

Факултет инжењерских наука

Универзитет у Крагујевцу



Назив студијског програма: Урбано инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Предмет: Енергетска ефикасност објеката

Број индекса: 928/2015

Милица М. Радовановић

Моделирање фотонапонских система помоћу софтвера EnergyPlus

Дипломски рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Данијела Николић, доцент-ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру завршног рада кандидат треба да представи резултате симулација за различите моделе фотонапонских панела који се користе у софтверу EnergyPlus. Потребно је извршити симулацију рада различитих модела фотонапонских панела (Simple, One Diode, Sandia) на посматраном објекту и дати преглед и анализу резултата за добијене вредности генерисане електричне енергије по месецима, на годишњем нивоу. Испитивања извршити за различите углове нагиба фотонапонских панела и дефинисати оптималну вредност угла нагиба према добијеним резултатима. Такође урадити упоредну анализу добијених вредности генерисане електричне енергије за различите моделе фотонапонских система.

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.

Крагујевац,

септембар 2019. године

Ментор:

Др Данијела Николић, доцент

РЕЗИМЕ

Предмет истраживања овог дипломског рада је моделирање различитих врста фотонапонских система (Simple, One Diode, Sandia) у окружењу софтвера EnergyPlus. Коришћење соларне енергије једна је од најбољих опција за одрживу будућност енергетских потреба у свету, а фотонапонски системи су често решење за генерисање електричне енергије.

Поред уводних разматрања о соларној енергији која је доживела велику експанзију последњих деценија, дат је приказ и принцип рада фотонапонске ћелије која је основа фотонапонских технологија, као и преглед постојећих врста фотонапонских технологија данас у свету. Такође су представљени модели различитих фотонапонских система који су имплементирани у софтвер EnergyPlus, након чега је извршена симулација њиховог рада.

Анализирани су резултати за добијене вредности генерисане електричне енергије по месецима, на годишњем нивоу, при чему су испитивања вршена за различите углове нагиба фотонапонских панела. На основу добијених резултата дефинисана је оптимална вредност угла нагиба фотонапонских панела, који омогућава генерисање максималне количине електричне енергије на годишњем нивоу. На крају је приказана и упоредна анализа добијених вредности генерисане електричне енергије за различите моделе фотонапонских система.

Кључне речи: фотонапонски системи, генерисана електрична енергија, симулација.

Abstract

The subject of this thesis is modeling of different photovoltaic systems (Simple, One Diode, Sandia) in EnergyPlus software environment. Using of solar energy is one of the best options for a sustainable future, while photovoltaics are the usual solution for electricity generation.

In addition to the introduction about solar energy that has undergone a large expansion in the last decades, it is described the principle of photovoltaic cells, and also, the overview of photovoltaic technology in a modern world today.

Electricity generated by the photovoltaic system are analyzed by months (yearly), for different slope angle of photovoltaics. According to the obtained results, optimal slope angle is defined, when the maximum of generated electricity can be achieved. At the end, comparative analyses for different photovoltaic systems are presented.

Keywords: photovoltaic systems, generated electricity, slope angle, simulation

Садржај:

1. Увод	1
2. Енергија.....	2
2.1 Обновљиви извори енергије	2
2.2 Соларна енергија.....	3
2.1.1 Глобално Сунчево зрачење	3
3. Коришћење соларне енергије у свету.....	5
3.1 Коришћење соларне енергије у Србији	6
4. Фотонапонска технологија	8
4.1 Фотонапонска ћелија.....	8
4.1.2 Принцип рада фотонапонских ћелија.....	9
4.1.3 Структура фотонапонске соларне ћелије	10
4.2 Технологија фотонапонских ћелија	11
4.2.1 Силицијумске фотонапонске ћелије	11
4.2.2 Галијум-арсенид фотонапонске ћелије	15
4.2.3 Фотонапонске ћелије треће генерације.....	16
5. Подела фотонапонских системи	18
5.1. Фотонапонски системи који нису прикључени на мрежу (Off-grid).....	18
5.2 Мрежно спојени ФН системи (On-Grid).....	19
6. Моделирање и симулација фотонапонских панела у софтверу EnergyPlus	21
6.1 Модел анализиране куће	21
6.2 Математички модел фотонапонског система	23
6.2.1 "Simple" модел фотонапонских панела.....	23
6.2.2 „Equivalent One-Diode” -Еквивалентни једно-диодни модел	25
6.2.3 „Sandia“ фотонапонски модел.....	28
7. Резултати симулације.....	33
7.1 Резултати симулације "Simple" модела фотонапонских панела	34
7.2 Резултати симулације „Equivalent One -Diode” модела фотонапонских панела....	36
7.4 Резултати симулације „Sandia“ модела фотонапонских панела	39
7.5 Поређење резултата.....	40
8. Закључак.....	43
9. Литература	44

1. Увод

Човеков положај на планети Земљи у односу на сва остала жива бића, својеврстан и карактеристичан је по томе што је он мисаоно биће, али и зато што је један од најутицајнијих фактора који су погодни за стварање еколошких неприлика на Земљи. Својим активностима човек мења физичке услове и изглед предела. Највеће промене физичког простора и еколошких услова живота започеле су крчењем и уништавањем шумског покривача као и развојем земљорадње, пољопривреде. То је имало велики утицај на климатске промене. Ове промене настављене су до дана данашњег исушивањем бара, језера па чак и делова мора. Последњих сто година, коришћење енергије фосилних горива драстично је утицало на атмосферу и промену климатских услова на планети. Процес урбанизације и индустријализације има негативне последице на живи свет, што условљава загађење ваздуха, воде и земљишта. Сунчева енергија је бесплатна, али уређаји који претварају сунчеву енергију у електричну нису [1].

Овај рад има за циљ да нас упозна са основним параметрима који утичу на карактеристике претварања енергије сунчевог зрачења у електричну енергију уз помоћ фотонапонских система. Пошто енергија сунчевог зрачења представља најбитнији улазни параметар приликом пројектовања фотонапонских система, први део рада посвећен је управо енергији Сунца, вредностима енергије која допире до Земље и која нам као таква стоји на располагању. Даље у раду анализирана је фотонапонска ћелија као основна јединица фотонапонског система. Описан је принцип рада и основне карактеристике фотонапонске ћелије. Поред овога дат је преглед материјала и технологија које се примењују приликом израде фотонапонских ћелија. Анализиране су различите врсте соларних фотонапонских система („Simple“, „One Diode“, „Sandia“) као и њихова разлика али и принцип рада у окружењу софтвера EnergyPlus. Вршене су симулације рада различитих фотонапонских система на анализираном објекту, при чему је посебна пажња посвећена углу нагиба фотонапонских система. На основу добијених резултата, дефинисан је оптималан угао при коме се добија максимална количина генерисане електричне енергије.

2. Енергија

Општа дефиниција којом се може описати енергија је способност система да врши рад. Сваки физички систем поседује енергију у одређеној количини. Енергија се појављује у различитим облицима и она се не може уништити ни створити, већ само може променити свој облик, на шта нам и указује Први закон термодинамике. Уопштено, постоје обновљиви и необновљиви извори енергије.

1. Необновљиви облици енергије су:

- Фосилна горива (угаљ, нафта, земни гас, уљни шкриљци),
- Нуклеарна горива

2. Обновљиви облици енергије су [2]:

- Енергија сунчевог зрачења,
- Биомаса (биогаз, укључујући дрво),
- Енергија ветра,
- Геотермална енергија (унутрашња топлота Земље),
- Енергија плиме и осеке,
- Енергија таласа.

2.1 Обновљиви извори енергије

Обновљиви извори енергије представљају неисцрпне изворе енергије из природе који се обнављају у одређеном временском интервалу у целости или делимично. Обновљиви извори енергије се експлоатишу с циљем производње електричне, топлотне и механичке енергије, а њихова значајна одржива карактеристика јесте нешкодљивост за околину са смањеном или редукованом емисијом CO_2 у процесу производње енергије. Република Србија располаже обновљивим изворима енергије Сунца, воде, ветра, геотермалне енергије и биомасе. Укупан потенцијал енергије из обновљивих извора у нашој земљи може да задовољи четвртину годишњих потреба Србије и када се томе дода огроман потенцијал за уштеду енергије у свим секторима. Оптимална употреба природних ресурса треба бити плански контролисана и усмерена јер они могу допринети општем добру државе и њених грађана. Потребе за енергијом расту, а квалитет животне средине је нарушен. Обновљиви извори се могу користити неограничено, уколико се истим поступа плански. Њихова употреба је све више популарна, јер имају занемарљиво мали негативан утицај на животну средину [3].

2.2 Соларна енергија

Сунце представља отворени фузиони реактор и највећи извор укупне количине енергије на Земљи. Сунчева енергија потиче од нуклеарних реакција у језгру, где температура достиже чак $15\,000\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$. У процесу фузије се у свакој секунди претвори око $600\,000\,000\text{ t}$ водоника (H) при чему настаје хелијум (He) уз ослобађање велике количине енергије. Ова енергија се у виду светлости и топлоте шири у свемир, па тако један њен мали део стиже и до Земље. За одржавање овог процеса потребна је велика количина водоника у језгру Сунца, уз јако висок притисак реда 10^{15} Pa и температуру реда $10^7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Од укупно $3,8 \times 10^{26}\text{ W}$ коју Сунце зрачи у свемир, Земља прими $1,75 \times 10^{17}\text{ W}$. Око 30% примљене енергије, Земља рефлектује натраг у свемир, док се око 47% енергије задржи у виду топлоте, а око 23% иде на процес кружења воде у природи. Остатак се “потроши” на фотосинтезу [4].

Енергија Сунчевог зрачења која долази до површине Земље износи $1,9 \times 10^8\text{ TWh}$ годишње, што је 170 пута више од енергије укупних познатих резерви угља у свету. Годишња производња електричне енергије у свету износи $16 \times 10^{15}\text{ Wh}$. Ако би се ова енергија генерисала фотонапонским системима претпостављене годишње излазне снаге од 160 kWh/m^2 , неопходна би била површина под панелима од $100\,000\text{ km}^2$ [5]. Астрономски и енергетски подаци о Сунцу су дати у табели 1.

Табела 1. Подаци о Сунцу [5]

Маса	$M_s = 2 \times 10^{30}\text{ kg}$
Пречник	$D_s = 1,39 \times 10^6\text{ km}$
Површинска температура	$T_p = 5700\text{ }^{\circ}\text{C}$
Густина снаге зрачења са површине	$S = 64\text{ MW/m}^2$
Удаљеност од Земље	$d_{(s,z)} = (147 \div 152) \times 10^6\text{ km}$
Луминозност	$L = 3,83 \times 10^{26}\text{ W}$

Чак и фосилна горива представљају један вид акумулиране Сунчеве енергије: нафта, природни гас, угљ. Земља добија више енергије од Сунца у току само једног сата него што људска популација употреби за једну годину. Количина Сунчеве енергије која стиже на површину планете је огромна, толика да је у једној години два пута већа од свих Земљиних необновљивих извора енергената [5].

2.1.1 Глобално Сунчево зрачење

Светлост представља један вид електромагнетног зрачења које доспева на површину Земље делимично се апсорбује на површини, док се други део светлости рефлектује назад у атмосферу. Светлост која потиче директно од Сунца, дифузно се прелама због постојања честица у самој атмосфери (нпр. облаци, прашина, смог и друге аеросоли) на основу чега се мења спектрална расподела светлости.

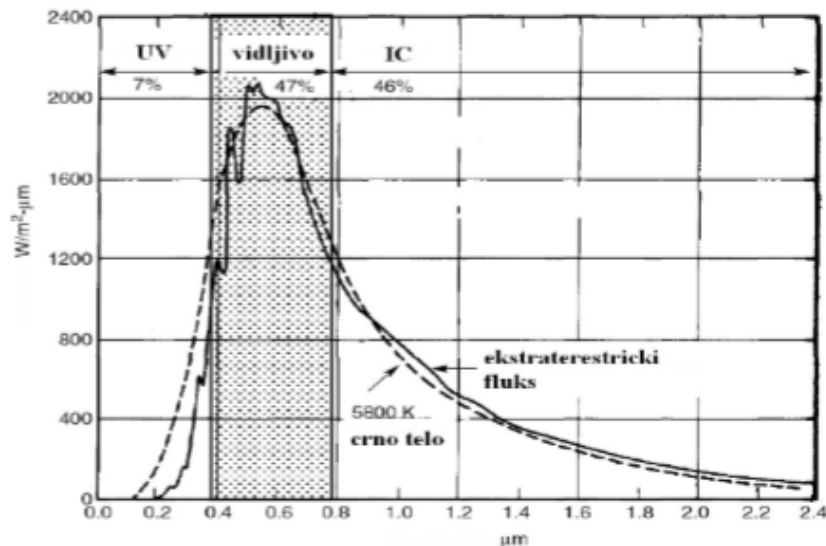
Помоћу Wien-овог закона помераја може се израчунати таласна дужина максималне снаге зрачења.

$$\lambda_m = \frac{2898}{T}$$

где су: $\lambda_m[\mu\text{m}]$ - таласна дужина максималне снаге зрачења,

$T[\text{K}]$ - апсолутна температура црног тела.

Свако тело на температури већој од апсолутне нуле емитује неку енергију зрачењем, при чему се та енергија израчунава тако што се посматрано тело упореди са апстрактним црним телом. Под црним телом се подразумева идеализовано тело које емитује више енергије са неке површине на некој температури него било које друго тело са исте површине и на истој температури. Црно тело апсорбује сву енергију која стигне на његову површину, тако да поред тога што је савршени емитер, црно тело је и савршени апсорбер. На слици 1. је приказан је спектар зрачења Сунца на површини Земљине атмосфере упоређен са спектром зрачења црног тела чија је температура 5800 К.



