

Факултет инжењерских наука

Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Дипломске академске студије

Модул: Информатика у инжењерству

Предмет: Електротехника са електроником

Број индекса: 10/1998

Биљана Бацковић

Карактеристике различитих фотонапонских модела у *EnergyPlus* окружењу

дипломски рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. др Јасна Радуловић -ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог дипломског рада кандидат треба да проучи препоручену, као и ширу литературу која се односи на карактеристике различитих фотонапонских модела у EnergyPlus окружењу. На бази усвојеног знања кандидат треба да обради фотонапонске моделе садржане у EnergyPlus-у, објасни њихове карактеристике и направи поређења електричних енергија коју даје сваки фотонапонски модел.

Препоручена литература:

- [1] Radulovic, J. J., M., Bojic, J., Skerlic, D., Nikolic, D. Taranovic, Energy generation and CO₂ emissions of PV systems, 6th International Quality Conference, Faculty of Engineering, University of Kragujevac (2012) 802–808.
- [2] Др Небојша Лукић, др Милун Бабић, *Соларна енергија*, Монографија, Машински факултет у Крагујевцу, 2008.
- [3] Bojic, M., D., Bigot, F., Miranville., A. Parvedy-Patou., J., Radulovic., Optimizing performances of photovoltaics in Reunion Island—tilt angle, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, DOI: 10.1002/pip.1159, (2011) Online ISSN:1099-159X.

Крагујевац, датум

ментор:
др Јасна Радуловић

Резиме: Нето нулта енергетска зграда користи фотонапонске (ФН) панеле за производњу електричне енергије из Сунчеве енергије. За израчунавање годишње производње електричне енергије користи софтвер *EnergyPlus*. *EnergyPlus* софтвер садржи три модела ФН панела: *Simple*, *Equivalent One-Diode* и *Sandia*. Важно је утврди понашање ових модела током времена у различитим условима. Циљ овог рада је да се упореде излазне енергије ових модела у *EnergyPlus* окружењу.

Кључне речи: ФН панели, модели ФН панела, софтвер *EnergyPlus*

Abstract: *Zero net energy building uses photovoltaic (PV) panels for electricity generation from solar energy. To calculate the annual electricity generation, the EnergyPlus software is used. The EnergyPlus software contains three models of PV panels: Simple, Equivalent One-Diode and Sandia. It is important to determine behavior of these models during calculation at different conditions. The objective of this paper is to compare the PV energy output of these models in EnergyPlus environment.*

Keywords: *PV panels, models of PV panels, software EnergyPlus*

Садржај

1. Увод	4
2. Соларна енергија	6
2.1. Сунце	6
2.2. Земљин сјај - термодинамичка равнотежа Сунце-Земља.....	6
2.3. Ефекат стаклене баште	7
2.4. Инсолација	7
2.5. Историја соларне енергије	7
2.6. Предности и недостаци примене соларне енергије	11
2.7. Подела пријемника соларне енергије.....	12
3. Фотонапонске ћелије	14
3.1. Основни принципи функционисања фотонапонске ћелије	14
3.2. Основни типови силицијумских фотонапонских ћелија.....	16
3.3. Фотонапонске технологије и генерације ФН ћелија	17
3.4. Теорија фотонапонског ефекта.....	18
4. EnergyPlus i Google SketchUp.....	22
4.1. EnergyPlus	23
4.2. Google SketchUp	24
4.3. Дефинисање геометрије објекта	24

4.4. Основна подешавања EnergyPlus-a	28
4.5. Подешавање параметара за симулирање фотонапонских панела објекта.....	31
4.5.1. Simulation Parameters - Основни параметри симулације.....	33
4.5.2. Location and Climate – Локација и клима	34
4.5.3. Schedules – Распоређи.....	35
4.5.4. Surface Construction Elements – Elementi konstrukcije objekta	37
4.5.5. Thermal Zones and Surfaces – Termičke zone i površine	38
4.5.6. Internal Gains– Унутрашњи добици топлоте	40
4.6. Фотонапонски модули	42
4.6.1. Simple модел	43
4.6.2. Equivalent One-Diode Model -Еквивалентни једно-диодни модел.....	45
4.6.3. Sandia фотонапонски модел	55
4.7. Excel извештај	63
5. Резултати и дискусија	65
5.1. Истраживани објекат	65
5.2 Резултати симулације	65
6. Закључак.....	71
7. Литература	72

