у модулу $V = 0.5 (V_{oc} + V_{mp})$ дефинише пету тачку на кривој струја-напон
V_{oc}	Напон отвореног кола (V)
V_{mp}	Напон у тачки максималне снаге (V)
P_{mp}	Снага у тачки максималне снаге (W)
f_d	Однос дифузионог зрачења коју користи модул
N_s	Број ћелија у серији низу ћелија модула
N_p	Број паралелних низова ћелија у модулу
k	Болцманова константа $1.38066 \text{ E-}23$ (J/k)
q	Основно наелектрисање $1.60218 \text{ E-}19$ (Kulon)
T_c	Температура ћелија унутар модула ($^{\circ}\text{C}$)
$\delta(T_c)$	‘Топлотни напон’ по ћелији при температури T_c , приближно 1V за

	типичан 26-то ћелијски силицијумски модул
E_e	‘Ефективно’ зрачење сунчевх зрака
E_b	Компонента директног зрачења
E_{diff}	Компонента дифузионог зрачења
C_0, C_1	Емпиријски коефицијенти који се тичу I_{pm} за E_e , $C_0+C_1=1$ (оба су бездимензијска)
C_2, C_3	Емпиријски коефицијенти који се тичу V_{pm} за E_e , (C_2 бездимензијски, C_3 је $1/V$)
C_4, C_5	Емпиријски коефицијенти који се тичу I_x за E_e , $C_4+C_5=1$ (оба су бездимензијска)
C_6, C_7	Емпиријски коефицијенти који се тичу I_{xx} за E_e , $C_6+C_7=1$ (оба су бездимензијска)
n	Емпиријски одређен ‘фактор диоде’ фактор диоде за појединачне ћелије
AMa	Апсолутна маса ваздуха
AOI	Соларни угао учесталости (степени)
$f_1(AMa)$	Емпиријски полином који се користи да повеже струју кратког споја, са спектром сунчевих зрака преко масе ваздуха
$f_2(AOI)$	Емпиријски полином који се користи да повеже струју кратког споја, са соларним углом учесталости
a_0, a_s, a_2, a_3, a_4	Емпиријски коефицијенти за $f_1(AMa)$ полином

$b_0, b_s, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$	Емпиријски коефицијенти за $f_2(\text{AOI})$ полином
T_o	Референтна температура ћелије, обично фиксирана на 25°C
I_{sco}	Струја кратког споја при референтним условима
I_{mpo}	Струја у тачки максималне снаге при референтним условима
V_{mpo}	Напон при максималној снази при референтним условима
V_{oco}	Напон отвореног кола при референтним условима
I_{xo}	Струја при $V=0.5V_{\text{oc}}$ и референтним условима
I_{xho}	Струја при $V=0.5(V_{\text{mp}}+V_{\text{oc}})$ и референтним условима
$\alpha_{1\text{sc}}$	Нормализован коефицијент температуре за $(1/^\circ\text{C})$
α_{Imp}	Нормализован коефицијент температуре за $I_{\text{mp}}(1/^\circ\text{C})$
$\beta_{\text{Voc}}(E_e)$	Температурски коефицијент за напон отвореног кола као функција E_e
β_{Voco}	Температурски коефицијент за напон отвореног кола при референтним условима
$m\beta_{\text{Voco}}$	Коефицијент за иррадианце зависност од коефицијента отвореног кола снага- напон, често је једнак нули $(V/^\circ\text{C})$
$\beta_{\text{Vmp}}(E_e)$	Температурски коефицијент за максимални напон модула као функција E_e

$\beta_{V_{mpo}}$	Температурски коефицијент за максимални напон модула при референтним условима
$m\beta_{V_{mpo}}$	Коефицијент за иррадијанце зависност од коефицијента максималне температуре снага-напон, често једнак нули ($V/^{\circ}C$)
T_m	Температура PV модула на позадинској површини ($^{\circ}C$)
T_a	Температура околине ($^{\circ}C$)
E	Зрачење на површини модула (W/m^2)
WS	Брзина ветра на стандардној висини од 10m(m/s)
a	Емпиријски коефицијент везан за температуру модула при слабом ветру и великим зрачењем
b	Емпиријски коефицијент везан за смањење температуре модула са повећањем брзине ветра
T_c	Температура соларних ћелија унутар модула ($^{\circ}C$)
E_0	Референтно зрачење ($1000W/m^2$)
ΔT	Разлика температура између T_c и T_m при $E_0(^{\circ}C)$ (ово је $d(T_c)$ у бази података Sandia)

Тренутна имплементација у *EnergyPlus* фокусира се на утврђивању наступа у тачки максималне снаге, али и израчунава, и даје извештај четири тачке на струјно-напонској криви тако да су подаци доступни за анализу изван *EnergyPlus*. Једначине испод користе параметре модула који су доступни у бази података прибављених од Националне лабораторије *Sandia* (види www.sandia.gov/pv). Следеће једначине формирају основу за *Sandia* модел примењен у *EnergyPlus*:

$$I_{sc} = I_{sco} \cdot f_1(AM_a) \cdot \{ (E_b \cdot f_2(AOI) + f_d \cdot E_{diff}) / E_o \} \cdot \{ 1 + \alpha_{Isc} \cdot (T_c - T_o) \}$$

$$I_{mp} = I_{mpo} \cdot \{ C_o \cdot E_e + C_1 \cdot E_e^2 \} \cdot \{ 1 + \alpha_{Imp} \cdot (T_c - T_o) \}$$

$$V_{oc} = V_{oco} + N_s \cdot \delta(T_c) \cdot \ln(E_e) + \beta_{Voc}(E_e) \cdot (T_c - T_o)$$

$$V_{mp} = V_{mpo} + C_2 \cdot N_s \cdot \delta(T_c) \cdot \ln(E_e) + C_3 \cdot N_s \cdot \{ \delta(T_c) \cdot \ln(E_e) \}^2 + \beta_{Vmp}(E_e) \cdot (T_c - T_o)$$

$$P_{mp} = I_{mp} \cdot V_{mp}$$

$$I_x = I_{xo} \cdot \{ C_4 \cdot E_e + C_5 \cdot E_e^2 \} \cdot \{ 1 + (\alpha_{Isc}) \cdot (T_c - T_o) \}$$

$$I_{xx} = I_{xso} \cdot \{ C_6 \cdot E_e + C_7 \cdot E_e^2 \} \cdot \{ 1 + (\alpha_{Imp}) \cdot (T_c - T_o) \}$$

где је:

$$E_e = I_{sc} / [I_{sco} \cdot \{ 1 + \alpha_{Isc} \cdot (T_c - T_o) \}]$$

$$\delta(T_c) = n \cdot k \cdot (T_c + 273.15) / q$$

$$f_1(AM_a) = a_0 + a_1 AM_a + a_2 (AM_a)^2 + a_3 (AM_a)^3 + a_4 (AM_a)^4$$

$$f_2(AOI) = b_0 + b_1 \cdot AOI + b_2 (AOI)^2 + b_3 (AOI)^3 + b_4 (AOI)^4 + b_5 (AOI)^5$$

$$\beta_{Voc}(E_e) = \beta_{Voco} + m_{\beta_{Voc}} \cdot (1 - E_e)$$

$$\beta_{Vmp}(E_e) = \beta_{Vmpo} + m_{\beta_{Vmp}} \cdot (1 - E_e)$$

$$T_m = E \cdot \{ e^{a+b \cdot WS} \} + T_a$$

$$T_c = T_m + \frac{E}{E_0} \cdot \Delta T$$

Са наведеним једначинама и предпоставком да панели делују у тачки максималне снаге, директно се одређује производња једносмерне струје. Предпоставља се да је линеаран учинак низа идентичних модула са бројем серијских и паралелних модула. Ефикасност инвертора се линеарно примењује да би се добила производња електричне енергије. Капацитет инвертора формира границу за производњу струје из фотонапонских генератора.

Оптерећење пролази кроз фотонапонски низ делујући као генератор и разне тривијалне калкулације пореде фотонапонску производњу овог оптерећења. Ако је фотонапонски низ повезан са површином која је повезана са зонама, па ако зона има било какве мултипликаторе у вези са њима, производња електричне енергије ће бити у складу са тим умножена .

Једначина изнад за T_m се користи за предвиђање температуре изван модула када је изабран модул *Sandia RACK*. То би било прикладно за већину монтираних сталака фотонапонске инсталације. Ако корисник изабере “интегрисани” *EPLUS* тада се температура изван модула добија од температуре спољне површине обрачунате од стране модела биланса топлоте користећи функцију провођења која потиче из *EnergyPlus*. А енергија добијена из површине се обрачунава за коришћење термина извора/одвода који је додат односу на предходни временски корак [12].

5.3.3. *Equivalent One-Diode Model* (Еквивалентни једно-диодни модел)

Овај модел предвиђа електричне перформансе фотонапонских (ФН) низова. Овај модел је такође познат као “*TRNSYS PV*” модел. Математички гледано, *EnergyPlus* користи једначине за модел емпиријски еквивалентног кола да предвиди струјно напонске карактеристике једног модула. Ово коло се састоји од извора једносмерне струје, диоде и једног или два отпорника. Снага извора струје зависи од Сунчевог зрачења и струјно-напонских карактеристика диоде и зависи од температуре. Резултати за еквивалентни модул за једно коло су екстраполирани да би предвидели перформансе мулти-модулног низа.