Слика 1. Спектар зрачења Сунца на површини Земљине атмосфере и спектар зрачења црног тела на температури од 5800 К [6]

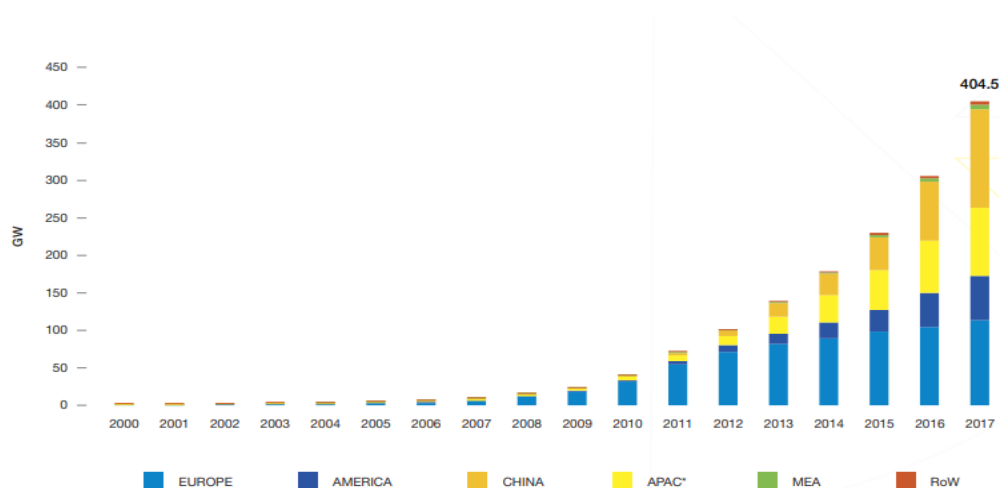
Може се сматрати да Сунце представља црно тело на температури од 5800 К. На основу израза Wien-овог закона може се одредити таласна дужина максималне снаге зрачења Сунца, која износи 0,5 μm . Спектар Сунчевог зрачења се налази између таласних дужина 0,1 и 1013 μm и дели се на ултраљубичасти део спектра (7%), видљиви део спектра (47%) и инфрацрвени део спектра (46%). Видљиви део спектра је између таласних дужина 0,38 и 0,78 μm [6].

3. Коришћење соларне енергије у свету

Енергија ветра и Сунца спадају у највише коришћене обновљиве енергије данас у свету. Последњих 5 година је у читавом свету дошло до наглог пораста примене свих облика обновљивих извора енергије.

Запажена је изванредна стопа раста соларне енергије у последњих неколико година, иако постоји дуг пут за развој и коришћење обновљивих извора енергије, укупан удео ове енергије износи 12,1% од укупне светске потребе за енергијом према подацима из 2017. године. На глобалном нивоу, потражња за соларном енергијом апсолутну доминацију више него икада достиже у Кини. Ова земља је инсталирала више од половине соларних капацитета на свету, односно 53,3%. Сједињене Америчке Државе су други на свету по инсталираним капацитетима што износи 10,6 GW, односно 42% [7].

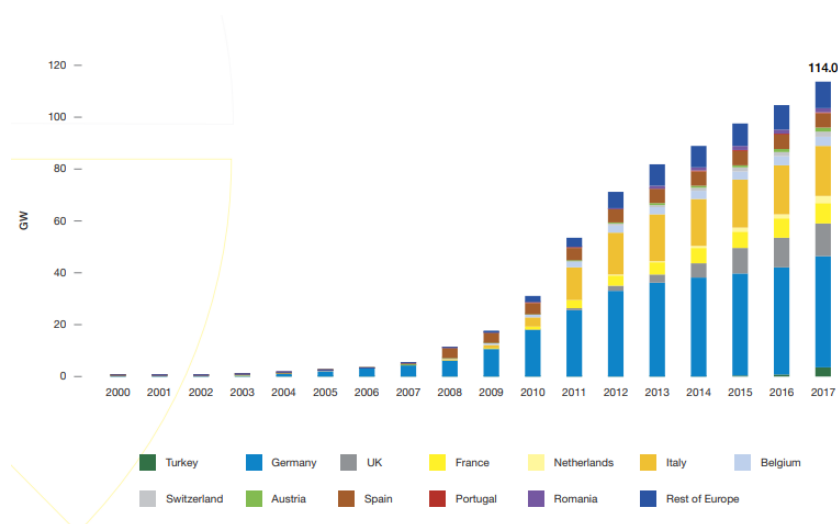
У свету је инсталирано соларних електрана капацитета од преко 400 GW према подацима из 2017. године (слика 2), при чему су премашени рекорди од 300 GW забележени у 2016. години и 200 GW у 2015. години [7].



Слика 2. Соларни инсталирани капацитети у свету у периоду од (2000-2017) године[7]

Под развојем фотонапонске технологије подразумева се развој тржишта сунчеве ФН енергије и развој саме технологије. Када говоримо о тржишту ФН енергије мислимо на инсталиране капацитете соларних ћелија у некој регији или свету. Уназад десетак година, тржиште ФН технологије расте практично експоненцијално. Државе у којима је произведено највише ФН соларних ћелија су Јапан, Немачка, затим САД, Тајван и Кина [7].

У 2017. године девет земаља инсталирало је више од 1 GW соларне енергије. Предвиђа се да ће кроз пар година овај број бити знатно већи. Инсталирани капацитети у 2017. години у Европи износи 9.2 GW. Када се гледа укупно инсталирани капацитети у Европи, прва два места заузимају Немачка (37,7%) и Италија (17,0%) потом Велика Британија са инсталираним капацитетима од (11,1%), док је Француска заузима четврто место (7,0%). Шпанија остаје на позицији број пет (4,9%) [7].

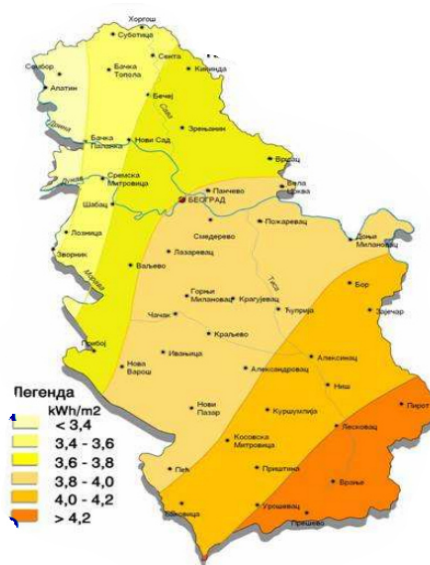


Слика 3. Укупно инсталирани капацитети у Европи који су повезани на мрежу 2000 – 2017 [7].

3.1 Коришћење соларне енергије у Србији

На већини територије Србије број сунчаних дана је знатно већи него у многим европским земљама (између 1500 и 2200 часова годишње), међутим соларни потенцијал наше земље је скоро неискоришћен. Енергија коју Сунце током године емитује на површини од 1 m² у Србији је једнака енергији која се добије сагоревањем 130 литара нафте. Просечна вредност глобалног зрачења на годишњем нивоу на територији Немачке износи око 1000 kWh/m² док је у Србији 1400 kWh/m² [8].

Просечан интензитет сунчевог зрачења (слика 4) на територији Републике Србије се креће од 1,1 kWh/m²/дан на северу до 1,7 kWh/m²/дан на југу - током јануара, а од 5,9 до 6,6 kWh/m² /дан - током јула месеца [8].



Слика 4. Просечна дневна енергија глобалног зрачења на хоризонталну површину [8]

У нашим условима соларни колектори су постали популарни у домаћинствима за грејање топле воде. Најмањи колектори имају површину од два m^2 и довољни су за загревање воде у једном домаћинству. Инсталациони потенцијали од око 20MW, са просечном годишњом производњом од 1500-2000 kWh/ m^2 .

Када би само 300 000 домаћинстава у Србији имало бар 5 m^2 соларних колектора за грејање или санитарне потрошне воде или ваздуха уштедело би се 1 500 GWh енергије на годишњем нивоу, што одговара инсталисаном производном капацитету од око 400 MW. Таква инвестиција би се исплатила за две године без икакве потрошње енергената.

Према подацима из 2015. године у Републици Србији је инсталирано 10 MW соларних капацитета. Од тога соларних електрана на земљи 6 MW, соларних електрана на објекту до 30 kW - 2 MW и соларних електрана на објекту до 30 до 500 kW - 2 MW [9].

Потенцијал соларне енергије у Србији износи 0,64 милиона тое годишње (или око 16,7% укупног потенцијала обновљивих извора). Највећи потенцијал за коришћење соларне енергије имају градови у јужном делу Србије – Ниш, Куршумлија, Врање.

Како би се соларна енергија више користила у нашој земљи, неопходно је едуковати грађане о значају и очувању животне средине, као и од уштедама које се постижу коришћењем обновљивих извора енергије.

4. Фотонапонска технологија

Фотонапонска технологија је последњих неколико деценија закупила пажњу науке и јавности. Соларна енергија је одмах употребљив, чист и обновљив еколошки ресурс, при чему ова енергија има велику предност над фосилним горивима. У свету се све више ради на системима који конвертују соларну у електричну енергију помоћу фотонапонских (соларних) ћелија, док се топлотна енергија добија помоћу соларних колектора. Постоје системи који се постављају на кућама који су мањих размера или се постављају на великим комерцијалним пољима (слика 5) у виду соларних панела који дају велики допринос стабилности рада јавних електро mreжа.



Слика 5. Пример соларних панела на пољима [10]

Фотонапонска конверзија енергије Сунца подразумева директно претварање енергије Сунчевог зрачења у електричну енергију и назива се фотонапонски ефекат. Овај ефекат први је, пре скоро два века, уочио француски научник Edmond Becquerel. Развојем квантне теорије почетком 20-тог века фотонапонски ефекат је објашњен, чиме је омогућена израда фотонапонских уређаја. Фотонапонска конверзија сунчевог зрачења се врши у фотонапонским ћелијама које су израђене од полупроводничких материјала чији рад задовољава највише еколошке стандарде [10].

4.1 Фотонапонска ћелија

Фотонапонске (соларне) ћелије могу производити електричну енергију директно из светлости и функционишу као еколошки и економски изузетно прихватљив извор енергије. Фотонапонске ћелије раде на принципу фотоелектричног ефекта и израђују се од различитих полупроводничких материјала. Полупроводници су материјали који постају електрично проводљиви када су осветљени или загрејани и који раде као изолатори на ниским температурама.



Слика 6. Фотонапонска ћелија, модул и панел[11]

Једна фотонапонска ћелија (слика 6) производи напон од свега 0,6V уз густину струје око 20 mA/cm². Треба нагласити да је снага коју производи једна фотонапонска ћелија релативно мала, у пракси се више ћелија повезује (редно, паралелно и комбиновано) и спаја у блокове који се називају фотонапонски модули. На овај начин се постиже струја, напон и снага већег интензитета. У циљу добијања још већих снага, модули се слажу један до другог у фотонапонске панеле чије снаге иду и до реда MW, а панели заједно с осталим потребним елементима (претварачима, регулаторима, акумулаторима и сл.) чине фотонапонски систем.

Основни елемент у сваком фотонапонском систему је соларни панел. Соларни панели се састоје од великог броја фотонапонских ћелија. Њихова основна карактеристика је дугачак период експлоатације, велики степен ефикасности али и велика отпорност на атмосферске појаве. Снага сваког соларног панела се повећава са смањењем температуре и обратно [11].

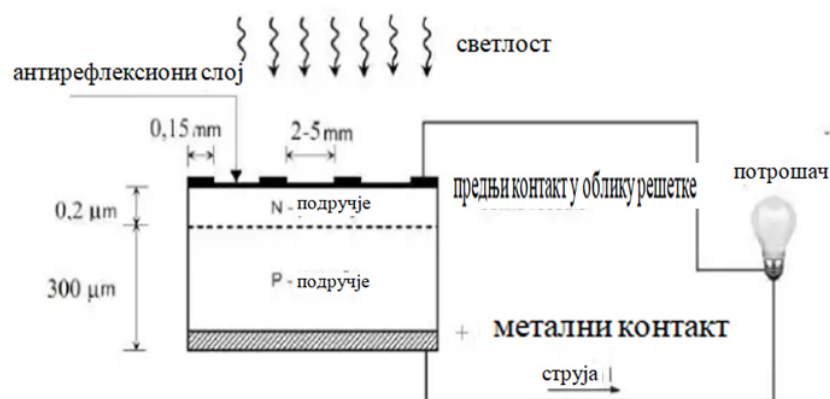
4.1.2 Принцип рада фотонапонских ћелија

Фотонапонска ћелија је полупроводничка диода у чијој основи је р-п спој, који настаје када се једном делу кристала чистог, четверовалентног силицијума, додају тровалентне (акцепторске) примесе, тако настаје р-тип полупроводника, а на другом делу петовалентне (донорске) примесе, настаје п-тип полупроводника. Дакле, р-п спој ради као диода, и пропушта струју само у једном смеру. Ако се на р-п спој прикључи извор напона у пропусном смеру, тако да је позитиван пол на р страни, а негативан на п страни, на граници између та два подручја, настаје дифузија електрона из п подручја према р подручју и шупљина из р подручја према п подручју. Струја у силицијумској соларној ћелији приказана је на слици 7.

На површини плочице р-типа силицијума су дифундиране примесе, нпр. фосфор, тако да на танком површинском слоју настаје подручје п -типа полупроводника.

Када се енергија дода чистом силицијуму, у форми топлоте на пример, то може проузроковати да се неколико електрона ослободи и напусте своје атоме. Ово се добија када атому силицијума додамо атом фосфора.

Фосфор има пет електрона у свом спољашњем слоју, за разлику од силицијума који има четири, и тако фосфор има један електрон вишка. На месту тих ослобођених атома остаје празно место за сваки ослобођени електрон. Познато је да је чист силицијум слаб проводник електричне енергије, зато што нема слободних електрона да се крећу. На месту тих ослобођених атома остаје празно место за сваки ослобођени електрон. Ови електрони, који се називају слободним носиоцем наелектрисања, лутају наоколо насумично кроз кристалну решетку тражећи друго празно место које ће да попуне и тако пренесу електричну енергију. Међутим, у чистом силицијуму постоји јако мали број тих празних места, тако да ови електрони преносиоци не могу да буду ефикасни [12].



Слика 7. Кретање наелектрисања у силицијумској соларној ћелији [13]

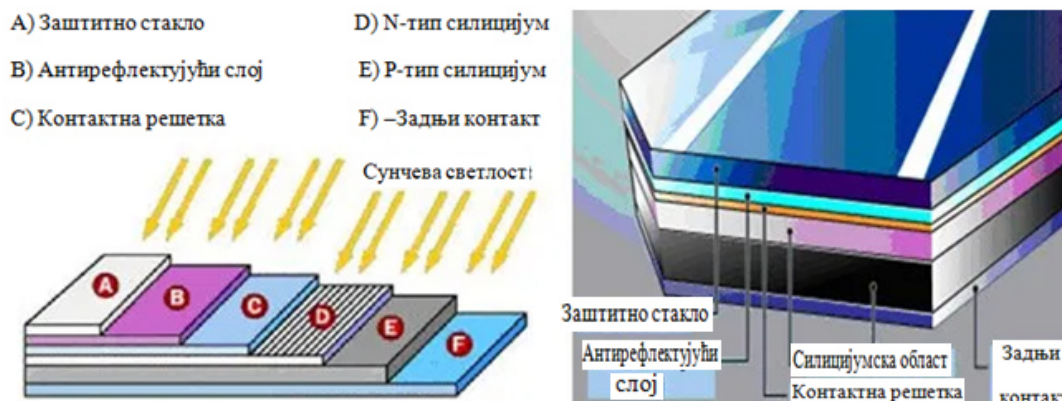
Захваљујући својим хемијским својствима силицијум има много погодности поготово када се налази у кристалној форми, тако се кристална структура испоставила као јако битна за ову врсту фотонапонских ћелија.