1. Увод

Заоштравање питања расипања енергије (тзв. енергетска криза) седамдесетих година XX века изазвало је озбиљна настојања за рационализацијом потрошње и штедњом енергије у свим подручјима. Тако је, заправо, тек седамдесетих година прошлог века утврђено да је, уз транспорт, становање једно од врло значајних потрошача енергије. Подаци из различитих средина говоре да потрошња енергије у стамбеном сектору обухвата од 20 до 40 % од укупне потрошње енергије. Треба, међутим, знати да су ово показатељи који се односе углавном на потрошњу енергије у фази експлоатације стамбених грађевина, где су највећи потрошачи системи грејања (евентуално хлађења), затим расвета и други сервиси становања (топла вода, вентилација, кућни апарати и сл.). Због тога је баш уштеда енергије у стамбеним објектима данас један од светски трендова. Заправо све се више води рачуна да животни простор мање кошта, а да се притом троши исто или мање енергије. Власници кућа могу достићи уштеду у енергији до 30%, или више, при чему повећавају ниво удобности дома правећи енергетски ефикасније зграде. Додатне уштеде енергије су могуће било прављењем нових домова или реновирањем постојећих. Власници који желе још веће редукције у трошковима коришћења могу користити новије видове енергетских система, као што су пасивни соларни системи и други облици обновљивих извора енергије.

Фотонапонска енергија (конверзија соларне енергије) се сматра као један најперспективних обновљивих енергетских технологија која има потенцијал да значајно допринесе одрживом снабдевању енергијом и која потпомаже ублажавању емисије гасова стаклене баште. Комерцијални фотонапонски материјали се користе за фотонапонске модуле као што су моно кристални силицијум, мулти-кристални силицијум, аморфни силицијум и танко-слојне технологије, као што су кадмијум-телурид (CdTe) и копер индијум диселенид (CIS). Типичан ФН систем се састоји од ФН модула и равнотежног система, конструкције за монтажу ФН модула и претварача генерисане енергије у наизменичну струју погодне величине за употребу у електричној мрежи [1, 13].

Карактеристике фотонапонских модела се користе да процене излазну снагу фотонапонског система, који обично укључује ФН панеле, инверторе, контролере пуњења и друге равнотежне компоненте. ФН ћелије са њиховом подршком се налазе на крову куће и повезани су на националну мрежу електричне енергије и / или куће. Из соларне

енергије, ФН ћелија производи једносмерну струју шаље инвертору и претвара се у наизменичну струју. Ова наизменична струја или троше кућа и / или купљена од стране националне електричне мреже. Ови модели су најразличитији, дизајнирани у складу са географском локацијом, географском ширином, расположивим соларним зрачењем и све то у циљу добијања прецизнијих резултата [2].

Са становишта електротехнике, ФН модуле карактеришу њихова струјно напонска крива, I-V крива. Снага модула је производ његовог напона и струје, тако да је потребно знати радну тачку модула за утврђивање произведене енергије. Моделирање ФН модула, пре свега подразумева усклађивање са нелинеарном I-V кривом. Током година, су развијени бројни модели [2,3,4].

Софтверски програм EnergyPlus служи за енергетску анализу зграде развијен од стране U.S. Department of Energy. Ово софтвер је веома корисна алатка да истражи понашање нето-нулте енергетске зграде. Он нуди три различита модела за предвиђање електричне енергије произведене ФН модула. Најједноставнији модел омогућава кориснику да унесе произвољне вредности ефикасности. Друга два модела користе емпиријске односе и могу прецизније предвидети оперативни рад ФН модула који се заснива на параметрима директног и дифузног зрачења и температуре ћелија [5].