Модул користи модел “четворопараметарско” еквивалентно коло кристалног (и моно и поли) ФН модула развијеног на Универзитету *Wisconsin-Madison*. Вредности ових параметара не могу се директно добијати из каталога произвођача. Међутим, ФН модул ће их аутоматски израчунати из најчешће доступних података. ФН модул поседује и опциону модификовану корелацију упадних углова да израчуна колика је рефлексивност од површине ФН модула зависи од угла соларног зрачења.

Модул одређује ФН струју у функцији оптерећења напона. Остали излази укључују струју и напон у тачки максималне снаге дуж струјно напонске криве отвореног кола напона, струје кратког споја, као и да ли су електрична оптерећења испуњена или нису задовољена.

Математички

променљиве

Опис

β	Нагиб ФН низова ($^{\circ}$)
γ	Емпиријски параметар подешавања ФН криве
ϵ_{γ}	Опсег полупроводника [eV]
η_c	Ефикасност конверзије модула
μ_{Isc}	Температурни коефицијент струје кратког споја [A/K]

μ_{voc}	Температурни коефицијент напона отвореног кола [V/K]
θ	Упадни угао соларног зрачења [°]
$\tau\alpha$	Трансмисионо апсорпциони модул
$T\alpha_{normal}$	Модул трансмисионо-апсорпционе производње при нормалним условима
G_T	Укупно зрачење на ФН низ
$G_{T, beam}$	Компонента снопа зрачења
$G_{T, diff}$	Компонента расипања зрачења
$G_{T, gnd}$	Компонента зрачења коју упије тло
$G_{T, NOCT}$	Соларно зрачење при NOCT условима
$G_{T, ref}$	Соларно зрачење при референтним условима
I	Струја
IL	Фотоструја модула
$IL_{,ref}$	Фотоструја модула при референтним условима
I_o	Струја обрнутог засићења диоде
$I_{o, ref}$	Струја обрнутог засићења диоде при референтним условима
I_{sc}	Струја кратког споја
$I_{sc, ref}$	Струја кратког споја при референтним условима
I_{mp}	Струја у тачки максималне снаге дуж струјно-напонске карактеристике
$I_{mp, ref}$	Струја у тачки максималне снаге дуж струјно-напонске карактеристике, референтни услови
IAM	Бездимензијски модификатор упадног угла

K	Болцманова константа
NP	Број паралелних модула у низу
NS	Број серијских модула у низу
N_s	Број појединачних ћелија у модулу
P	ФН излазна снага
P_{max}	ФН излазна снага у тачки максималне снаге дуж струјно-напонске криве
Q	Константа пуњења електрона
R_s	Отпорност серије пуњења [Ω]
R_{sh}	Отпорност споредног вода [Ω]
T_c	Температура модула [K]
$T_{c, NOCT}$	Температура модула при NOCT условима [K]
$T_{c, ref}$	Температура модула при референтним условима [K]
U_L	Коефицијент топлотног губитка
V	Напон
V_{mp}	Напон у тачки масималне снаге дуж струјно-напонске криве
$V_{mp, ref}$	Напон у тачки масималне снаге дуж струјно-напонске криве, референтни услови
V_{oc}	Напон отвореног кола
$V_{oc, ref}$	Напон отвореног кола у референтним условима

Математички опис

➤ Четворопараметарски модел

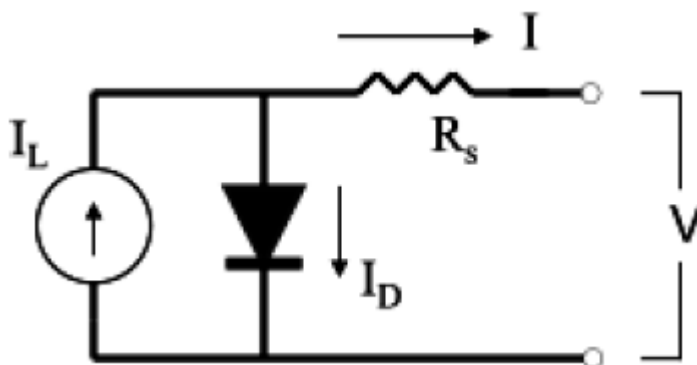
Еквивалентни четворопараметарски модел је развијен у великој мери од стране *Townsend* [1989] и разрађен од стране *Duffie i Beckman* [1991]. Овај модел је први пут укључен у

компоненте *TRANSYS* симулационог пакета од стране *Eckstein* [1990]. *EnergyPlus* модул користи *Eckstein*-ов модел за кристалне ФН модуле, при чему у четворопараметарском моделу представља да је нагиб струјно-напонске криве нула у стању кратког споја:

$$\left(\frac{dI}{dV}\right)_{V=0} = 0$$

Ово је разумна апроксимација кристалног модула. Четири параметра у моделу су I_L , $I_{0,ref}$, γ , R_s . Ово су емпиријске вредности које се не могу директно утврдити физичким мерењем. *EnergyPlus* модел ове вредности израчунава из података из каталога произвођача.

Четворопараметарско еквивалентно коло је приказано на следећој слици:



Слика 40- Еквивалентно коло у четворопараметарском моделу

Одређивање карактеристика у радним условима

V је напон оптерећења, I је струја која протиче кроз оптерећење у ФН.

Струјно-напонске карактеристике ФН се мењају са излагањем Сунца и променом температуре. ФН модел укључује ове услове околине, уз четири константе модула I_L , $I_{0,ref}$, γ , R_s , и генерише струјно-напонску криву за сваки временски корак.

Једначина струјно-напонског кола приказаног на претходној слици је следећи :

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{q}{\gamma k T_c} (V + I R_s) \right) - 1 \right]$$

R_s и γ су константе. Фотоструја I_L линеарно зависи од упадног зрачења:

$$I_L = I_{L,ref} \frac{G_T}{G_{T,ref}}$$

Референтно излагање Сунцу G_{ref} је готово увек дефинисано као 1000 W/m^2 . Струја I_0 обрнутог засићења диоде је величина која зависи од температуре:

$$\frac{I_0}{I_{0,ref}} = \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}} \right)^3$$

Једначина струјно-напонског кола даје тренутну струју као функцију напона. Када се I_0 и I_L одреде из предходне две једначине, Њутнов метод се користи за израчунавање ФН струје. Поред тога, итеративна рутинска претрага проналази струју (I_{mp}) и напон (V_{mp}) у тачки максималне снаге дуж струјно-напонске криве. [12]

Израчунавање $I_{L,ref}$, $I_{0,ref}$, γ , R_s

IDF спецификација за ФН модел обухвата неколико вредности које се морају прочитати из каталога произвођача ФН модула. Ове вредности се користе за одређивање еквивалентних карактеристика $I_{L,ref}$, $I_{0,ref}$, γ , R_s . Ове карактеристике дефинишу еквивалентно коло које се користи за тражење ФН карактеристике у сваком временском кораку, као што је описано раније. Овај одељак описује алгебру и израчунавање алгоритма коришћених за добијање карактеристика за четири еквивалентна кола.

Три од овх наведених вредности $I_{L,ref}$, $I_{0,ref}$, γ , могу се алгебарски израчунати. Први корак је да се замени струја и напон у једначини струјно-напонског кола за отворено радно коло кратког споја, за услове максималне снаге:

$$0 = I_{Lref} - I_{0ref} \left[\exp \left(\frac{q}{\gamma k T_{cref}} V_{oc,ref} \right) - 1 \right] - \frac{V_{ocref}}{R_{sh}}$$

$$I_{sc,ref} = I_{L,ref} - I_{0,ref} \left[\exp \left(\frac{q I_{sc,ref} R_s}{\gamma k T_{c,ref}} \right) - 1 \right] - \frac{I_{sc,ref} R_s}{R_{sh}}$$

$$I_{mp,ref} = I_{Lref} - I_{0ref} \left[\exp \left(\frac{q}{\gamma k T_{cref}} (V_{mp,ref} + I_{mp,ref} R_s) \right) - 1 \right] - \frac{V_{mp,ref} + I_{mp,ref} R_s}{R_{sh}}$$

У сваком случају “-1“, термин се може испустити да би се поједноставило рачунање. Ова апроксимација има мали утицај на десној страни једначине због величине I_0 је веома мали, углавном реда величине 10^{-6} А. Нека преуређивања су онда неопходна да би се дала следећа три израза $I_{L,ref}$, $I_{0,ref}$, γ :

$$I_{L,ref} \approx I_{sc,ref}$$

$$\gamma = \frac{q(V_{mp,ref} - V_{oc,ref} + I_{mp,ref} R_s)}{k T_{cref} \ln \left(1 - \frac{I_{mp,ref}}{I_{sc,ref}} \right)}$$

$$I_{0ref} = \frac{I_{sc,ref} R_s}{\exp \left(\frac{q V_{oc,ref}}{\gamma k T_{cref}} \right)}$$