4.1.3 Структура фотонапонске соларне ћелије

Преко 95% свих соларних ћелија произведених на свету направљене су од силицијума. Као други најчешћи елемент на земљиној површини, силицијум има предност што је доступан у довољним количинама и не утиче на околину. Стандардне силицијумске фотонапонске ћелије су дебљине реда 200-500 μm [14].

Попречни пресек једне силицијумске соларне ћелије, ма ког типа приказана је на слици 8. Први слој чини заштитно стакло тј. SiO_2 , које штити ћелију од спољашњих утицаја. Испод је антирефлектујући слој који смањује рефлексију светлости и обезбеђује да што више енергије доспе до полупроводника, служи да се повећа степен искоришћења соларне ћелије. Затим се налази систем транспарентних електрода, ТЦО.

Оне стварају контакт са p-n спојем у коме се врши сакупљање фотона Сунчеве светлости. Са доње стране је метализација односно задњи контакт.



Слика 8. Структура фотонапонске ћелије [15]

Максимални излазни напон једне соларне ћелије се креће у опсегу 600-700 mV, па се ћелије серијски повезују како би се добио жељени напон. Као би створили напон од 12V, потребно је повезати око 36 ћелија. Снага једне фотонапонске ћелије је релативно мала па се у пракси више ћелија повезују у групе.

4.2 Технологија фотонапонских ћелија

Соларне технологије користе сунчеву енергију и светлост у циљу производње топлоте, осветљења или електричне енергије. Силицијум је водећи материјал у технологији фотонапонских соларних ћелија због своје високе ефикасности. Соларне фотонапонске ћелије могу бити израђене од разних типова полупроводничких материјала, који могу бити сложени у различите структуре с циљем постизања што веће ефикасности. Истраживања о соларним ћелијама почело је 1960. године, са напретком технологије, последње две деценије развијене су нове врсте фотонапонских ћелија и могу се поделити у три велике групе:

1. група – силицијумске фотонапонске ћелије,
2. група – халкогене фотонапонске ћелије,
3. група – фотонапонске ћелије треће генерације.

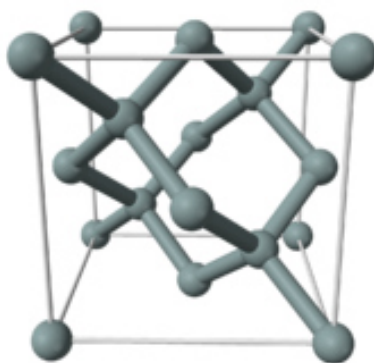
4.2.1 Силицијумске фотонапонске ћелије

Силицијум је после кисеоника најзаступљенији елемент у земљиној кори, лако се добија и прерађује, није токсичан и не гради једињења која су штетна по околину. У савременој индустрији електронске компоненте од силицијума су издрживе чак и до 200°C. Класична силицијумска фотонапонска ћелија има димензије 10x10cm. Силицијумске фотонапонске ћелије могу се поделити у 3 основне групе и то [16]:

- монокристалне силицијумске ћелије,
- поликристалне силицијумске ћелије,
- фотонапонске ћелије израђене од аморфног силицијума.

4.2.1.1 Монокристалне силицијумске ћелије.

Атоми монокристалног силицијума међусобно су повезани ковалентним везама у површински центрирану кубну решетку (слика 9). Растојања између најближих атома у решетки монокристалног силицијума износе $0,543 \text{ }\mu\text{m}$ и $0,235 \text{ }\mu\text{m}$.



Слика 9. Кубна решетка монокристалног силицијума

Фотонапонске ћелије израђене од монокристалног силицијума имају тзв. једнолику структуру, што значи да се састоје од истог материјала који је модификован тако да је на једној страни ћелије р-слој, а на другој n-слој Si полупроводника. Унутар ћелије, р-n спој је лоциран тако да се максимум Сунчевог зрачења апсорбује близу споја. За производњу монокристалних Si ћелија користи се апсолутно чисти полупроводнички материјал. Монокристалне силицијске ћелије могу претворити 1000 W/m^2 сунчевог зрачења у 140 W електричне енергије са површином ћелија од 1 m^2 . Монокристалне ћелије имају одсечене ивице (слика 10) да би се лакше могле сместити на соларне модуле [17].

Овако се може и наочиглед уочити разлика између моно и поликристалне ћелије, на основу тога што поликристална ћелија има облик квадрата, а монокристална ћелија је осмокрака.

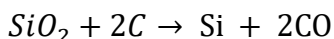


Слика 10. Приказ соларног панела изграђеног од монокристалних ћелија [17]

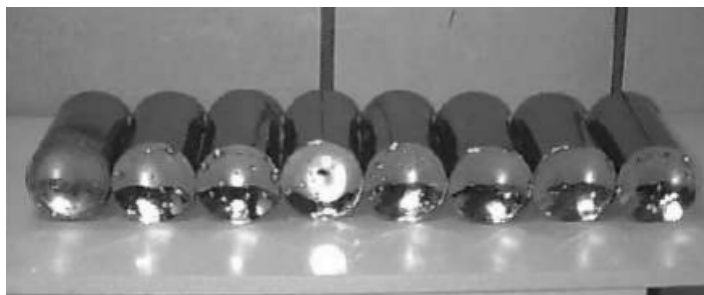
Монокристални соларни панели имају највећу ефикасност, с обзиром да су направљени од силицијума високог квалитета. Ефикасност панела износи од 18 - 23,5%. Технологија производње соларних ћелија од монокристалног силицијума је нешто скупља од осталих јер захтева компликовану производњу монокристалног силицијума. Имају дуг животни век, тако да већина произвођача монокристалних соларних панела даје гаранцију од 25 година. Монокристални соларни панели раде боље при ниском осветљењу од панела исте снаге направљених од поликристалног силицијума [18].

4.2.1.2 Поликристалне силицијумске ћелије

Поликристални силицијум се добија од кварцног песка SiO_2 , редукцијом угљеника на високој температури (1500-1750 $^{\circ}\text{C}$), чиме се добија Si чистоће 99% (2N^2).



Полупроводнички силицијум високе чистоће производи се у виду гранула или штапова (ингота) као што је приказано на слици 11. Инготи могу бити различитих пречника у распону 20-200 mm и различитих дужине 0,5-1m, добијају се вишеструком фракционом дестилацијом и термичким разлагањем SiHCl_3 на 1200 $^{\circ}\text{C}$.



Слика 11. Инготи силицијума пречника 140 mm

Први соларни панел на поликристалном силицијуму, који је такође познат као полисилицијум (p-Si) појавили су се на тржишту 1981. године. Сирови силицијум се

топи, а потом сипа у одговарајући квадратни калуп, где се хлади, а затим сече на одговарајуће димензије. Због оваквог процеса израде, њихова цена је нижа од монокристалних панела [19].

На слици 12 дат је приказ поликристалног силицијумског панела. Процес производње ћелија од поликристалног силицијума знатно је јефтинији од процеса производње монокристалних ћелија. Ћелије од поликристалног силицијума имају нижу ефикасност. Теоријска ефикасност им је око 14-18%, а стварна између 12 и 16%.



Слика 12. Приказ соларног панела израђеног од поликристалног силицијума [20]

Модули са соларним ћелијама од поликристалног силицијума су различитих нијанси плавих и сивих боја. Животни век соларних ћелија од поликристалног силицијума је око 20 година.

4.2.1.3 Фотонапонске ћелије од аморфног силицијума

Предности аморфног силицијума (слика 13) за израду соларних ћелија у односу на монокристални силицијум, да аморфни силицијум има већи коефицијент апсорпције сунчевог зрачења од монокристалног силицијума и потребна је знатно мања количина материја у односу на монокристални силицијум.



Слика 13. Аморфна фотонапонска ћелија [21]

Поред тога аморфни силицијум је могуће произвести на ниским температурама и може бити машински положен на јефтине подлоге (пластика, стакло, метал и слично) што га чини идеалним за интегрисање у соларну технологију у распону од објеката великих димензија као што су кровови, зидови и слично, до производа широке потрошње. Прва комерцијална а-Si соларна ћелија појавила се 1980. године и имала је ефикасност од 3%.

Недостаци соларних ћелија од аморфног силицијума у односу на соларне ћелије од монокристалног и поликристалног силицијума су те да а-Si соларне ћелије имају мању ефикасност (5%-7%) у односу на ефикасност поликристалних и монокристалних соларних ћелија. Приликом осветљења у дужем временском периоду долази до извесне деградације оптичких и електричних карактеристика а-Si соларних ћелија [21] .

4.2.2 Галијум-арсенид фотонапонске ћелије

Галијум - арсенид (GaAs) представља идеалан материјал за формирање соларних ћелија и представља полупроводничку форму галијума и арсена. GaAs соларне ћелије се производе од монокристалног и поликристалног GaAs. Кристална структура GaAs слична је кристалној структури силицијума.

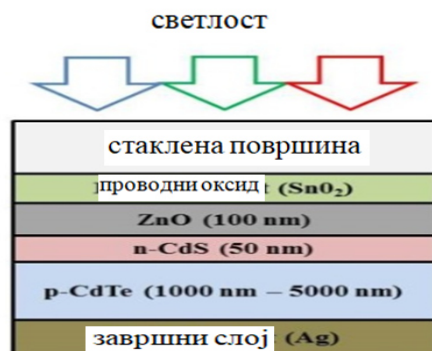
GaAs се упофребљава за израду електронских компоненти на основу чега су произведене соларне ћелије ефикасности око 25%. Пошто су галијум - арсенид ћелије термостабилне често се користе код фотонапонских система са концентраторима зрачења. Ефикасност GaAs соларне ћелије може бити повећана поступком легирања са неким материјалима као што је алуминијум, фосфор, антимон.

Највећа мана Ga-As фотонапонских ћелија је висока цена монокристалних Ga-As слојева. Због тога се Ga-As ћелије претежно користе у концентраторским системима, где је површина ћелије свега $0,25 \text{ cm}^2$. Теоријска ефикасност таквих ћелија је 28%, док је стварна ефикасност 17%. Велика токсичност телура и његове ограничене природне резерве умањују перспективе развоја и примене ових ћелија [22].

4.2.2.1 Кадмијум телурид фотонапонске ћелије

Кадмиј телурид (CdTe) су танкослојне соларне ћелије имају мање трошкове производње и већу ефикасност ћелије од других танкослојних технологија. Ова комбинација чини CdTe танкослојне ћелије најјекономичнијом тренутно доступном танкослојном технологијом, са трошковима испод 0,75 \$/W. Две главне сировине су кадмијум и телурид [23].

Активни слојеви CdTe соларне ћелије наносе се на стакло са провидним проводљивим оксидом (нпр. SnO_2). Ћелије са високом ефикасношћу користе врло танак хемијски слој CdS. Структура типичне соларне ћелије од CdTe приказана је на слици 14.



Слика 14. Попречни пресек CdTe споја[24]

4.2.3 Фотонапонске ћелије треће генерације

Данас се ради на побољшању карактеристика соларних ћелија и због тога су развијене ФН технологије тзв. “треће генерације”. Ове технологије имају повећану ефикасност у конверзији соларне енергије. Наноцеви, квантне тачке и НС су соларне ћелије које спадају у најновије и најсавременије технологије у производњи ФН ћелија.

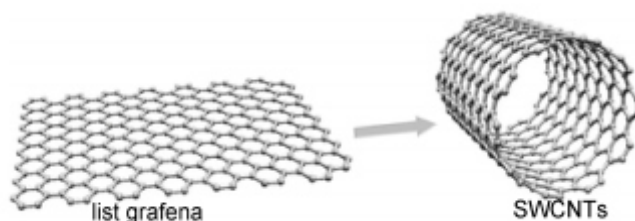
4.2.3.1 Квантне тачке (QDs)

Квантне тачке су мале честице или нанокристали једног полупроводничког материјала пречника у распону од 2-10 μm (10-50 атома). Квантне тачке су део соларне ћелије која адсорбује долазеће фотоне светлости. Коришћење полупроводничких наноструктура за соларне конверзије енергије довело је до развоја високе ефикасности соларних ћелија. Квантна ефикасност означава проток броја електрона кроз струјно коло у соларној ћелији током једне секунде, који се дели са бројем фотона улазне енергије [25].

4.2.3.2 Наноцеви (CNT)

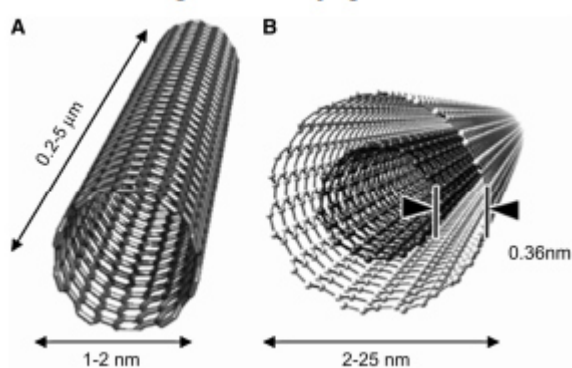
Угљеничне наноцеви (CNT) представљају јединствене једнодимензионе макромолекуле. Обзиром да захваљујући својој карактеристичној структури показују необичне особине, те да постоје могућности њихове примене у различитим областима, то је развој и унапређење метода за добијање нових материјала на бази угљеничних наноцеви од великог значаја.

Структурно, једнослојне угљеничне наноцеви (singlewalled carbon nanotubes - SWCNTs) се могу сматрати „увијеним“ листом графена (лист графита дебљине једног атома), као што је приказано на слици 15.



Слика 15. Увијање листа графена којим настаје једнослојна угљенична наноцев [25]

Наиме, угљеничне наноцеви могу бити добијене у два основна облика, као једнослојне угљеничне наноцеви (SWCNTs) и вишеслојне угљеничне наноцеви (MWCNTs). Једнослојне угљеничне цеви као што и сама реч каже састоје од једне графенске цеви, док се MWCNTs састоје од неколико концентричних цеви графена смештених једна унутар друге, као што је приказано на слици 16. Ефикасност ових соларних ћелија је још увек мала, од 3-4% па се још увек обављају бројна истраживања у циљу њеног повећања [20].