Циљ овог дипломског рада је анализирати карактеристике већ постојећег објекта, како и различите фотонапонске моделе и њихово понашање у EnergyPlus окружењу. При томе смо разматрали укупну електричну енергију коју произведе фотонапонски панел, вишак електричне енергије који се не троши тренутно већ продаје мрежи, укупне електричне енергије која се купује из мреже да би испунила тренутне захтеве, потребе домаћинства како на месечном, тако и на годишњем нивоу. Све то у циљу редукције у трошковима коришћења и коришћења новијих видова енергетских система, као што су фотонапонски панели и други облици обновљивих извора енергије.

Оваква анализа и упоређивања овог типа су данас веома честа, нарочито развојем рачунарске технике и софтвера специјализованих за такве могућности. Способност руковања тим софтверима омогућује знатно бржи и лакши пут до циља. Управо је један такав софтвер коришћен у овом раду о чему ће бити речи у наредном поглављу.

2. Соларна енергија

Енергија Сунца представља један од најзначајнијих обновљивих извора енергије, оних чија се продукција енергије може одвијати истом брзином којом се и троши. Под енергијом Сунца подразумевамо директно искоришћавање енергије електромагнетних таласа које оно зрачи. Уколико се енергија Сунца посматра другачије, може се рећи, практично сви извори енергије на Земљи (обновљиви и необновљиви), осим нуклеарне, геотермалне и енергије плиме и осеке су створени или се стварају зрачењем са Сунца. [7]

2.1. Сунце

Сунце је сфера састављена од интензивно топлих гасовитих материја, пречника 1.39×10^9 m. Соларна енергија стиже до наше планете само 8 минута и 20 s по напуштању гигантске пећи - Сунца, које је од Земље удаљено 1.5×10^{11} m. Сунце има ефективну температуру црног тела од приближно 5762 K. Температура у централном региону је много већа и процењује се између 8×10^6 - 40×10^6 K. У ствари, сунце је континуирани фузион реактор у коме се водоник претвара у хелијум. Укупна излазна Сунчева енергија је око 3.8×10^{20} MW, што одговара енергији од 63 MW/m^2 површине сунца. Ову енергију Сунце зрачи у свим правцима. Само мали део, око 1.7×10^{14} kW, од укупне енергије зрачења које се емитује стиже на Земљу. Међутим, и са овом малом фракцијом, процењује се да је соларна енергија која током 30 минута пада на земљу, једнака светским енергетским потребама за читаву годину дана. [7]

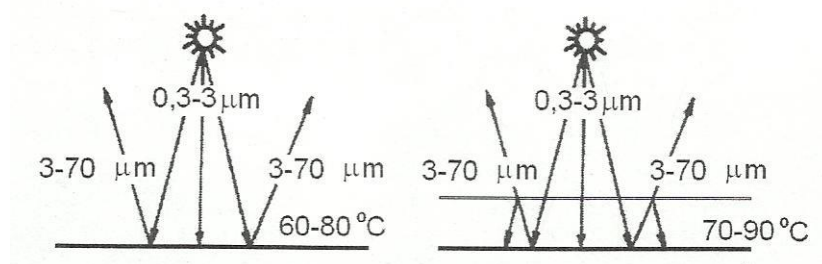
2.2. Земљин сјај - термодинамичка равнотежа Сунце-Земља

Јасно је да сву енергију коју прими са Сунца, Земља мора да врати назад у васиону. Једино занемарљиви део (око 0,1%) Сунчевог зрачења остаје везан на земљи процесом фотосинтезе, у виду хемијске енергије. Свако тело које има температуру вишу од 0K зрачи енергију електромагнетним таласим; што је температура нижа, нижи је износ израчене енергије али је и таласна дужина зрака већа. Од укупног годишњег Сунчевог терестријалног зрачења, које износи 343 W/m^2 , 30% се рефлектује назад са облака и земљине површине (Земљин алbedo), 11.7% се израчи директно са Земљине површине, 10.2% израче облаци (део апсорбованог зрачења), а за 48.1% Земљиног сјаја су одговорни гасови стаклене баште. Овај део зрачења се поново враћа на Земљу и након њеног загревања, напушта је. [7]