У овом тренутку потребна је додатна једначина како би се утврдио последњи непознати параметар. Узимајући аналитички извод напона у односу на референтном

отвореном колу произилази четврта једначина. Ова аналитичка вредност је упарена са температурним коефицијентом отвореног кола, датим у каталогу:

$$\frac{\partial V_{oc,ref}}{\partial T_c} = \mu_{voc} = \frac{\gamma k}{q} = \left[\ln \left(\frac{I_{sc,ref}}{I_{o,ref}} \right) + \frac{T_{c,isc}}{I_{sc,ref}} - \left(3 + \frac{qe}{AkT_{c,ref}} \right) \right]$$

Где је :

$$A = \frac{\gamma}{N_s}$$

“TRANSYS PV model“ користи итеративну рутину за претрагу у ове четири једначине за израчунавање еквивалентне карактеристике кола. Први корак је подесити горње и доње границе за параметар серијске отпорности R_s : физичка ограничења захтевају да вредност R_s : лежи између 0 и вредност таква да је $\gamma = N_s$. Почетна претпоставка вредности R_s се налази између ових граница, γ и $I_{o,ref}$ се налазе из горе поменутих једначина, док једначина $I_{L,ref} \approx I_{sc,ref}$ даје тривијално решење $I_{L,ref}$. Модел тада користи једначину $\frac{\partial V_{oc,ref}}{\partial T_c}$ да упореди аналитичке и каталошке вредности за μ_{voc} . Када се све остале варијабиле одржавају константним, аналитичка вредност за μ_{voc} монотонно расте са серијским отпором (Taunsend 1989). Ако је коефицијент аналитичког напона мањи од каталошке вредности, доња граница за R_s се ресетује на текућу вредност. Исто тако, горња граница је постављена на тренутну вредност, ако је израчуната вредност μ_{voc} превелика. По ресетовању горње и доње границе за R_s , нова предпостављена вредност се налази постављањем границе на просечне. Овај поступак се понавља док год R_s и γ конвергирају. Имајте на уму да се за $I_{L,ref}$, $I_{o,ref}$, γ , R_s предпоставља да су стални и да се израчунавају само на први позив у симулацији. Алтернативно, корисник може унети познати серијски отпор тако што ће унети позитивну вредност у *idf*. У овом случају итеративна рутина описана горе се прескаче и $I_{L,ref}$, $I_{o,ref}$, γ се директно налазе из задате вредности R_s .

Радна температура модула

ФН модел користи један од пет метода за одређивање података о температури ћелије. Температура ћелије ФН модула је важна, јер што је температура ћелије већа, то је нижи њен електрични излаз. Метод израчунавања температуре ћелије је изабран од стране корисника у *EnergyPlus idf* фајлу преко параметара избора у *IDD* улазу званом интеграција и режим температуре ћелија.

Ако је вредност овог параметра “одвојени NOCT услови“ онда се температура ћелије ФН моделира методом из Dufi i Beckam (1991) за процену температуре ћелије. Ово се заснива на стандардним NOCT (номинална радна температура ћелија) мерењима како би се израчунала температура T_c модула у сваком временском кораку. NOCT температура (T_c , NOCT) је радна температура модула са брзином ветра од 1 m/s, без електричних оптерећења и одређеног излагања Сунцу и температури околине [Bekman, Dufi 1991]. Вредност за GT NOCT излагања Сунцу и температури $T_{a,NOCT}$ су обично 800 W/m² и 20 °C. η_c је ефикасност конверзије модула, који варира у зависности од амбијентних услова, τ_a је константа дефинисана од стране корисника.

Једначина је:

$$T_c = T_a + \frac{\left(1 - \frac{\eta_c}{\tau\alpha}\right)}{\left(\frac{G_{t\tau\alpha}}{U_L}\right)}$$

Ако корисник специфицира мод за израчунавање температуре ћелије “Decoupled Ulleberg Dynamic“, онда се користи метод развијен од стране Ulleberg:

$$T_{cell\ f\ t} = T_{ambient} + (T_{cell\ f\ t-1} - T_{ambient}) * e^{\frac{-U_L}{C_{ap}}\Delta t}$$

Другим речима, температура ћелије је функцији предходне температуре ћелије и топлотног капацитета материјала ФН модула.

Ако корисник наводи “*Integrated Surface Outside Face*“ за овај параметар, онда резултат за температуру из моделирања површине *EnergyPlus* се користи за температуру ћелија. Такође енергија добијена из површином као електрична енергија постаје одвод у моделовању интерног извора за површину за пренос топлоте.

Ако корисник наводи “*Integrated Transpired Collector*“ за овај параметар, онда резултат за температуру неглазиране површине колектора се користи за температуру ћелије. Такође енергија добијена из површине колектора, као електрична енергија се добија коришћењем изворног термина у моделирању температуре колектора.

Ако корисник наводи “*Integrated Exterior Vented Cavity*“ за овај параметар, онда резултат за температуру спољне шупљине се користи за температуру ћелије. Такође енергија добијена из спољне шупљине као електрична енергија се добија коришћењем изворног термина у моделирању температуре преграде.

Модели са мултинизовима

Електрични прорачуни разматрани у предходним одељцима баве се само са једним модулом. *EnergyPlus* ФН компонент се може користити за симулацију низова са било којим бројем модула. *Idf* дефинише број модула у серији (NS) у модула у паралели (NP) за цео низ. Укупан број модула у низу је производ NS и NP су постављени на 1. Овај приступ занемарује губитке због неусклађености модула. Помоћу наведених једначина, као и претпоставке да панели раде на максималној снази, директно се израчунава производња једносмерне струје. Претпоставља се да је учинак низа идентичних модула линеаран са серијским и паралелним бројем модула. Ефикасност инвертора се линеарно примењује да би се добила производња електричне енергије. Капацитет инвертора формира границу за производњу снаге из ФН генератора. Оптерећење пролази кроз ФН низ и делује као генератор и разни тривијални прорачуни пореде ФН производњу овог оптерећења. Ако је ФН низ повезан са површином која је повезана са зоном, па ако зона има било какав мултипликатор у вези са њим, производња електричне енергије ће бити у складу са тим умножена. [12]

6. Испитивање карактеристика панела

У претходним поглављима смо говорили о свему што чини један фотонапонски панел, као и утицај различитих фактора на њега. Даљи део рада ће се бавити испитивањем и поређењем софтверских и реалних карактеристика, добијених мерењима помоћу описане инсталације.

Почетна идеја се заснива на томе да извршимо софтверску симулацију фотонапонског панела (поглавље 5), а затим да исти изложимо стварним теренским условима експлоатације (поглавље 4). Поређењем ова два испитивања имаћемо јасну слику о стварној производњи електричне енергије, факторима који утичу на производњу енергије, исправним подешавањима програма у складу са локацијом на којој се врши симулација која уједно може бити и пресудна, а све у циљу да се јасно прикаже исправна слика симулације, ма каква она била, без фаворизовања једног или другог начина мерења. Практично, једним испитивањем допуњаваћемо друго како бисмо имали јасну слику о стварној ефикасности коришћења соларне енергије за производњу електричне енергије.

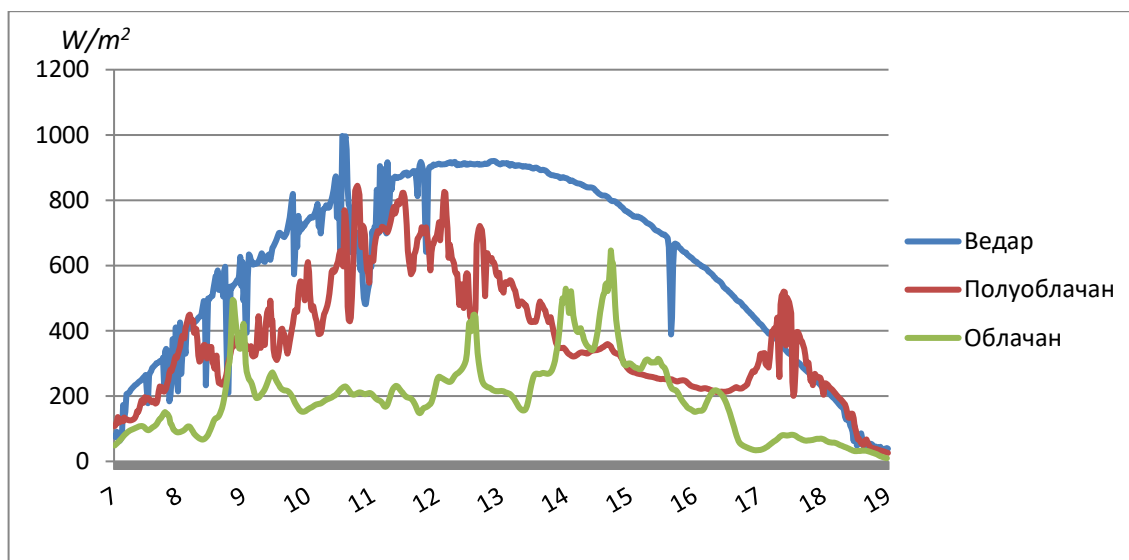
6.1. Испитивање утицаја Сунчевог зрачења на излазне карактеристике фотонапонских панела