Слика 16. Основни облици структуре наноцеви: (а) једнослојна угљенична наноцев, (б) вишеслојна угљенична наноцев[25]

5. Подела фотонапонских системи

Подела соларних фотонапонских системи може се извршити на две основне целине: фотонапонски системи који нису прикључени на електро-дистрибутивну мрежу (енгл. off-grid) и фотонапонски системи који су прикључени на јавну електро-дистрибутивну мрежу (енгл. on-grid).

5.1. Фотонапонски системи који нису прикључени на мрежу (Off-grid)

Ови системи раде самостално, независно, у поређењу са системом који мора бити прикључен на јавну електричну мрежу. Off-Grid систем је погодан за напајање енергијом објекте до којих је немогуће или јако тешко допремити дистрибутивни систем, тј. не постоји јавна електрична мрежа.

Основне компоненте Off-Grid система су [26]:

- фотонапонски панели,
- електроника за пуњење акумулатора,
- акумулатор,
- инвертор/исправљач.



Слика 17. Шематски приказ фотонапонског система за снабдевање потрошача електричном енергијом који нису повезани на електродистрибутивну мрежу[26]

Фотонапонски панел генерише електричну енергију током дана, која се складишти у акумулатор. Из акумулатора се електрична енергија по потреби обезбеђује потрошачима и може се трошити на различите начине. Када су у питању мањи системи или уређаји није обавезно постојање регулатора и такви системи раде на 12 или 24 V напона.

У домаћинствима употреба наизменичних фотонапонских система поједностављује повезивање са електричном инсталацијом, омогућава коришћење јефтинијих прекидача

и осталих елемената. Ако се користе традиционалне утичнице за потрошњу, мора се обезбедити напон од 220V. За ово је већ потребан претварач/инвертер. Многи електрични апарати морају да добијају синусоидни напон, иначе може доћи до њиховог кvara [26].

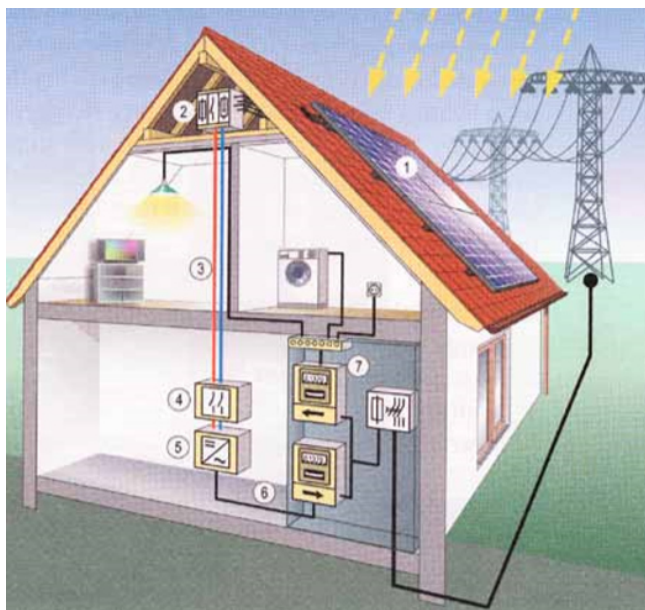
5.2 Мрежно спојени ФН системи (On-Grid)

Када је реч о мрежно повезаним ФН системима, фотонапонски модул је повезан на дистрибутивну мрежу. Енергија која се генерише у току дана може се користити одмах, или продавати електричној мрежи као вишак. Соларни систем у току ноћи не може да обезбеђује енергију, и тада се користи енергија из мреже (енергија се враћа из електричне мреже). У овом случају ФН систем не захтева батерију за складиштење енергије, зато што се електрична мрежа понаша као батерија за складиштење.

Обезбеђују нормално снабдевање електричне енергије независно од доба дана, годишњег доба и климатских услова. Овакав систем захтева додатне уговоре са агенцијом за дистрибуцију електричне енергије и може у многome убрзати период отплате циелог фотонапонског система.

Компоненте фотонапонског система (слика 18) прикљученог на јавну електроенергетску мрежу преко кућне инсталације су:

1. фотонапонски модули
2. спојна кутија са заштитном опремом
3. каблови једносмерног развода
4. главна склопка за одвајање
5. измењивач dc/ac
6. каблови наизменичног развода
7. бројил електричне енергије



Слика 18. Шематски приказ фотонапонског система за снабдевање потрошача електричном енергијом који су повезани на електродистрибутивну мрежу[27]

Фотонапонски модули производе једносмерну струју. Сви каблови који долазе од низова фотонапонских модула уводе се у разделни ормарић модула. Преко главне склопке за одвајање једносмерна струја се шаље према соларним измењивачима. Соларни измењивачи претварају једносмерну струју соларних модула у наизменичну струју. Настала наизменична струја преноси се преко наизменичног развода до кућног прикључка на електроенергетску мрежу, односно електричног ормарића, где су смештена бројила електричне енергије. Бројила електричне енергије региструју произведену енергију која се предаје електродистрибутивној мрежи и потрошену енергију преузету од мреже.

Снага On-Grid система креће се од неколико стотина W до неколико MW снаге. За домаћинства се најчешће изграђују системи од 3 до 8 kWh снаге. Са овим системима може се у потпуности задовољити употреба електричне енергије у домаћинствима. Малим и средњим фирмама, предузећима се препоручује On-Grid соларни систем од 10 до 50 kW снаге, а великим потрошачима, погонима, великим робним кућама соларни капацитети већи од 50 kW.

Једна од најважнијих ставки приликом пројектовања соларног система On-Grid јесте прилагођавање потрошњи електричне енергије на месечном или годишњем нивоу. Потрошња електричне енергије се најчешће и најлакше одређује из рачуна за електричну енергију.

На основу досадашњег искуства код On-Grid соларних система на подручју Србије и околних земаља, систем снаге 1 kWh годишње произведе од 1150 до 1250 kWh електричне енергије [27].

6. Моделирање и симулација фотонапонских панела у софтверу EnergyPlus

У овом поглављу објашњен је поступак моделирања фотонапонских панела у софтверу EnergyPlus за инсталиране системе на објекту помоћу којих се генерише енергија. Представљени су математички модели фотонапонског система за генерисање електричне енергије који је повезан на електро-дистрибутивну мрежу.

Energy Plus је симулацијски програм који комбинује најбоље могућности и карактеристике два програма и то BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) и DOE-2,. EnergyPlus обухвата потпуно нови принцип рада и код који је написан у програму Фортран 90. Ова два програма су развијена и поново коришћење је започето 70-их и 1980-их година прошлог века.

Циљна група за коришћење и рад у оваквом програму били су првенствено инжењери, архитекте, како би се на правилан начин дизајнирала опрема за грејање, климатизацију и вентилацију која ће се користити за израду студије животног циклуса зграда.

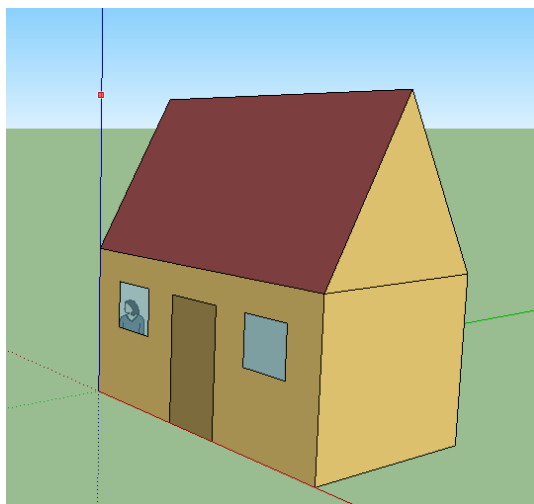
Са развојем технологије, унапређен је и испрограмиран јединствен софтвер који се и данас користи са различитим верзијама овог основног програма под називом Energy Plus. Многе од карактеристика симулације су преузете из програма BLAST и DOE-2.

Програм Energy Plus има могућност израчунавања топлотног оптерећења и/или енергије која се потроши за један дан или дужи временски период (укључујући и преко годину дана). Energy Plus има могућност коришћења података о времену за локацију зграде. Програм садржи преко 2000 локација, које су смештене у посебним датотекама које се аутоматски читавају.

Ниједан програм није у могућности да сам изврши сваку могућу симулацију реалних ситуација. Тако и EnergyPlus даје могућност пројектовања система за грејање, хлађење и климатизацију директно или индиректно кроз линкове ка другим програмима, што олакшава рад у програму и повезивање са другим програмима, како би се жељени пројекат обавио на најбољи могући начин [28].

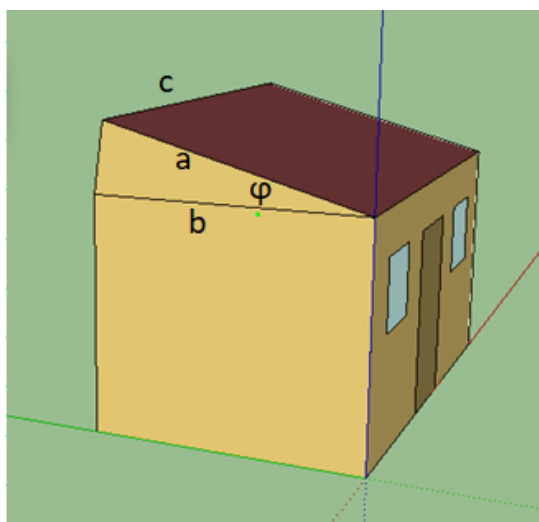
6.1 Модел анализиране куће

Модел куће који је дат у дипломском раду намењен је за становање. Стамбени објект (слика 19) се налази на брдовитом пределу, у ширем центру града. Основа објекта је у облику правилне геометријске фигуре (правоугаоник). Димензије основе објекта су: $5 \times 3 \text{ m}$, док је висина објекта $2,6 \text{ m}$. Површина објекта износи 15 m^2 . Стаклене површине (прозори) на објекту се налазе са источне стране и њихова укупна површина је $1,28 \text{ m}^2$, са исте стране налазе се и улазна врата чије су димензије $2,1 \times 1 \text{ m}$.



Слика 19. Изометријски поглед објекта који је нацртан у програму Google SketchUp

Анализирани објекат састоји се од 1 зоне, односно 1 просторије и крова. Кров је оријентисан ка југу, због максималног генерисања енергије. Истраживања су вршена на посматраном објекту (слика 20) чија је површина крова 15 m^2 .



Слика 20. Изометријски поглед угла крова

Треба напоменути да је симулација за сва 3 модела фотонапонских система рађена на основу промене угла крова у распону од (0° - 60°) са кораком од 5° . Лако се са слике 28. може уочити троугао са страницом a (хипотенуза) и страниом b (катета). Угао φ изражен је у степенима ($^\circ$).

Табела 2. Сценарио симулације

Сценарио симулације	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$a[\text{m}]$	$a=3 \text{ m}$												
$b[\text{m}]$	$b=3 \text{ m}$												
$c[\text{m}]$	$c=5 \text{ m}$												
$\varphi [^\circ]$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60

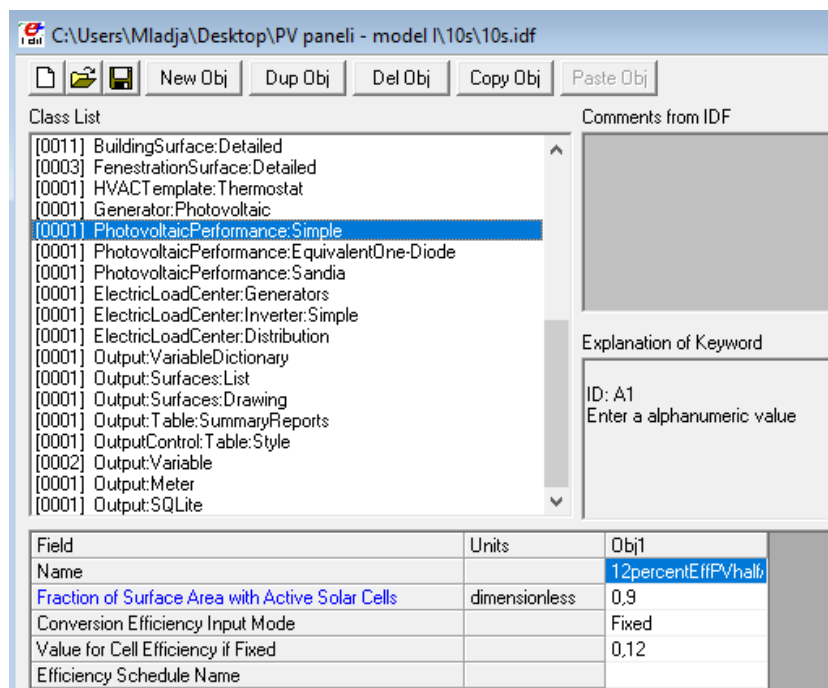
6.2 Математички модел фотонапонског система

Програм који је коришћен за симулацију различитих врста фотонапонских система је унапређена верзија софтвера EnergyPlusV8-7-0. Фотонапонски системи постављени су на кров стамбеног објекта који је разматран у раду. Затим су представљени математички модели фотонапонског система који ће бити нешто касније објашњени. За израчунавање електричне енергије коју произведу фотонапонски панели, конверзијом сунчеве енергије у електричну, користи се софтвер Energy plus.

Софтверски пакет EnergyPlus има различите опције за прорачун количине електричне енергије која се генерише фотонапонским системима. Три различита типа фотонапонских модула су уграђена у сам софтвер и то “Simple”, “Equivalent One-Diode” и “Sandia” модел. Избор модела одређује и математички модел који се користи за одређивање количине генерисане електричне енергије. Циљ рада је да се упореди количина генерисане електричне енергије за различите врсте фотонапонских система, при истим параметрима симулације.

6.2.1 “Simple” модел фотонапонских панела

У истраживањима приказаним у овом раду коришћен је “Simple” модел фотонапонских панела који омогућава кориснику програма да сам мења хелијску ефикасност. Simple модел је најједноставнији модел за предвиђање фотонапонске производње електричне енергије. У овом моделу корисник одређује ефикасност соларног панела за конверзију соларног зрачење у електричну енергију (слика 21). Користи се потпуни геометријски модел сунчевог зрачења, укључујући и сенчење и рефлексију, како би се утврдио учинак соларних ресурса. Овај модел прихвата произвољне вредности ефикасности конверзије и не захтева да стварне производне јединице буду тестиране за добијање емпиријских коефицијената учинка. Основна претпоставка је да фотонапонски модули увек раде када је укупно зрачење сунчеве енергије веће од 0,3 W [29].



Слика 21. „ Simple“ фотонапонски модел у софтверу EnergyPlus

Уколико је Сунчево зрачење мање од 0,3 W, модули нису у стању да производе никакву енергију. Корисна електрична енергија произведена од стране фотонапонских система рачуна се на следећи начин:

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

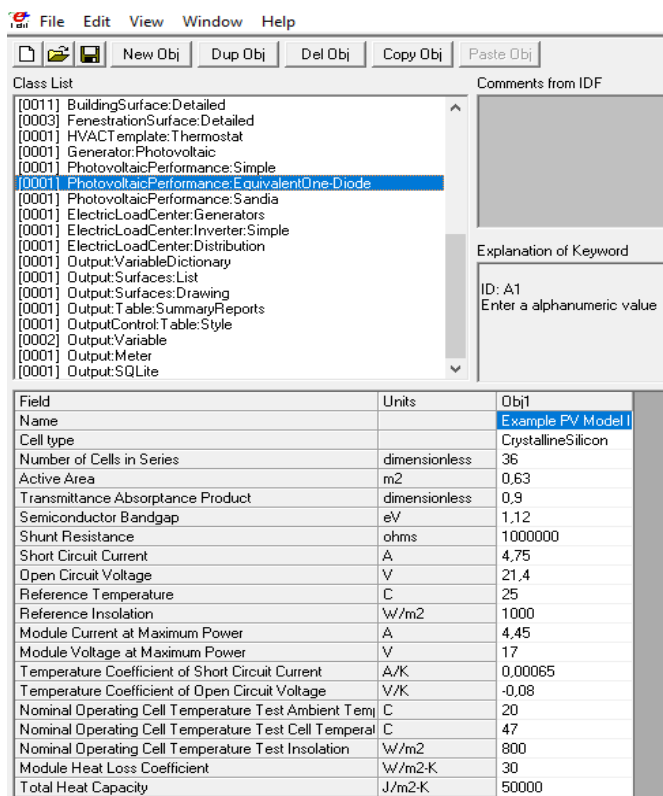
На основу овог израза, са десне стране ове једначине, само G_T је константа израчуната од стране EnergyPlusa, а остале остале вредности уноси сам корисник.

Табела 3. Приказ ознака са мерним јединицама

Ознака	Назив	Мерна јединица
P	снага електричне енергије произведене ФН панелом	W
A_{surf}	укупна површина ФН панела	m^2
f_{activ}	део површине ФН панела са активним соларним ћелијама	-
G_T	укупно соларно зрачење на ФН систему	W/m^2
η_{cell}	ћелијска ефикасност ФН панела	-
η_{invert}	ефикасност конверзије једносмерне у наизменичну струју	-

6.2.2 „Equivalent One-Diode” -Еквивалентни једно-диодни модел

„Equivalent One-Diode“ модел (слика 22) предвиђа електричне перформансе фотонапонских низова. Овај модел је такође познат као "TRNSYS PV" модел. Струјно 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, као и од температуре.



Слика 22. „Equivalent One-Diode“ фотонапонски модел у софтверу EnergyPlus

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 колико рефлексије 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, струју кратког споја, као и да ли су електрична оптерећења испуњена или нису задовољена.

6.2.2.1 Четворопараметарски модел

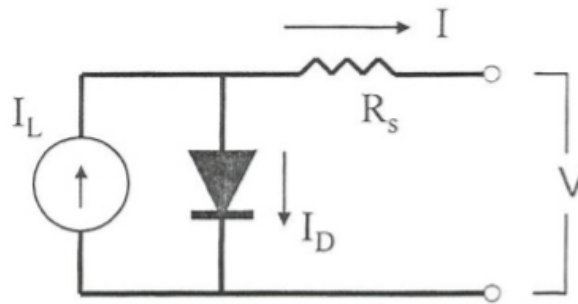
Еквивалентни четворопараметарски модел је развијен у великој мери од стране Townsenda [1989] и разрађен од стране Duffiea и Beckmana [1991]. Овај модел је први

пут укључен у компоненте TRNSYS симулационог пакета од стране Eckstein [1990]. EnergyPlus модул користи Eckstein-ов модел за кристалне фотонапонске модуле, при чему у четворопараметарском моделу претпоставља 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 $I_{L,ref}$, $I_{o,ref}$, γ , и R_s и P_c . Ово су емпиријске вредности које се не могу директно утврдити физичким мерењем. EnergyPlus модел ове вредности израчунава из података из каталога произвођача [29].

Четворопараметарско еквивалентно коло је приказано на следећој слици 23:



Слика 23. Еквивалентно коло у четворопараметарском моделу

V је напон, I је струја која протиче кроз еквивалентно струјно коло. Помоћу модела одређује се излазна струја у функцији напона. Модел аутоматски израчунава параметарске вредности из доступних података (струја кратког споја, напон празног хода, струја при максималној снази итд).

Струјно-напонске карактеристике фотонапонски система се мењају са излагањем Сунцу и променом температуре. Фотонапонски модел укључује ове услове околине, уз четири константе модула $I_{L,ref}$, $I_{o,ref}$, γ , и R_s и генерише струјно-напонску криву за сваки временски корак. Једначина струјно-напонског кола приказаног на претходној слици гласи:

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

Општа номенклатура за Еквивалентни једно-диодни модел:

I - струја

I_o - струја обрнутог засићења

I_L -фотоструја модула

q, k -константе

γ - параметар подешавања фотонапонске криве

V -напон

R_s -отпорност струје модула

$I_{o,ref}$ -Струја обрнутог засићења диоде при референтним условима

V_{oc} -Напон отвореног кола

$V_{mp,ref}$ -Напон у тачки максималне снаге дуж струјно-напонске криве, референтни услови

$I_{sc,ref}$ -Струја кратког споја при референтним условим

Фотоструја I_L , линеарно зависи од упадног зрачења:

$$I_L = I_{l,ref} \frac{G_T}{G_{t,ref}} \quad (2)$$

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

$$\frac{I_o}{I_{o,ref}} = \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}} \right)^3 \quad (3)$$

Једначина (1) даје тренутну струју као функцију напона. Када се I_o и I_L одреде из једначина (2) и (3), Њутнов метод се користи за израчунавање фотонапонске струје. Поред тога, итеративна рутинска претрага проналази струју (I_{mp}) и напон (V_{mp}) у тачки максималне снаге дуж струјно-напонске криве [29].

IDF спецификација за фотонапонски модел обухвата неколико вредности које се морају прочитати из каталога произвођача фотонапонског модула. Ове вредности се користе за одређивање еквивалентних карактеристика $I_{L,ref}$, $I_{o,ref}$, γ и R_s .

Ове карактеристике дефинишу еквивалентно коло које се користи за тражење фотонапонских карактеристика у сваком временском кораку, као што је описано раније.

Три од ових вредности, $I_{L,ref}$, $I_{o,ref}$, γ и R_s , могу се алгебарски израчунати. Први корак је да се замени струја и напон у једначини (2) за отворено коло кратког споја, за услове максималне снаге:

$$0 = I_{L,ref} - I_{o,ref} \left[\exp \left(\frac{q}{\gamma k T_{c,ref}} V_{oc,ref} \right) - 1 \right] - \frac{V_{oc,ref}}{R_{sh}} \quad (4)$$

$$I_{sc,ref} = I_{L,ref} - I_{o,ref} \left[\exp \left(\frac{q I_{sc,ref} R_s}{\gamma k T_{c,ref}} V_{oc,ref} \right) - 1 \right] - \frac{I_{sc,ref}}{R_{sh}} \quad (5)$$

$$I_{mp,ref} = I_{L,ref} - I_{o,ref} \left[\exp \left(\frac{q}{\gamma k T_{c,ref}} (V_{mp,ref} + I_{mp,ref} R_s) \right) - 1 \right] - \frac{V_{mp,ref} + I_{mp,ref} R_s}{R_{sh}} \quad (6)$$

У сваком случају "-1", може се испустити да би се поједноставило рачунање. Ова апроксимација има мали утицај на десној страни једначине јер због величина I_o је веома мали, углавном реда величина 10^{-6} А. Нека преуређивања су онда неопходна како би се добила следећа три израза: $I_{L,ref}$, $I_{o,ref}$, γ .

$$I_{L,ref} \approx I_{sc,ref} \quad (7)$$

$$\gamma = \frac{q(V_{mp,ref} - V_{oc,ref} + I_{mp,ref} R_s)}{k T_{c,ref} \ln \left(1 - \frac{I_{mp,ref}}{I_{sc,ref}} \right)} \quad (8)$$

$$I_{o,ref} = \frac{I_{sc,ref}}{\exp \left(\frac{q V_{oc,ref}}{\gamma k T_{c,ref}} \right)} \quad (9)$$

У овом тренутку потребна је додатна једначина како би се утврдио последњи непознати параметар. Узимајући аналитички извод напона у односу на температуру на референтном отвореном колу произилази четврта једначина. Ова аналитичка вредност је упарена са температурним коефицијентом отвореног кола, датим у каталогу:

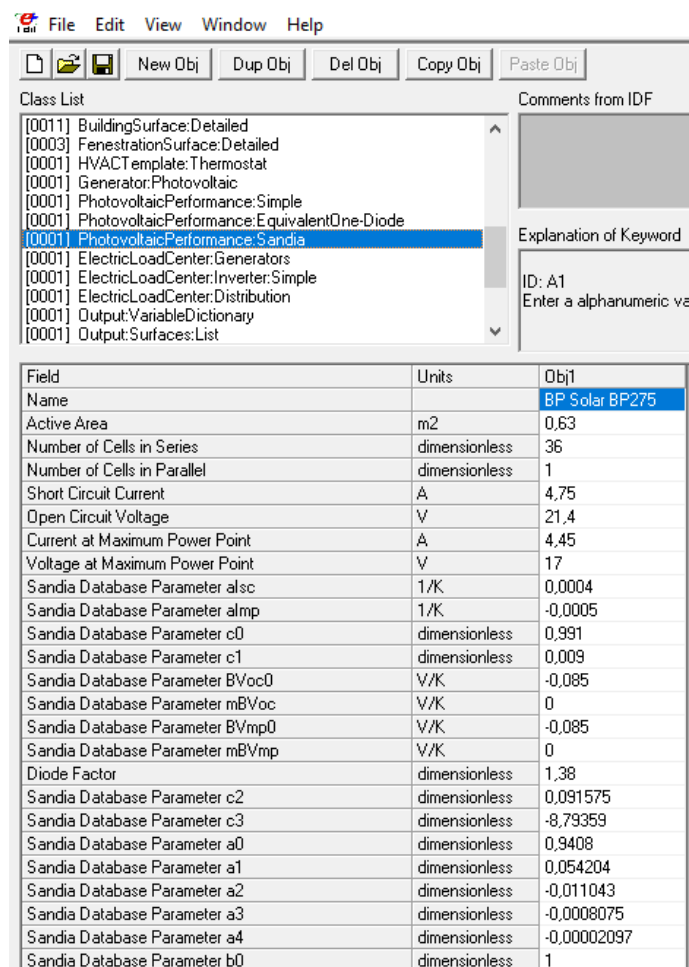
$$\frac{\partial V_{oc}}{\partial T_c} = \mu_{voc} = \frac{\gamma k}{q} \left[\ln \left(\frac{I_{sc,ref}}{I_{o,ref}} \right) + \frac{T_c \mu_{isc}}{I_{sc,ref}} - \left(3 + \frac{q \varepsilon}{A k T_{c,ref}} \right) \right] \quad (10)$$

где је:

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

6.2.3 „Sandia“ фотонапонски модел

Трећи фотонапонски модел доступан у EnergyPlusу за предвиђање генерисања електричне енергије преко фотонапонских панела назива се „Sandia“ модел (слика 24) и базира се на истраживањима у лабораторији Sandia National. Модел се састоји од низа емпиријских односа са коефицијентима изведеним из експерименталних тестова.



Слика 24. „Sandia“ фотонапонски модел у софтверу EnergyPlus

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 Sandia у FORTRAN77 као прилагођени тип (Type101) за TRNSIS компјутерски програм.

Када су коефицијенти за одређени модул на располагању, јасна је ствар да се користе једначине модела за израчунавање пет изабраних тачака на струјно напонској кривој.

Тренутна имплементација у EnergyPlusу фокусира се на утврђивању наступа у тачки максималне снаге, али и израчунава, и даје извештај четири тачке на струјно-напонској кривој тако да су подаци доступни за анализу изван EnergyPlusа [29].

Постоји неколико климатских улаза у модел којима се управља на другом месту у EnergyPlus-у укључујући: температуру сувог термометра, тачку росе, релативну влажност, атмосферски притисак, директно нормално зрачење, дифузно хоризонтално зрачење, облачност, смер ветра, брзину ветра и надморску висину.