Сунчево зрачење представља основни извор енергије за производњу електричне енергије из фотонапонских система, и као такво јак је битно сагледати какве су могућности за конверзију зрачења у електричну енергију. Утицај сунчевог зрачења у самом претварању енергије утицаће и на ефикасност панела у раду, тако да је од велике важности знати колико зрачење можемо конвертовати у корисну енергију путем ПВ панела. Један од најбитнијих фактора који утичу на интензитет Сунчевог зрачења, а самим тим и на ефикасност јесу временски услови који се код нашег становништва најчешће олако схватају. До овог закључка смо дошли у разговору са особама које нису упућене у област соларне енергије, а верујемо да и велика већина становништва би имало овакво мишљење због недовољне информисаности о овој грани енергије. Па тако би на пример у практичним условима имали следећу ситуацију: уколико имамо максимални интензитет Сунчевог зрачења од 1000 W/m^2 , и панел снаге 100 W , то би значило да тај панел сваки сат производи 100 W . Када интензитет Сунчевог зрачења опадне на 500 W/m^2 нпр. услед временских услова, исти панел би требало да произведе 50 W , а уколико бисмо имали врло лоше временске услове са тамним облацима, интензитет би могао пасти и на 100 W/m^2 што би значило да тај панел производи свега 10 W по сату. Из свега ово наведеног можемо да закључимо да временски услови јак утичу на интензитет Сунчевог зрачења, тако и на ефикасност, и да се при пројектовању мора обратити велика пажња на овај параметар. Ова теза нам даје управо те одговоре, какав је утицај сунчевог зрачења на напон, струју, снагу и ефикасност ПВ панела у зависности од временских услова, и да ли се производња енергије креће у просечним границама за период у којим је мерење и вршено.

Мерење је вршено за град Аранђеловац, за временске услове од потпуно облачног дана, преко полуоблачног дана до сунчаног дана. Коришћена је опрема која је наведена у поглављу 4, односно ПВ панел, мерни инструмент и инфрацрвени безконтактни мерач температуре. Мерења су вршена на сваких петнаест минута за посматрани сат, и затим приказане вредности у табелама представљају средње вредности излазних параметара, тј. читавање су вредности на дигиталном мерном инструменту напона и струје, а помоћу

мерача температуре су бележене вредности температуре панела. Панели су у сва три случаја постављена под фиксним углом од 44° према хоризонталној равни, и усмерени према југу.

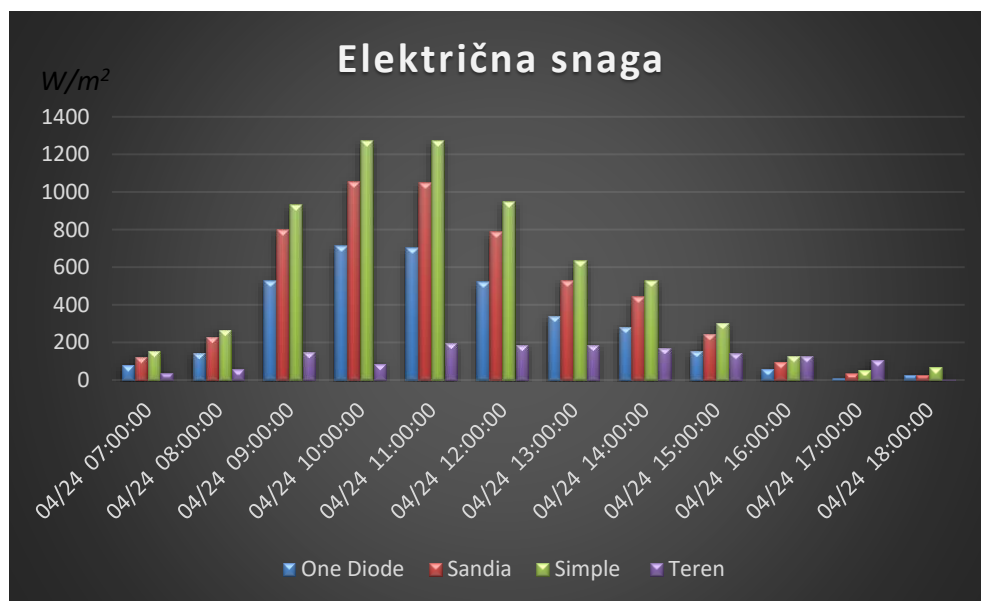
Софтверски део симулације је обухватио тачке које смо већ помињали, а то су 5.3.1 – *Simple model*, 5.3.2- *Sandia model*, 5.3.3.- *Equivalent One-Diode Model*.



Слика 41- Интензитета сунчевог зрачења (W/m^2) (7)

Графикон који се налази на слици 41, представља вредности интензитета сунчевог зрачења за три наведена дана за које су вршене теренске симулације. То су вредности добијене од РХМ3-а. Како се ради о временским условима који могу бити јако променљиви из године у годину, морали смо бити припремљени да симулације које вршимо на терену и оне које обрађујемо у софтверском пакету буду неподударне. Софтвер користи временски фајл са зрачењем које је прикупљено у претходних 10 година, а потом програм повлачи осредње вредности зрачења за симулацију. Са друге стране, теренском симулацијом обухватили смо једнодневне вредности сунчевог зрачења, које нису релевантне у односу на програм и његову десетогодишњу базу података. Када кажемо да нису релевантне мислимо на то да се резултати услед дејства облачности и микроклиматских услова могу значајно разликовати.

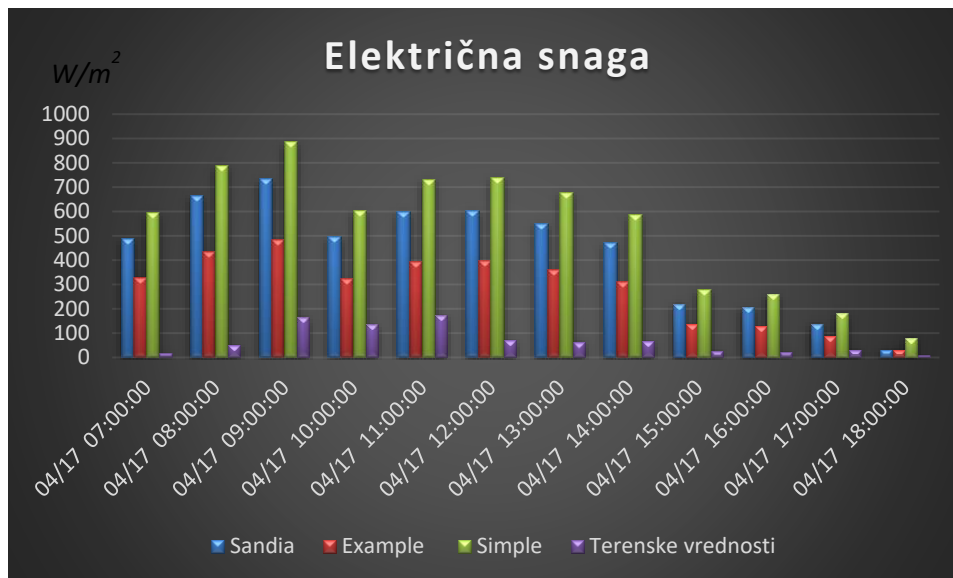
Наредна слика 42 нам даје приказ три модела софтверских симулација у *Energy Plus* заједно са теренском симулацијом, која може значајно одсупати као што можемо приметити на графикону. То је управо утицај који стварају временски услови на излазне карактеристике фотонапонског панела, а могу бити свакојаки (албеда, апсорпција гасова и аеросола..)



Слика 42-Електрична снага различитих модела симулације (ведро време)

Закључујемо да најбоље постигнуте резултате је дао *Simple* модел, затим *Sandia*, *One Diode* и на крају теренски услови. Образложење оваких одступања резултата можемо тражити првенствено у исправном подешавању модела за симулацију. Када то поменемо, мислимо конкретно на вредности које уносимо приликом подешавања модела за симулацију. Па тако прво приметно јесте зрачење које "пада" на површину панела $G_t = 1400 W/m^2$ дато у самом моделу. Према подацима РХМЗ-а а приказана на графику 41, посматраног дана када је вршена теренска симулација имали смо просечне вредности зрачења од $337 W/m^2$, што би циљ имало доста смањену вредност произведене електричне снаге, а приказане на графику 42 као теренске вредности (љубичаста боја). Уз све то имали смо просечну теренску ефикасност модела који је био симулиран и износио 12%, што за овај тип панела и генерацију производње истог представља реалан податак. Не можемо очекивати већу производњу електричне енергије од енергије зрачења које "пада" на површину панела. То би значило да је ефикасност једног таквог система већа од 1, што је апсолутно немогуће, а притом знамо да употребом савремених материјала (пре свега силицијума) ефикасност таквих ћелија може достићи и максималне вредности 0,5 што представља изузетне резултате. Ово нема за циљ оспоравање самог програма, већ јасну смерницу да приликом симулације поведемо рачуна о уносу података, и добијању јасне слике о стварним могућностима евентулане експлоатације панела.