Следећа једначине описују „Sandia“ модел. Једначине испод користе параметре модула који су доступни у бази података прибављених од Националне лабораторије „Sandia“ (види www.sandia.gov/pv).

$$I_{sc} = I_{sco} \times f_1(AM_a) \times \{(E_b \times f_2(AOI) + f_d \times F_{diff})/E_o\} \times \{1 + \alpha_{isc} \times (T_c - T_o)\} \quad (11)$$

$$I_{mp} = I_{mpo} \times \{C_o \times E_e + C_1 \times E_e^2\} \times \{1 + \alpha_{imp} \times (T_c - T_o)\} \quad (12)$$

$$V_{oc} = V_{oco} + N_s \times \delta(T_c) \times \ln(E_e) + C_3 \times N_3 \times \{\delta(T_c) \times \ln(E_e)\} + \beta_{vmp} \times (E_e) \times (T_c - T_o) \quad (13)$$

$$P_{mp} = I_{mp} \times V_{mp} \quad (14)$$

$$I_x = I_{xo} \times \{C_4 \times E_e + C_5 \times E_e^2\} \times \{1 + (\alpha_{isc})\} \times (T_c - T_o) \quad (15)$$

$$I_{xx} = I_{xxo} \times \{C_6 \times E_e + C_5 \times E_e^2\} \times \{1 + (\alpha_{imp})\} \times (T_c - T_o) \quad (16)$$

где је,

$$E_e = \frac{I_{sc}}{[I_{sco} \times \{1 + \alpha_{isc} \times (T_c - T_o)\}]} \quad (17)$$

$$\delta(T_c) = n \times k \times \frac{(T_c + 273.15)}{q} \quad (18)$$

$$f_1(AM_a) = a_0 + a_1 AM_a + a_2 (AM_a)^2 + a_3 (AM_a)^3 + a_4 (AM_a)^4 \quad (19)$$

$$f_{21}(AOI) = b_0 + b_1 AOI + b_2 (AOI)^2 + b_3 (AOI)^3 + b_4 (AOI)^4 + b_5 (AOI)^5 \quad (20)$$

$$\beta_{voc}(E_e) = \beta_{voco} + m_{\beta_{voc}} \times (1 - E_e) \quad (21)$$

$$\beta_{vmp}(E_e) = \beta_{vmpp} + m_{\beta_{vmp}} \times (1 - E_e) \quad (22)$$

$$T_c = E \times \{e^{a+b \times WS}\} + T_a \quad (23)$$

$$T_c = T_m + \frac{E}{E_0} \times \Delta T \quad (24)$$

Номенклатура за „Sandia“ фотонапонски модел:

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 дифузног зрачења коју користи модул

N_s -Број ћелија у серији низу ћелија модула

N_p - Број паралелних низова ћелија у модулу

k - Болцманова константа, 1.380663×10^{-23} (J/k)

q - Основно наелектрисање, 1.60218×10^{-19} (C)

T_c -Температура ћелија унутар модула ($^{\circ}\text{C}$)

E_e -'Ефективно' зрачење сунчевих зрака

E_b -Компонента директног зрачења

E_{diff} -Компонента дифузног зрачења

C_0, C_1 - Емпиријски коефицијенти који се тичу I_{mp} то E_e , $C_0 + C_1 = 1$ (оба су бездимензијска)

C_2, C_3 - Емпиријски коефицијенти који се тичу V_{mp} то E_e (C_2 - бездимензиона величина, C_3 добија се из односа $1/V$)

C_4, C_5 -Емпиријски коефицијенти који се тичу I_x то E_e , $C_4 + C_5 = 1$ (оба су бездимензијска)

C_6, C_7 -Емпиријски коефицијенти који се тичу I_{xx} то E_e , $C_6 + C_7 = 1$ (оба су бездимензијска)

n - Емпиријски одређен 'фактор диоде' за појединачне ћелије

A_{Ma} Апсолутна маса ваздуха

AOI -Соларни угао учесталости (степени)

f_1 -(A_{Ma}) Емпиријски полином који се користи да повеже струју кратког споја са спектром сунчевих зрака преко масе ваздуха

T_m -Температура ФН модула на позадинској површини ($^{\circ}\text{C}$)

T_a -Температура околине ($^{\circ}\text{C}$)

E -Зрачење на површину модула (W/m^2)

WS - Брзина ветра на стандардној висини од 10 m (m/s)

a - Емпиријски коефицијент везан за температуре модула при слабом ветру и великим зрачењем

b -Емпиријски коефицијент везан за смањење температуре модула са повећавањем брзине ветра

T_c -Температура соларних ћелија унутар модула ($^{\circ}\text{C}$)

E_o -Референтно зрачење (1000 W/m^2)

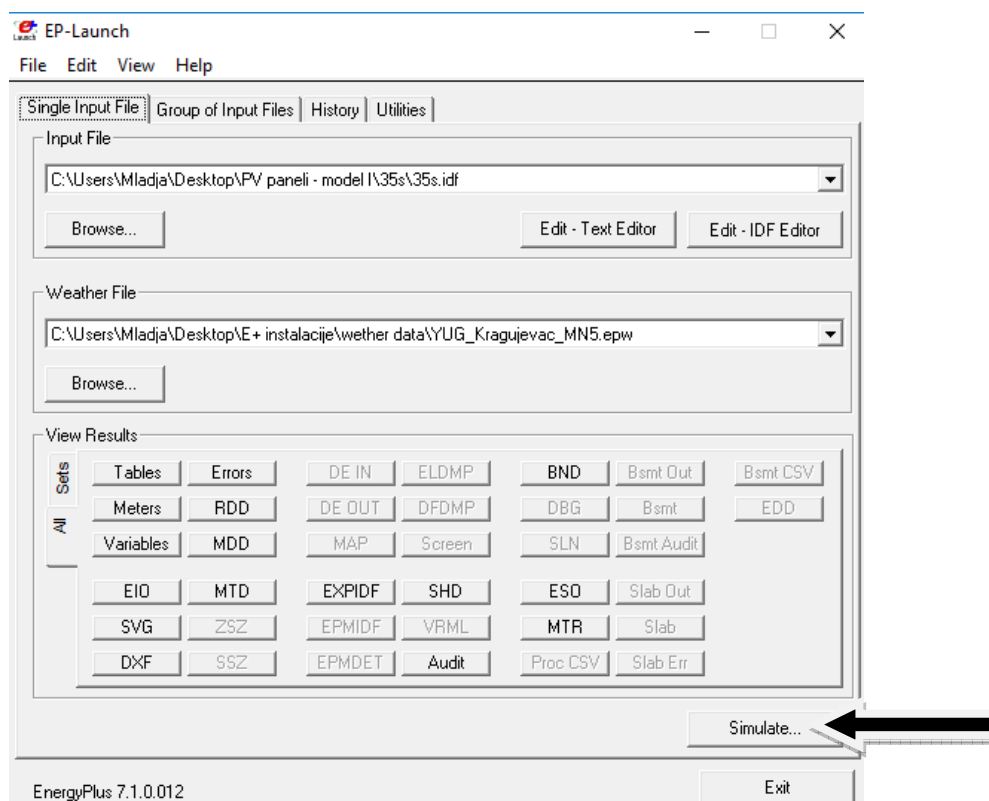
ΔT - Разлика температуре између T_c и T_m при E_o ($^{\circ}\text{C}$)

Тренутна имплементација у EnergyPlus-у фокусира се на утврђивање наступа у тачки максималне снаге, али израчунава и даје извештај четири тачке на струјно-напонској криви тако да су подаци доступни за анализу изван EnergyPlusа.

Са наведеним једначинама и претпоставком да панели делују у тачки максималне снаге, директно се одређује производња једносмерне струје. Претпоставља 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 фотонапонског генератора [29].

7. Резултати симулације

На основу модела објекта који је цртан у програму Google SketchUp са додатком Open Studio, може се приступити резултатима који су приказани графиконима. Након унетих свих параметара објекта, приступа се процесу симулирања.



Слика 25. Покретање симулације

Кликом на одговарајући тастер „Simulate“ као што је приказано на слици 25. покреће се симулација. Уколико се деси да је направљена грешка при задавању геометрије или неког од параметара, програм ће у старту пријавити грешку и направити error file. Error file је јако битан и користан, јер је у њему описано колико грешака има као и које су. Дат је детаљан опис путање места програма у којој се грешка налази и сугестија на шта треба обратити пажњу. Након тога је потребно наћи и исправити те грешке и поновити симулацију. Уколико су све грешке уклоњене, симулирање ће бити успешно, у супротном треба поновити претходни корак док се и последња грешка не исправи. Најчешће грешке које се јављају су неподударање назива који се понављају или у случају креирања грејне петље погрешно задата путања топле воде као и неправилно повезивање чворова и грана. Поред грешака програм може пријавити одређена упозорења, али она не утичу битно на симулацију која ће бити успешно изведена.

7.1 Резултати симулације "Simple" модела фотонапонских панела

"Simple" модел је најједноставнији за коришћење. Фотонапонски панел ефикасности 12 % који је фиксиран за кров није покретан. Соларни панели код посматраног модела постављени су на целој површини јужног крова објекта. У овом моделу корисник има директан приступ ефикасности, где се путем фотонапонских панела врши претварање сунчевог зрачења у електричну енергију. Приликом моделирања посматран је временски период од годину дана узимајући у обзир све месеце у току године. Угао крова је померан за вредности од по 5°. У табели 4 може се видети генерисана електрична енергија по месецима за карактеристичне углове.

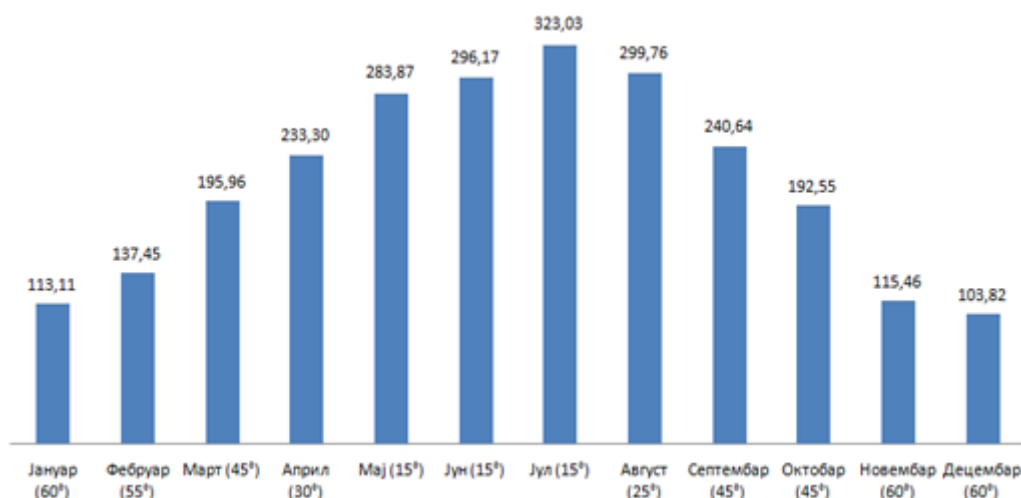
Табела 4. Генерисана електрична енергија за модел „Simple“

	Модел I - „Simple“												
угао месеца	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°
Јан.	65,07	71,81	78,12	84,39	89,90	94,88	99,30	103,19	106,53	110,08	111,18	112,48	113,11
Феб.	91,09	98,52	105,30	112,01	117,73	122,76	127,09	130,72	133,65	136,75	137,02	137,45	137,10
Мар.	159,88	167,71	174,37	180,89	185,84	189,75	192,61	194,43	195,21	195,96	193,31	190,64	186,99
Апр.	211,28	218,08	223,26	228,19	231,17	232,88	233,30	232,44	230,31	227,91	222,08	216,00	208,88
Мај.	275,38	279,73	281,95	283,87	283,41	281,49	278,07	273,18	266,84	259,94	249,96	239,42	227,92
Јун.	292,21	295,12	295,80	296,17	294,10	290,50	285,39	278,80	270,66	261,92	250,33	238,10	224,98
Јул.	315,05	319,50	321,46	323,03	321,86	318,98	314,39	308,08	300,09	291,36	279,29	266,51	252,64
Авг.	278,63	286,25	291,65	296,66	299,05	299,76	298,77	296,07	291,70	286,78	277,85	268,38	257,65
Сеп.	198,10	207,94	216,22	224,22	230,20	234,80	238,03	239,87	240,34	240,64	236,79	232,77	227,48
Окт.	135,32	145,27	154,20	162,98	170,30	176,59	181,84	186,06	189,25	192,55	192,02	191,61	190,09
Нов.	72,54	78,97	84,91	90,81	95,92	100,47	104,47	107,90	110,78	113,83	114,47	115,29	115,46
Дец.	55,04	61,54	67,67	73,78	79,22	84,18	88,64	92,62	96,11	99,82	101,22	102,83	103,82
Σ	2149,6	2230,44	2294,80	2356,99	2398,72	2427,05	2441,91	2443,34	2431,46	2417,5	2365,53	2311,49	2246,14

Жутом бојом приказане су максималне вредности генерисане енергије у току једне године по месецима. Количина генерисане енергије током године зависи од следећих фактора: географске ширине места, годишњег доба, чистоће атмосфере, облачности. Пошто се релативан однос Сунца према месту на којем је лоцираана пријемна површина мења током дана, месеца и године, неопходно је код непокретних пријемника као у нашем случају обезбедити правилну оријентацију максималне осунчане пријемне површине на основу чега је и повољнија количина генерисане енергије.

На дијаграму 1 могу се уочити максималне вредности генерисане електричне енергије за месец јул са 323,05 kWh чији је угао крова на коме су постављени фотонапонски панели 15°. Максимална вредност генерисане електричне енергије у зимском периоду за месец јануар износи 113,11 kWh са углом крова на ком су постављени фотонапонски панели 60°.

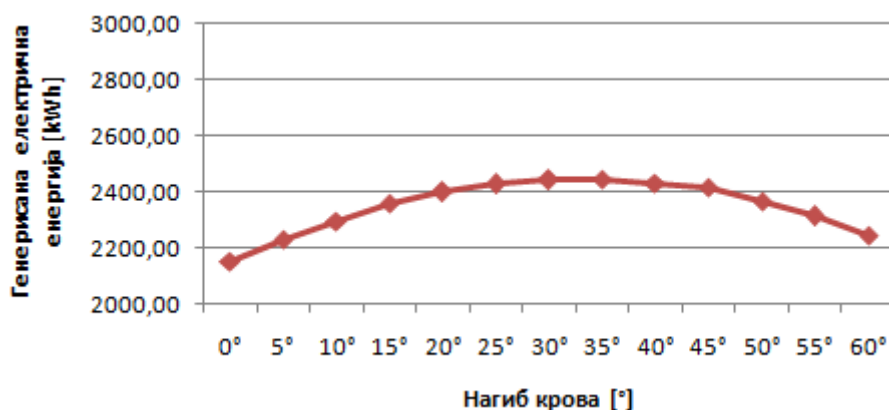
Дијаграм 1. Максимална генерисана енергија по месецима при одговарајућим угловима за модел "Simple"



Угао под којим је постављен соларни фотонапонски панел је веома битан параметар за исправно функционисање и максимално искоришћење ситема. Од угла под којим је постављен фотонапонски панел зависи проценат ефикасности самог система односно панела.

На следећем дијаграму дат је приказ промене укупне количине генерисане електричне енергије на годишњем нивоу у зависности од угла нагиба крова (панела). Лако се може уочити да је најповољнији угао постављања крова у нашим климатским условима од 30-40°.

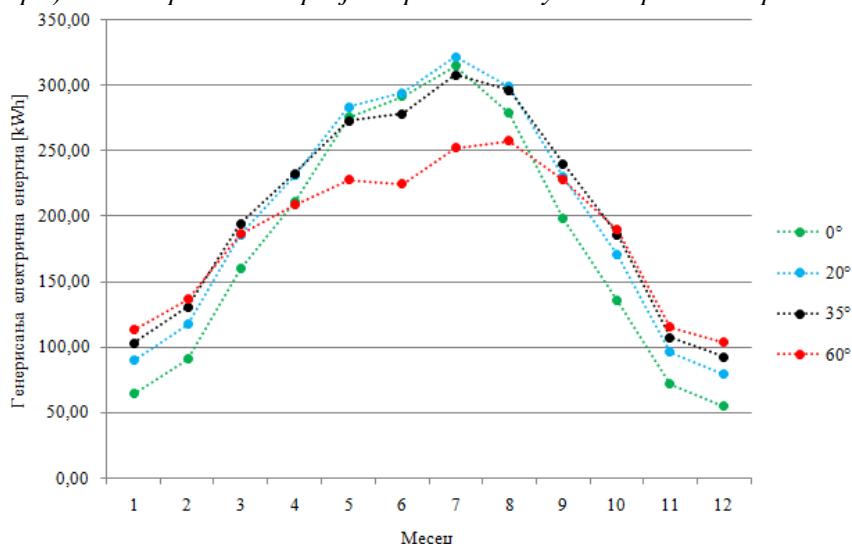
Дијаграм 2. Производња укупне електричне енергије у зависности од нагиба крова за "Simple" модел



На дијаграму 3 приказана је генерисана електрична енергија помоћу „Simple“ модела фотонапонског панела за различите углове нагиба крова у различитим месецима.

У зимским месецима Сунце се налази ниско у том случају за прикупљање соларне енергије користи се површина соларних панела са већим нагибом према хоризонталу то су месеци јануар или фебруар, март или октобар, новембар или децембар, одакле се са графика може видети црвена боја и угао од 60° . Аналогно томе у летњем периоду због високог положаја Сунца, површина соларних колектора се поставља са нижим нагибом. На дијаграму је то зелена и плава боја које описују угао од 0° и 20° .

Дијаграм 3. Поређење генерисане енергије за различите углове крова "Simple" модел



7.2 Резултати симулације „Equivalent One -Diode” модела фотонапонских панела

У овом случају разматран је соларни панел са следећим карактеристикама: изабран је соларни панел од кристалног силицијума. Број ћелија у серији односи се на број појединачних ћелија фиксних у серији који чине један модул. Коришћено је 36 фотонапонских ћелија за добијање напона од 12 V. Активна површина фотонапонског модула зноси $0,63 \text{ m}^2$, док струја кратког споја изражена у амперима износи 4,75A. Температура околине за посматрани модел изражава се у (K) при референтним условима вредност се узима 298K.

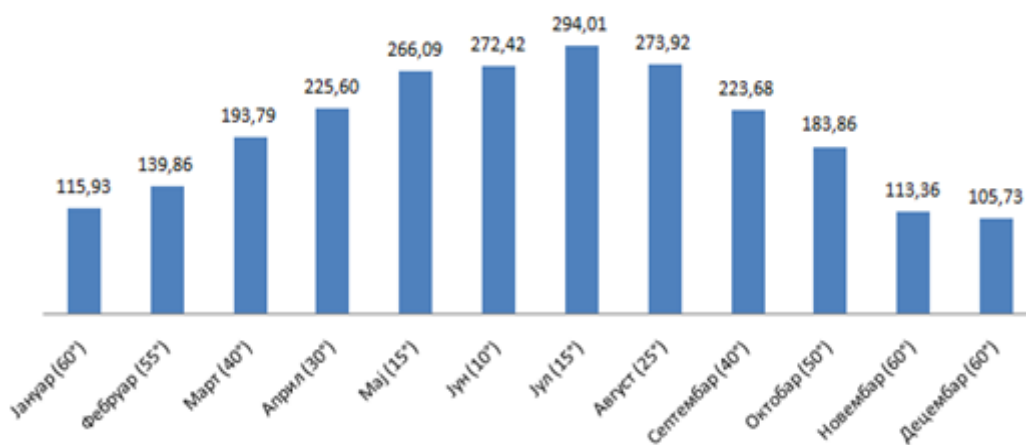
Као и код претходног модела жутом бојом (табела 5) приказане су максималне вредности генерисане енергије у току једне године по месецима за „Equivalent One - Diode” модел.

Табела 5. Генерисана електрична енергија за модел „One-Diode“

	Модел II - „One-Diode“												
Угао	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°
Месец													
Јан.	64,44	71,71	78,75	85,25	91,21	96,57	101,29	105,41	108,93	111,98	113,84	115,26	115,93
Феб.	91,15	98,99	106,41	113,26	119,30	124,56	129,09	132,87	135,87	138,19	139,37	139,86	139,48
Мар.	157,91	165,90	173,08	179,27	184,35	188,33	191,24	193,08	193,79	193,29	191,88	189,22	185,52
Апр.	204,57	211,10	216,59	220,77	223,65	225,28	225,60	224,68	222,46	218,66	214,28	208,30	201,27
Мај.	258,65	262,61	265,11	266,09	265,64	263,77	260,48	255,74	249,60	241,43	233,41	223,41	212,35
Јун.	269,11	271,58	272,42	271,86	269,88	266,45	261,66	255,45	247,77	238,06	228,78	217,47	205,14
Јул.	287,51	291,37	293,50	294,01	292,79	290,03	285,73	279,88	272,39	262,65	253,21	241,44	228,54
Авг.	255,26	262,09	267,48	271,26	273,37	273,92	272,95	270,32	266,12	259,86	253,20	244,54	234,56
Сеп.	184,10	193,41	201,63	208,61	214,32	218,60	221,62	223,31	223,68	222,48	220,23	216,50	211,49
Окт.	128,40	138,20	147,33	155,62	162,89	169,04	174,18	178,22	181,25	183,23	183,86	183,46	181,99
Нов.	69,24	75,90	82,24	88,11	93,39	98,08	102,17	105,67	108,59	110,98	112,35	113,21	113,36
Дец.	53,59	60,59	67,34	73,72	79,57	84,85	89,62	93,85	97,52	100,79	102,94	104,66	105,73
Σ	2023,93	2103,45	2171,87	2227,84	2270,34	2299,48	2315,63	2318,48	2307,98	2281,60	2247,35	2197,34	2135,36

На дијаграму 4 дат је приказ максималне генерисане електричне енергије по месецима при одговарајућим угловима нагиба крова. Уочава се да се у јулу месецу генерише 294 kWh електричне енергије за угао нагиба крова од 15°. У децембру се генерише знатно мање енергије и то 105,73 kWh за угао нагиба крова од 60°.

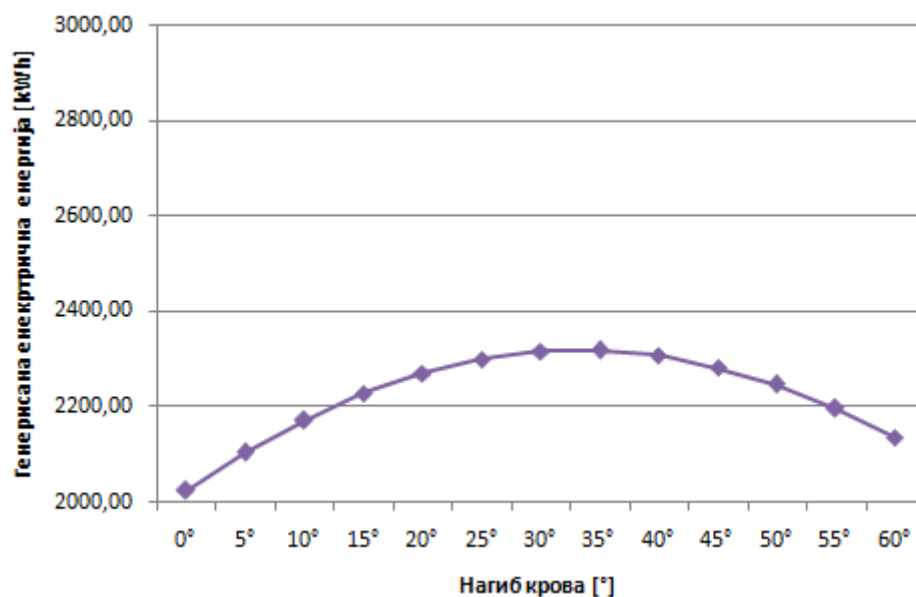
Дијаграм 4. Максимална генерисана енергија по месецима при одговарајућим угловима за модел „Equivalent One-Diode“



На следећем дијаграму дат је приказ промене укупна количина генерисане енергије на годишњем нивоу у зависности од угла нагиба крова. Може се закључити да је

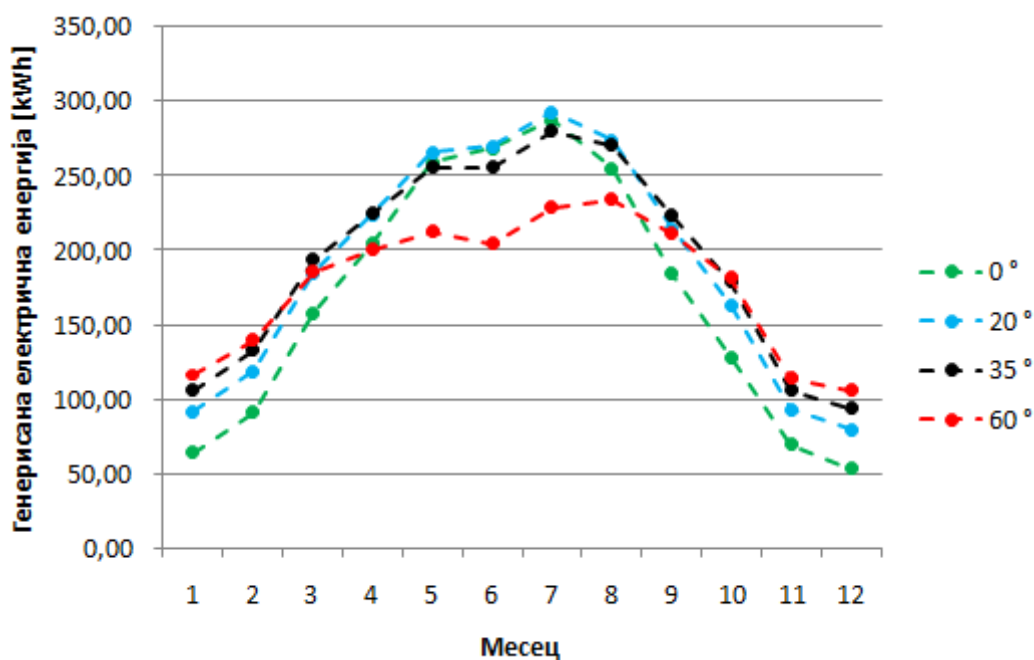
појповољнији угао постављања фотонапонских панела на кров у нашим климатским условима 35° и тада се укупно генерише 2318,48 kWh.

Дијаграм 5. Производња електричне енергије у зависности од нагиба крова за модел „Equivalent One-Diode”



На дијаграму 6 приказана је разлика у количини генерисане енергије између кровова са различитим угловима на којима је инсталиран „Equivalent One-Diode” модел. Током јануара, фебруара, новембра и децембра највише се енергије генерише када је кров постављен под углом од 60° .

Дијаграм 6. Поређење генерисане енергије за различите углове крова за модел „Equivalent One-Diode”



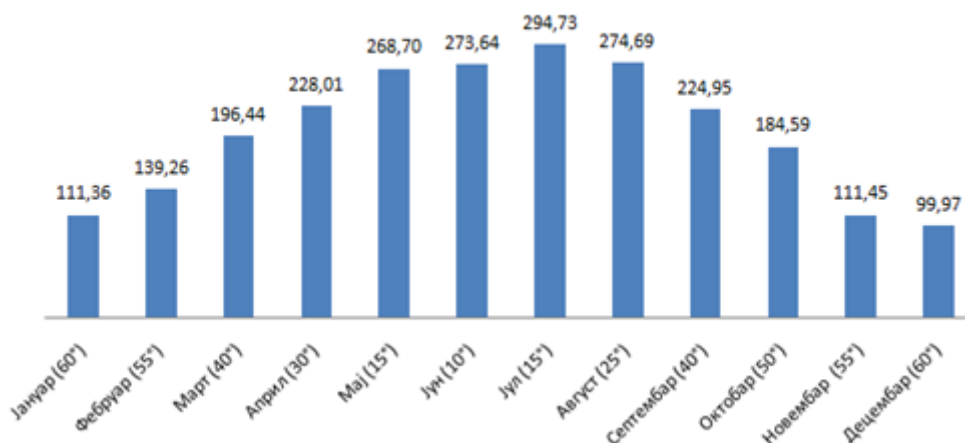
7.4 Резултати симулације „Sandia“ модела фотонапонских панела

У табели 6 приказани су подаци генерисане електричне енергије за модел „Sandia“. Фотонапонски соларни панел који је коришћен за овај тип модела је BP Solar BP275. Активна површина соларног модула је $0,63 \text{ m}^2$. Број соларних ћелија који чине модул је 36.

	Модел III - „Sandia“												
Угао	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°
Месец													
Јан.	62,26	69,94	77,13	83,69	89,50	94,59	99,01	102,79	105,91	108,47	109,97	110,98	111,36
Феб.	91,23	99,60	107,29	114,22	120,28	125,47	129,8	133,39	136,10	138,07	138,98	139,26	138,78
Мар.	160,89	169,16	176,45	182,66	187,69	191,53	194,2	195,86	196,44	195,87	194,47	191,93	188,38
Апр.	207,59	214,27	219,68	223,75	226,44	227,82	228,0	227,03	224,85	221,17	217,02	211,24	204,31
Мај.	261,83	265,64	267,93	268,70	268,03	266,05	262,7	258,16	252,20	244,23	236,34	226,33	215,22
Јун.	270,75	272,97	273,64	272,83	270,71	267,26	26,57	256,61	249,22	239,69	230,51	219,13	206,73
Јул.	289,17	292,73	294,57	294,73	293,38	290,58	286,3	280,71	273,53	264,03	254,72	243,01	230,09
Авг.	257,11	263,91	269,07	272,56	274,38	274,69	273,5	271,02	267,01	261,03	254,66	246,13	236,23
Сеп.	186,43	195,92	204,18	211,10	216,55	220,58	223,2	224,73	224,95	223,80	221,73	218,24	213,51
Окт.	129,62	140,03	149,47	157,86	165,06	171,09	175,9	179,77	182,45	184,12	184,59	184,13	182,67
Нов.	68,49	75,56	82,13	88,10	93,35	97,92	101,8	105,10	107,72	109,76	110,86	111,45	111,43
Дец.	50,56	57,85	64,78	71,16	76,86	81,89	86,31	90,16	93,42	96,22	97,96	99,27	99,97
Σ	2035,92	2117,58	2186,32	2241,36	2282,23	2309,47	2323,7	2325,32	2313,80	2286,49	2251,80	2201,12	2138,69

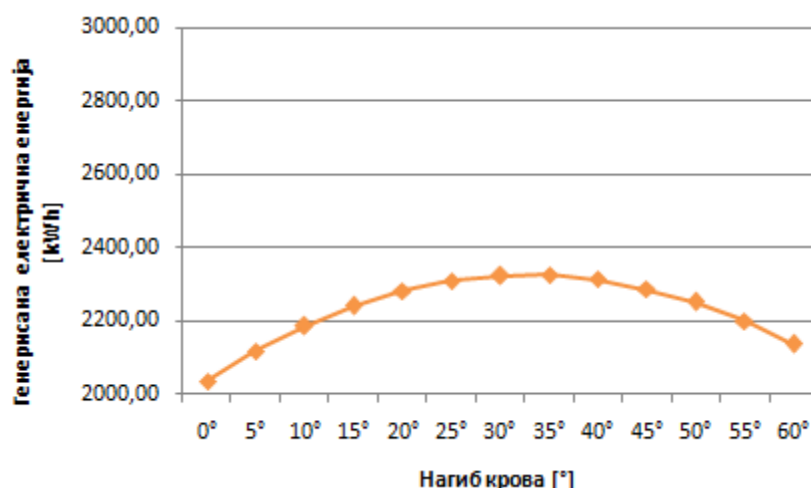
За случај модела „Sandia“ фотонапонских панела посматрани фотонапонски модел генерише се највише електричне енергије у јулу месецу и то 294,73 kWh за угао нагиба крова од 15° као што се види на дијаграму 6.