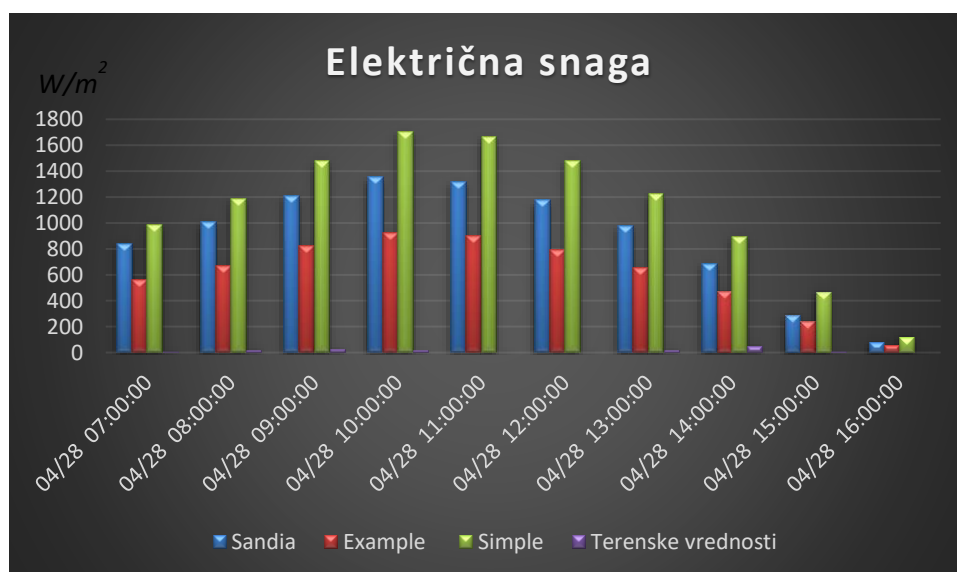
На слици 43 приказали смо следећу симулацију која је вршена у склопу прве тачке, а то су резултати електричне снаге за различите моделе симулације, за полуоблачно време како је теренски установљено.



Слика 43-Електрична снага различитих модела симулације (полуоблачно време)

Оно што морамо јасно навести јесте да смо у оквиру ове тачке, па и у осталима користили временски фајл са осредњим статистичким подацима за период од 10 година за софтверске симулације. Са друге стране, теренске симулације су обухватиле дневне изложености панела зрачењу, временски услови су јако променљиви, тако да се поређења софтверских и теренских симулација могу значајно разликовати, што ће бити у великој мери и случај у овом делу рада.

Даље у оквиру ове тачке приказаћемо резултате електричне снаге за различите моделе симулације, за облачно време како је теренски установљено, а приказано на слици 44.

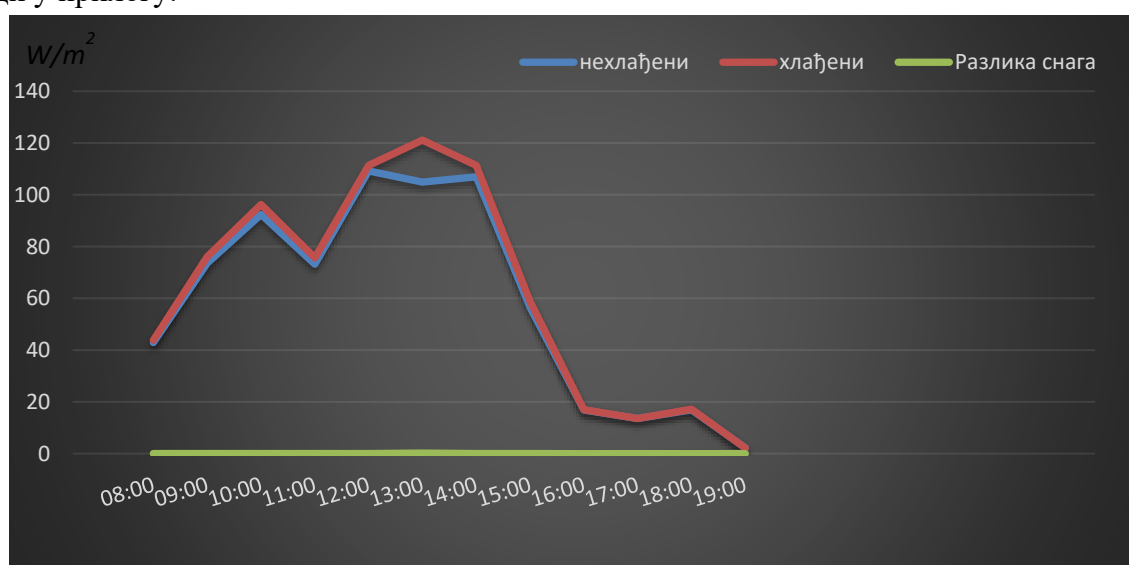


Слика 44-Електрична снага различитих модела симулације (облачно време)

6.2. Испитивање утицаја температуре на излазне карактеристике фотонапонских панела

Још један од великих недостатака соларних ПВ панела, како стручњаци тврде, а који утиче на ефикасност панела јесте и температура панела. За сваки панел произвођач дефинише температуру при номиналним условима рада (*NOCT*–*Nominal Operation Cell Temperature*). *NOCT* је температура панела при амбијентној температури 20 °C, соларној ирадијацији 800 W/m², брзини ветра 1 m/s. У овом делу симулације биће више речи о утицају хлађења панела на производњу и ефикасност панела, тј. питањем побољшања излазних параметара принудном циркулацијом ваздуха (теренска симулација) и софтверска симулација.

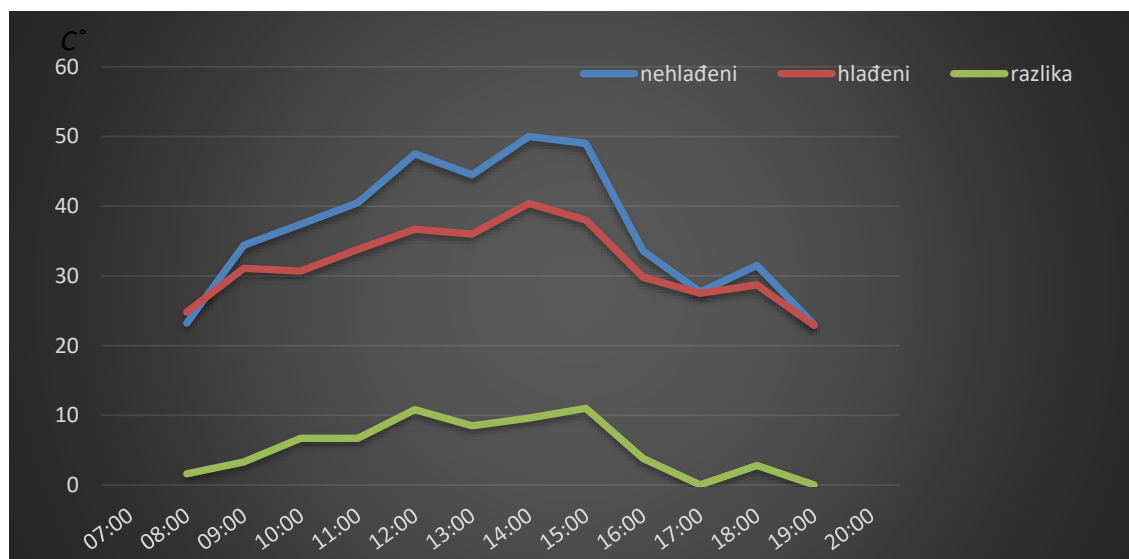
У оквиру ове тачке даћемо три примера симулације. Први се заснива на томе да ћемо извршити теренску симулацију а потом и софтверску за један посматран дан, што и следи у прилогу.



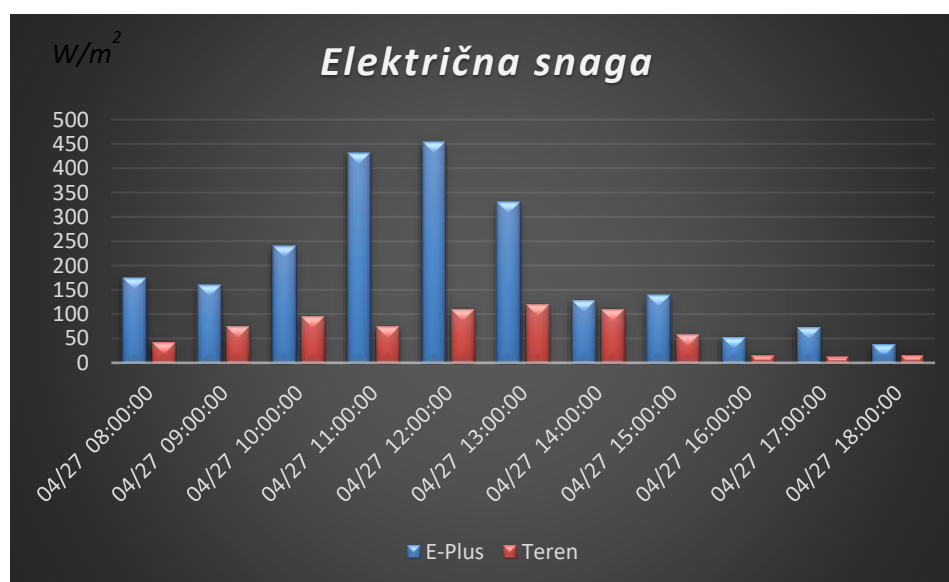
Слика 45-Теренске вредности симулације ПВ панела

Првенствено смо приказали утицај хлађења фотонапонских панела на излазне карактеристике истих, за теренске услове на слици 45. Хлађење је вршено вентилатором, што је свакако у посматрању енергетског биланса за целокупан систем, неповољно (произведена енергија трошена на хлађење). Том приликом нисмо запазили да имамо изузетно побољшане резултате охлађеног панела у односу на онај који није био изложен хлађењу. Свакако да постоји приметност и констатација да са одржавањем константне температуре панела долази до бољих резултата излазних параметара, али једноставно то није превише изразито, једним делом и вероватно зато што нисмо успели да одржимо температуру на препоручених 20 °C, што је и приказано на слици 46.

На слици 47 приказали смо вредности електричне снаге за теренске и *EquivalentOne-Diode* модел. Приказана одступања теренских и софтверских резултата образлажемо временским фајлом који смо већ горе наводили и објашњавали његов утицај на излазне карактеристике.



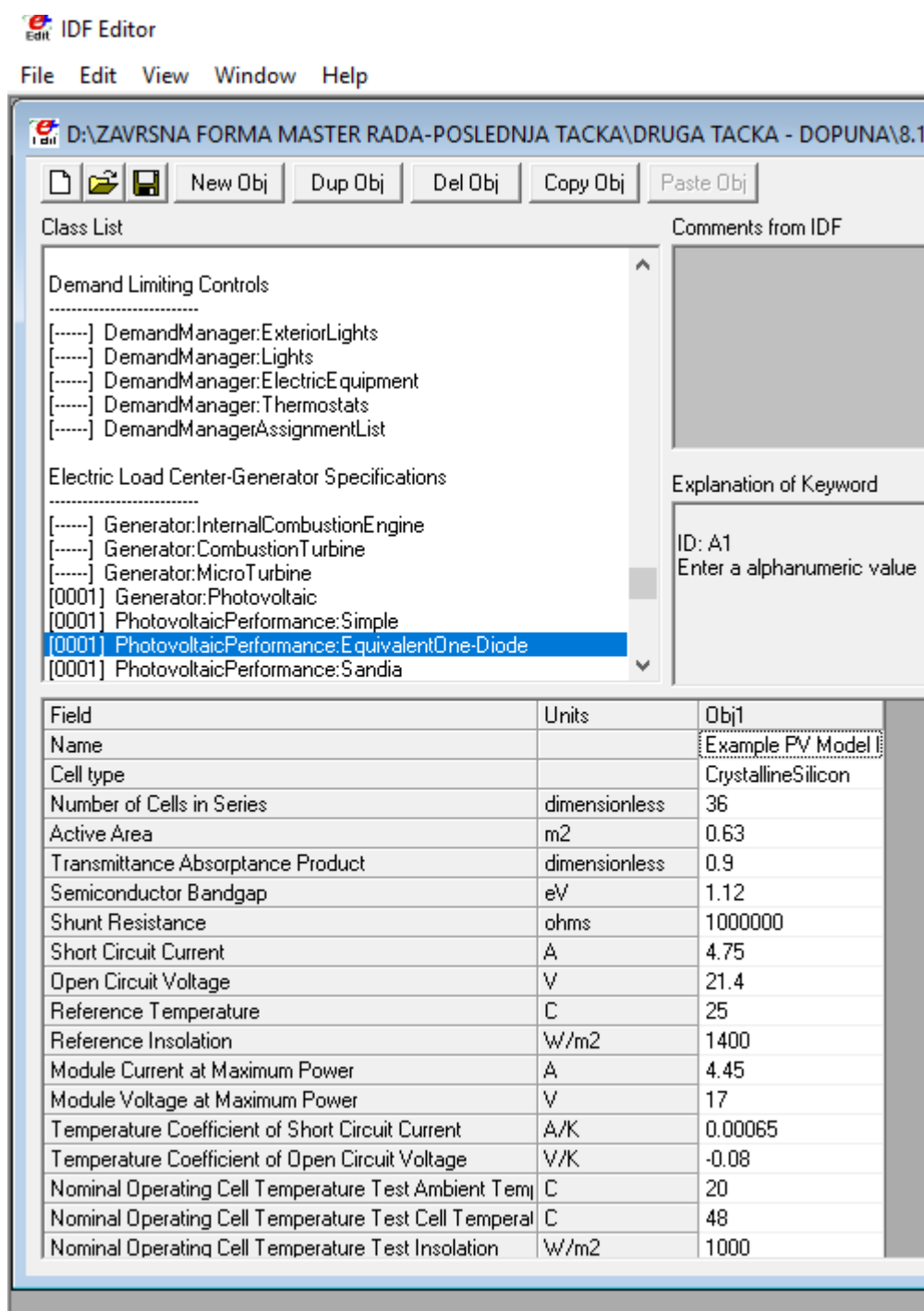
Слика 46- Поређење промена температуре нехлађеног и хлађеног ПВ панела



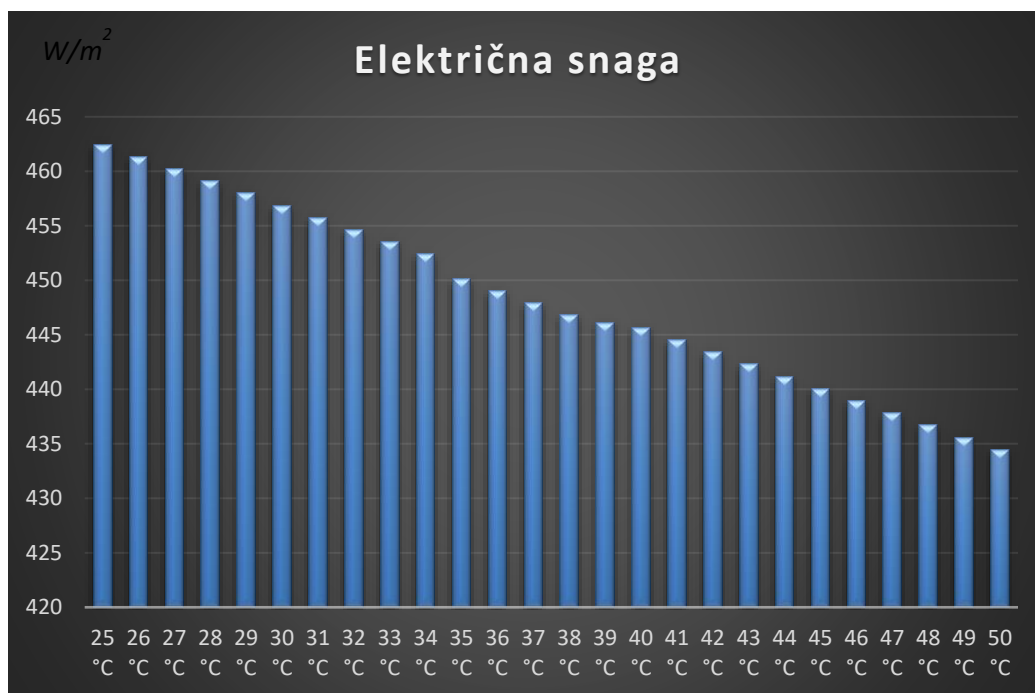
Слика 47- Теренске и софтверске вредности електричне снаге

Други случај се састојао у томе да теренским вредностима (температура панела, зрачење) припремимо *EquivalentOne- Diode* модел за симулацију. То је модел који нам омогућава да подешавањем поменутих теренских параметара (али не и ефикасности) успемо да добијемо што реалистичнију слику о стварним могућностима производње електричне снаге. И поред свега наведеног, најбоље постигнуте резултате смо приказали на слици 47. Просечна ефикасност теренских резултата се креће око 17,4 %. Уношењем вредности зрачења добијених од PXM3-а у *EquivalentOne- Diode* модел, као и температуре коју смо измерили, добијене су вредности приказане на слици 47.

Трећа тачка се заснива да одржавањем зрачења на 1000 W/m² у поменутом софтверском моделу и подизањем температуре зрачења, видимо како “реагује” програм, и да ли долази до смањења ефикасности излазних карактеристика.

Слика 48- *EquivalentOne- Diode* модел

Слика 48 приказује *EquivalentOne- Diode* модел. Ту јасно можемо видети параметре који карактеришу овај модел, за нас јако битна поља номиналних вредности и инсолације.