Дијаграм 7. Максимална генерисана енергија по месецима при одговарајућим угловима за „Sandia“ модел



На дијаграму 8 може се видети како се количина електричне енергије мења у зависности од нагиба крова. Укупна годишња генерисана енергија је 2325,32 kWh и то за оптимални угао од 35°.

Дијаграм 8. Производња електричне енергије у зависности од нагиба крова за „Sandia“ модел

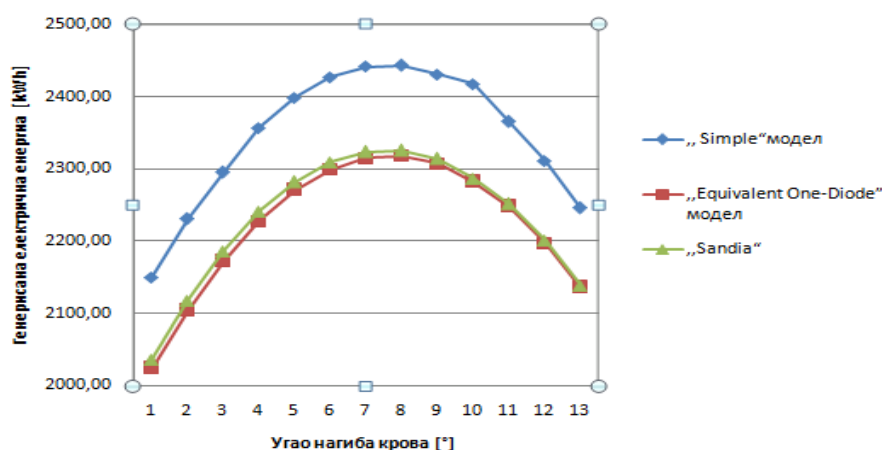


7.5 Поређење резултата

На дијаграму 9 који је у облику параболе приказана је укупна генерисана енергија по месецима за период од годину дана и то за сва 3 модела „Simple“, „Equivalent One-Diode“ и „Sandia“ фотонапонских система у EnergyPlus-у. Може се закључити да се максимална вредност генерисане енергије добија за модел „Simple“, док се нешто мање вредности добијају за модел „Equivalent One-Diode Model“ и модел „Sandia“.

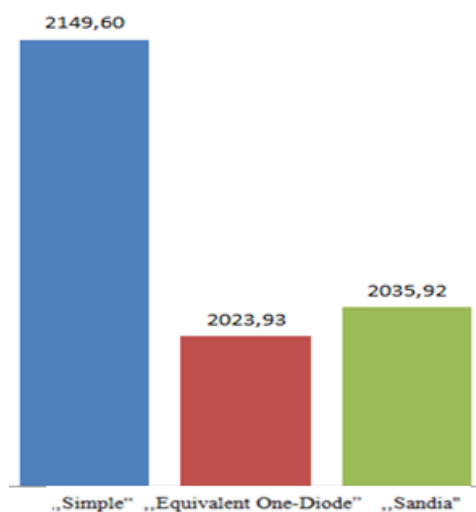
За угао од 35° максимална вредност на годишњем нивоу за „Simple“ модел износи 2443,34 kWh, за „Equivalent One-Diode“ модел износи 2318,48 kWh, док је за модел „Sandia“ вредност 2325,32 kWh.

Дијаграм 9. Укупна генерисана енергија током године за углове у распону од (0°-60°) за сва 3 модела „Simple“, „Equivalent One-Diode“ и „Sandia“



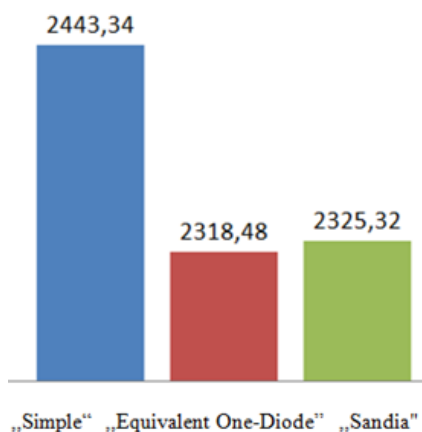
На дијаграму 10 приказана је генерисана електрична енергија на годишњем нивоу за сва три 3 модела „Simple“, „Equivalent One-Diode“ и „Sandia“ фотонапонских система за угао нагиба крова од 0°. Модел „Simple“ генерише 2149,60 kWh, док се симулацијом модела „Equivalent One-Diode“ генерише 2023,93 kWh, што је за 6,2% мање у односу на модел „Simple“, симулацијом модела „Sandia“ генерише се 2035,92 kWh што је 5,5% мање у поређењу са моделом „Simple“. Са дијаграма се може видети да модел „Equivalent One-Diode“ и „Sandia“ дају приближне резултате. Када се упореде ова три модела јасно је да модел „Simple“, даје најбоље резултате због начина прорачуна, као и параметара који се користе у програму.

Дијаграм 10. Генерисана електрична енергија за моделе „Simple“, „Equivalent One-Diode“ и „Sandia“ за угао нагиба крова од 0°



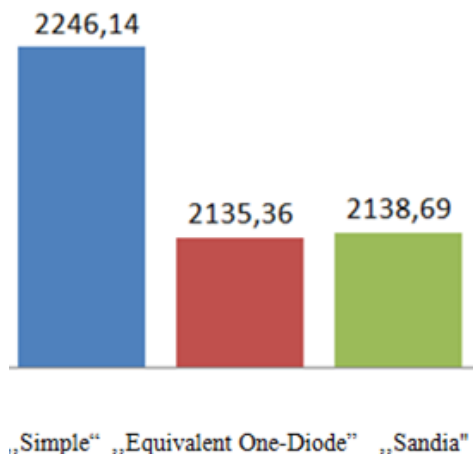
На дијаграму 11 може се видети генерисана електрична енергија на годишњем нивоу за сва три 3 модела „Simple“, „Equivalent One-Diode“ и „Sandia“ фотонапонских система за угао нагиба крова од 35°. Модел „Simple“ генерише 2443,34 kWh, док се симулацијом модела „Equivalent One-Diode“ генерише 2318,48 kWh, што је за 5,3% мање у односу на модел „Simple“, симулацијом модела „Sandia“ генерише се 2325,32 kWh што је 5% мање у поређењу са моделом „Simple“. Са дијаграма се може видети да модел „Equivalent One-Diode“ и „Sandia“ дају приближне резултате.

Дијаграм 11. Генерисана електрична енергија за моделе „Simple“, „Equivalent One-Diode“ и „Sandia“ за угао нагиба крова од 0°



Дијаграм 12 показује генерисану електричну енергију на годишњем нивоу за сва три 3 модела „Simple“, „Equivalent One-Diode“ и „Sandia“ фотонапонских система за угао нагиба крова од 60°. Модел „Simple“ генерише 2246,14 kWh, док се симулацијом модела „Equivalent One-Diode“ генерише 2135,36kWh, што је за 5,1% мање у односу на модел „Simple“, симулацијом модела „Sandia“ генерише се 2138,69 kWh што је 5% мање у поређењу са моделом „Simple“. Са дијаграма се може видети да модел „Equivalent One-Diode“ и „Sandia“ дају резултате који се разликују за свега 1%.

Дијаграм 12. Генерисана електрична енергија за моделе „Simple“, „Equivalent One-Diode“ и „Sandia“ за угао нагиба крова од 60°



Када се упореде дијаграми за генерисану електричну енергију за моделе „Simple“, „Equivalent One-Diode“ и „Sandia“ при углу нагиба крова од 0°, 35°, и 60° долази се до закључка да се највише енергије генерише код сва три модела при оптималом углу од 35°. Симулацијом помоћу софтвера EnergyPlus, остварује се највећа количина генерисане електричне енергије помоћу „Simple“ модела фотонапонских панела.

8. Закључак

У данашњем свету све је актуелније претварање енергије соларног зрачења у електричну, преко тзв. фотонапонских система који спадају у комплексне технолошке системе.

У раду је обрађен основни принцип функционисања фотонапонске ћелија, као и функционисање ћелија произведених различитим технологијама и материјалима. Свака од ћелија има своју потенцијалну примену на глобалном нивоу. Напретком технологије и употребом модерних материјала загарантовано се може постићи велики напредак у овој области.

Након описаних фотонапонских модела у софтверу EnergyPlus извршена је симулација за сва 3 модела „Simple“, „Equivalent One-Diode“ и „Sandia“ фотонапонских система. Кроз низ графикана може се видети како се генерише електрична енергија у зависности од угла крова на коме су постављени фотонапонски системи. Приказане су максималне вредности генерисане енергије на месечном нивоу за карактеристичне углове.

„Simple“ модел даје веће количине генерисане енергије у односу на „Equivalent One-Diode“ и „Sandia“ модел. Симулацијом различитих углова у распону од 0° - 60° долази се до закључка да је оптималан угао постављања фотонапонских панела на годишњем нивоу 35° .

У летњем периоду како би ефикасност фотонапонских система била што већа, потребно је панеле поставити на кров са што мањим углом, како би се прикупљала највећа количина сунчевог зрачења и потом трансформисала у електричну енергију.

9. Литература

- [1] Интернет страница: <http://zelenaenergija.pks.rs/ZelenaEnergija.aspx?id=48&p=3&>, приступљено 24.08.2019.
- [2] Александра Грујић, Милан Јовић: Обновљиви извори енергије, Висока школа електротехнике и рачунарства струковних студија, Београд 2017.
- [3] Интернет страница: <https://www.industrija.rs/vesti/clanak/oie-energija-buducnosti>, приступљено 24.08.2019.
- [4] Интернет страница: <http://www.greenhome.co.me/> приступљено 24.08.2019.
- [5] Лукић Небојша, Бабић Милун: Соларна енергија, Факултет инжењерских наука, Крагујевац 2008.
- [6] Интернет страница: <https://www.solarnipaneli.org/2010/09/globalno-suncevo-zracenje-1-deo/> приступљено 26.08.2019.
- [7] RENEWABLES 2010 GLOBAL STATUS REPORT
- [8] Интернет страница: (<http://www.solarisenergy.co.rs/solarnaenergija-u-srbiji/>), приступљено 26.08.2019.
- [9] Интернет страница: <https://drawgrow.ru/bs/princip-raboty-solnechnyh-panelei-shema-ustroistva-solnechnoi.html>, приступљено 4.09.2019.
- [10] Интернет страница: <https://www.green-group.rs/index.php?r=1778> приступљено 4.09.2019.
- [11] Марданџић Љубомир: Фотонапонски сујстиви, Техничка школа „Руђер Бошковић“, Загреб 2013
- [12] Интернет страница: <https://www.automatika.rs/baza-znanja/green-engineering/fotonaponska-celija-princip-rada-karakteristike-i-efikasnost.html>, приступљено 13.09.2019.
- [13] Д. Николић, М. Бојић, Ј. Радловић, 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.
- [14] Интернет страница: <https://www.indiamart.com/proddetail/mono-crystalline-silicon-panel-16332024997.html>, приступљено 15.09.2019.
- [15] Т.М. Razykov, С.С. Ferekides, D. Morel, E. Stefanakos, H.S. Ullal, H.M. Upadhyaya, Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects, 2011

- [16] Ламбић М., Соларне технологије – топлотни и фотонапонски системи, Београд 2013.
- [17] Ламбић Мирослав: Соларне технологије, АМГ књига, Београд, 2013.
- [18] Интернет страница: <https://www.solarreviews.com/blog/pros-and-cons-of-monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels>, приступљено 15.9.2019.
- [19] Интернет страница: <https://drawgrow.ru/bs/princip-raboty-solnechnyh-panelei-shema-ustroistva-solnechnoi.html> приступљено 15.08.2019.
- [20] Интернет страница:
https://www.researchgate.net/publication/228523138_Quantum_dot_solar_cell, приступљено 16.09.2019.
- [21] Интернет страница: <http://grejanje.com/strana.php?PID=172>, , приступљено 16.09.2019.
- [22] Интернет страница: <https://theindustryanalysis.com/2019/05/03/gallium-arsenide-devices-market-global-industry-analysis-and-forecast-to-2026/>,, приступљено 16.09.2019.
- [23] Интернет страница: <https://www.energy.gov/eere/solar/cadmium-telluride>, приступљено 19.09.2019.
- [24] Интернет страница: https://www.researchgate.net/figure/a-Conventional-CdTe-Solar-Cell-Structure-b-Modified-CdTe-Solar-Cell-Structure_fig1_271909137, приступљено 19.09.2019.
- [25] Интернет страница:
https://www.researchgate.net/publication/228523138_Quantum_dot_solar_cell, приступљено 20.09.2019.
- [26] Интернет страница: <https://energyinformative.org/grid-tied-off-grid-and-hybrid-solar-systems/>, приступљено 20.09.2019.
- [27] Интернет страница: www.solarna-energija.rs/o-solarnim-sistemima/off-grid-solarni-sistemi, приступљено 20.09.2019.
- [28] ENERGYPLUS, Input Output Reference - The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output, University of Illinois & Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2009
- [29] ENERGYPLUS, EnergyPlus Engineering Reference- The Board of Trustees of the University of Illinois and the Regents of the University of California through the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2011