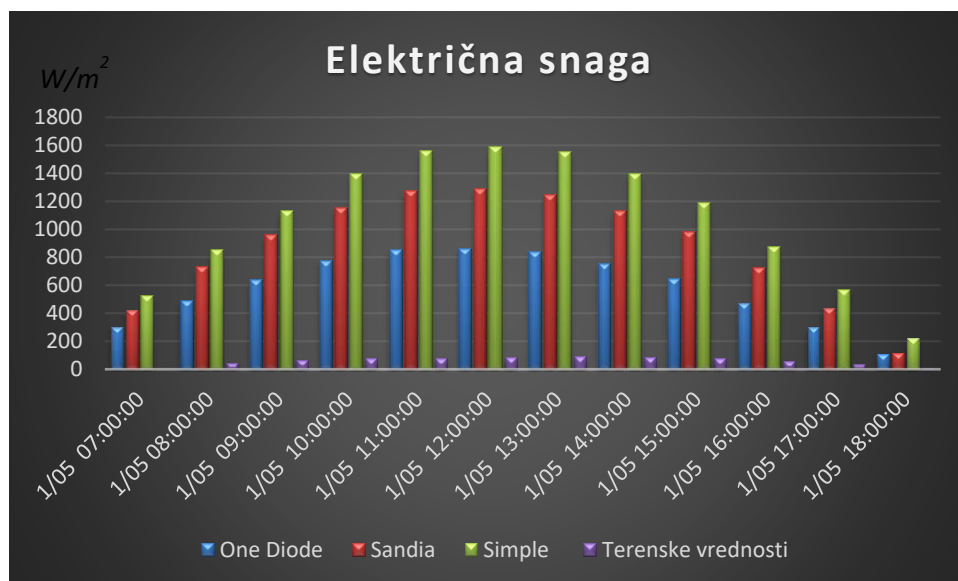
Слика 49- Зависност електричне снаге од температуре у *EquivalentOne- Diode* модел

Приказивањем претходне две слике, а посебно слике 49 приметно је да долази до опадања вредности електричне снаге са повећањем температуре у *EquivalentOne- Diode* моделу.

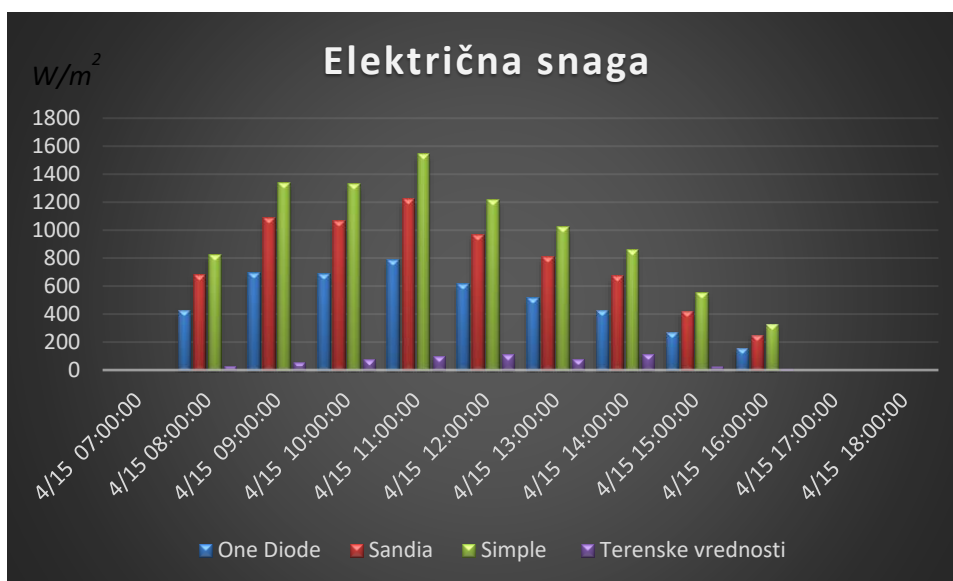
6.3. Испитивање утицаја нагиба на излазне карактеристике фотонапонских панела

У циљу повећања ефикасности панела неопходно је правилно оријентисати и поставити панел под нагибом, тако да можемо максимално искористити интензитет Сунчевог зрачења. Променом нагиба површине панела можемо утицати на производњу електричне енергије. Генерално, када би смо хтели да искористимо што више зрачења које пада на површину панела, услед дневне и годишње промене положаја Сунца морали би смо да мењамо угао панела, односно да имамо системе за праћење Сунца. Друга опција је промена угла услед годишњих доба. Тако би за јесењи и пролетњи период одговарао угао од 41.8037° према хоризонталној равни, за летњи 16.37° и зимски угао од 68.87° , док је за фиксни угао вредност 44° . Ове вредности угла се односе за град Аранђеловац где је мерење и вршено, а оптималне вредности угла за Србију крећу се од 41° до 44° за фиксни панел[10]. Овде ће бити вршена мерења за већ унапред дефинисане углове, и то за углове од $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ и 90° према хоризонталној равни.

Наредне слике ће нам дати приказ симулације софтверских модела обрађених у *EnergyPlus*, као и теренских симулација.

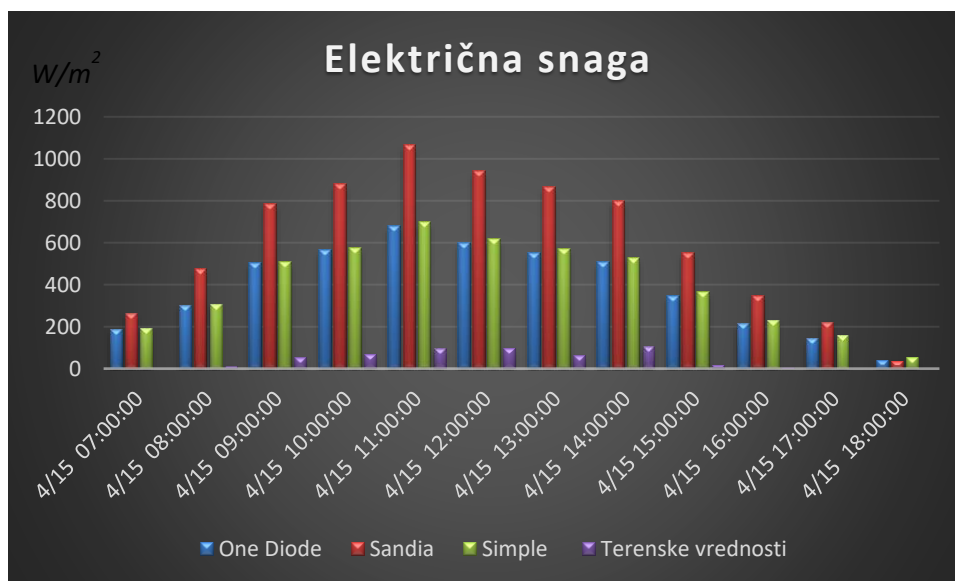


Слика 50- Електрична снага различитих модела симулације (угао 0°)

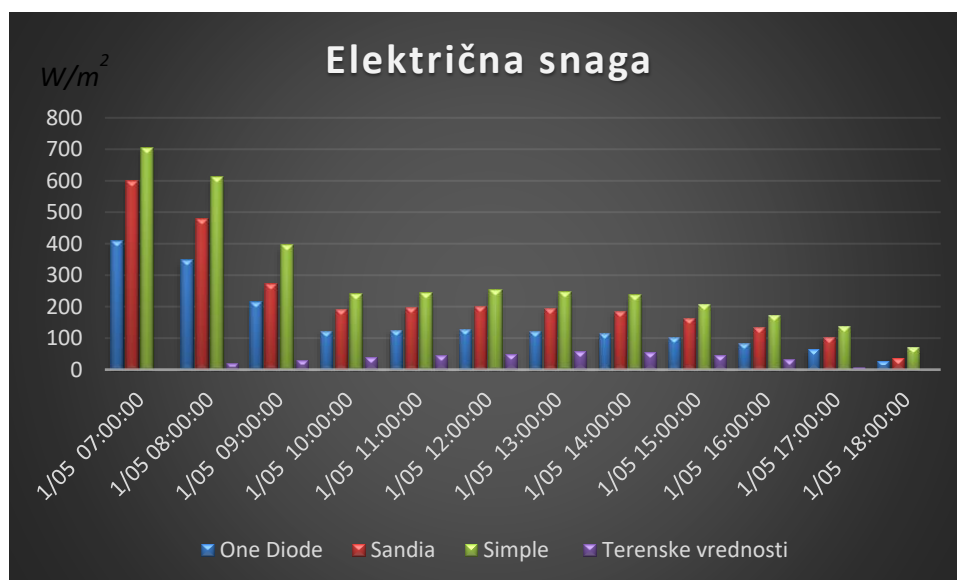


Слика 51- Електрична снага различитих модела симулације (угао 30°)

Модел *Sandia* и *Simple* остварили су најбље резултате приликом симулације, потом следи *EquivalentOne-Diode* модел, и најнеповљније резултате дале су теренске симулације, што је било и очекивано на основу претходног реченог о временском фајлу који користи софтвер. Ови резултати се односе на симулације фотонапонских панела који су постављени под углом од 0° и 30° , што је приказано на слици 50 и 51.



Слика 52- Електрична снага различитих модела симулације (угао 60°)

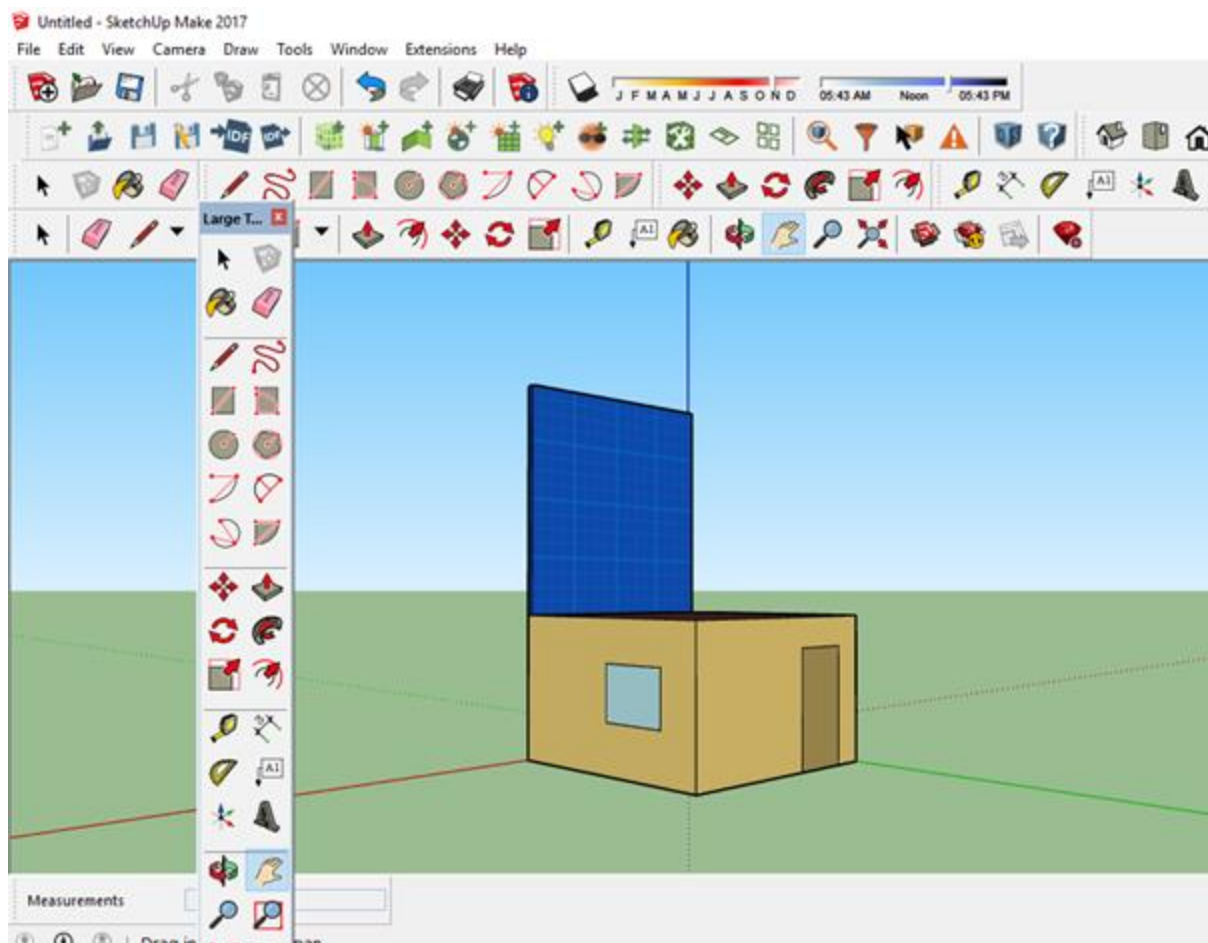


Слика 53- Електрична снага различитих модела симулације (угао 90°)

За панел постављен под углом од 60°, приказан на слици 52 најбоље вредности остварио је *Sandia* модел, потом приближно сличне резултате дала су преостала два модела, *Simple* и *EquivalentOne- Diode*, и на крају имамо теренске резултате као најнеповољније.

Код панела постављених под углом од 90°, а приказан на слици 53, најбоље вредности имамо за *Simple* модел, потом *Sandia*, *EquivalentOne- Diode*, и као до сада доста пута већ поновљено, теренски резултати имају најнеповољније резултате.

На наредној слици приказана је израда објекта за симулацију панела који је постављен под углом од 90°, настала у програму *Google SketchUp*.



Слика 54- Панел под правим углом (*Google SketchUp*)

Као што смо и очекивали, најлошије резултате смо добили за панел постављен под углом од 90° . Ту можемо приметити да имамо знатну производњу електричне енергије у раним јутарњим сатима, када је сунце „ниско“, где имамо директне сунчеве зраке које падају под правим углом у односу на постављени панел. Након тога следи пад производње електричне енергије, са подизањем висине Сунца. Затим панел који је постављен под углом од 60° , и преостала два панела под углом од 0° и 30° су показали најбоље резултате што је такође било очекивано, имајући у виду временски период када је вршена симулације (мај месец).

7. Закључак

Све интензивније коришћење фосилних горива током 20-ог века довело је до значајног смањења тих резерви. Пооштравањем мера седамдесетих година прошлог века (енергетска криза) кренуло се са рационалнијом потрошњом и управљањем енергената којих је свакако све мање, и окретању ка обновљивим изворима енергије. Тај свеprisутан вид енергије постао је најперспективнији облик коришћења енергије са огромним потенцијалом.

Овај дипломски рад пре свега има за циљ популаризовање коришћења обновљивих извора енергије, пре свега енергије произведене фотонапонским панелима.

У раду је извршено поређење реалних резултата добијених мерењем на терену, у граду Аранђеловцу са резултатима добијеним помоћу софтвера *EnergyPlus*. Добијени подаци дају одговоре на горе постављену тему, какве су карактеристике тих панела приликом излагања различитим условима експлоатације.

Употребом програмског пакета *EnergyPlus*, уз подршку *Google SketchUp* и *Open Studio*, извршили смо симулацију добро познатих модела *Simple*, *Sandia*, *OneDiode*. Као излазни параметар добили смо произведену енергију, на часовном, дневном нивоу (производ напона и струје, оно што карактерише један фотонапонски панел). Поменути модели су дали приближно сличне излазне карактеристике (произведену енергију), што у великој мери није био случај са теренским резултатима које смо остварили, за исте услове експлоатације. То у великој мери нисмо могли ни да очекујемо, временски фајл који смо користили за симулацију има осредње статистичке податке за период од 10 година, што није за поређење једног дана теренске симулације који смо извршили. На све то морамо додати да су временски услови јако променљиви, тако да се самим тим подаци могу увелико разликовати, што је и било случаја у овом раду. Правилним подешавањем модела ова одступања се могу смањити, што би за циљ имало реалнију слику производње електричне енергије, како је и приказано кроз рад.

Поред тога што је један од најчистијих и неисцрпних видова обновљивих извора енергије 'вртоглавог успона технологије материјала за израду истих (ефикасност и до 50%), овај вид енергије потпомаже ублажавању емисије гасова стаклене баште, и намеће се као дугорочан вид чисте енергије. На нама је да популаризујемо овај вид енергије, као бисмо пробудили свест становништва за коришћењем и рационалним трошењем исте, јер оваквим залагањем дајемо пример да у нама лежи највећи потенцијал за остваривање зацртаних циљева.

8. Литература

- [1] <https://www.energetskiportal.rs/rezerve-uglja-u-srbiji-33-milijarde-tona/> [приступљено 14.11.2018].
- [2] Небојша Лукић, Милун Бабић. *Соларна енергија*. 2008
- [3] <https://www.svetnauke.org/3013-arhimedov-blistavi-um> [приступљено 17.11.2018]
- [4] <https://www.solarnipaneli.org/2010/12/istorija-solarne-celije-i-deo/>
[приступљено 19.11.2018]
- [5] http://www.solarni-paneli.hr/pdf/01_handbook_fotonapon.pdf [приступљено 20.11.2018]
- [6] Ламбић М., Соларне технологије – топлотни и фотонапонски системи, Београд 2013.
- [7] V.V. Tyagi, Nurul A.A. Rahim, N.A. Rahim, Jeyraj A., L. Selvaraj, Progress in solar PV technology: Research and achievement, India, 2012.
- [8] Утицај појединих фактора на ефикасност прикупљања сунчеве енергије фотонапонским панелима, Завршни рад, *Вукашин Шћекић, Давор Кончаловић*.
- [9] Д. Николић, М. Бојић, Ј. Радуловић, Ј. Скерлић, Д. Тарановић, Review of non-silicon and new photovoltaics technology for electricity generation, Proceedings of The Second International Conference on Renewable Electrical Power Sources MKOIE 2013, Београд 2013
- [10]. Masters, Gilbert M. *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, Stanford University.
- [11]. T.M.Razykov, C.S. Ferekides, D. Morel, E. Stefanakos, H.S. Ullal, H.M. Upadhyaya, Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects, 2011.
- [12] Anonymous, ENERGYPLUS, Input Output Reference - The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output, University of Illinois & Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2009
- [13] Lawrence Berkeley National Laboratory. EnergyPlus - Engineering documentation: the reference to EnergyPlus calculations. University of Illinois & Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2001
- [14] R.H. Henninger, M.J. Witte, D.B. Crawley, Analytical and comparative testing of EnergyPlus using IEA HVAC BESTEST E100-E200 test suite, Energy and Buildings 36 (8), 2004, 855–863