2.3. Ефекат стаклене баште

Стакло је најпознатији чврст материјал који пропушта Сунчево зрачење (таласне дужине од $0,3$ до $3\text{ }\mu\text{m}$) и то у просечном износу од 90% . Како се површина иза стаклене плоче загрева, она емитије инфрацрвено дуготаласно зрачење (таласне дужине од 3 до $70\text{ }\mu\text{m}$). Овакво зрачење стакло апсорбује а затим емитије назад на површину, тј. топлотни зрак може ући али не и изаћи из стаклене замке.

Ефектом стаклене баште се може значајно увећати температура површине на којој се успоставља термичка равнотежа (примљена количина топлоте једнака предатој). Тамна метална површина се на мирној атмосфери, изложена Сунцу, може загрејати и од 60°C до 80°C што можемо видети на *слици 1*. Коришћењем стакленог прекривача температура површине се може повећати до 90°C . [7]



Слика 1. Сунчево зрачење на површину и Сунчево зрачење на површину прекривену стаклом

2.4. Инсолација

Количина Сунчевог зрачења на Земљиној површини зависи од много фактора: географске ширине места, годишњег доба, доба дана, чистоће атмосфере, облачности, оријентације и нагиба површине. Просечно Сунчево зрачење, на годишњем нивоу на јединичну хоризонталну површину, назива се годишња инсолација и веома је важан метеоролошки податак за посматрану локацију на Земљи. У Србији просечна годишња инсолација креће се око 1400 kWh/m^2 , а просечна дневна око 3.8 kWh/m^2 . [7]

2.5. Историја соларне енергије

Идеја коришћења соларне енергије колектора у циљу искоришћења сунчеве енергије је забележена још у праисторијским временима, када је 212. год. пре н. е. грчки

научник и лекар Архимед смислио метод да спали римску флоту. Архимед је познавајући оптику употребио мноштво полираних штитова да направи конкавно огледало и да усмери концентрисани Сунчев зрак у римски брод.

Хиљаду и осам стотина година после Архимеда, Athanasius Kircher (1601-1680) обавља експеримент тако што усмерава ватру на гомилу дрва са већег одстојања, како би видео да ли је прича о Архимеду имала научну вредност, али ниједан од његових извештаја није преживео. Прва примена соларне енергије односи се на коришћење концентришућег колектора, који је по својој природи (облику конструкције), као и захтеву да прати сунце, био "тежак" за примену. Током 18. века развијају се соларне пећи за топљење гвожђа, бакра и других метала, које су биле изграђене од полираног гвожђа, стаклених сочива и огледала. Пећи су биле у употреби широм Европе и Блиског истока. Једна пећ коју је дизајнирао француски научник Antoine Lavoisier, достигла је изузетно високу температуру од 1750°C . Пећ је користила примарно сочиво пречника 1.32 m, и секундарно пречника 0.2 m и оваквим системом је постигнута највиша температура од стране човека за претходних сто година.

Током 19. века били су покушаји да се покрену парније турбине користећи концентрисано Сунчево зрачење.

Године 1912. Shuman је почео да гради највеће светске пумпно постројење у фабрици у Меади, Египат. Систем је пуштен у рад у 1913. и користио је дугачке параболичне цилиндрице за фокусирање сунчеве светлости. Сваки цилиндар је био дуг 62 m, а укупна површина цилиндара је била 1200 m^2 . Соларни мотор је развијао снагу од 37-45 kW у току 5 сати непрекидног рада. Упркос успеху постројења, оно је затворено 1915. год. због почетка Првог светског рата.

Током последњих 50 година пројектована су и конструисана бројна постројења са различитим типовима колектора. Две примарне соларне технологије су коришћене: са централним и дистрибутивним пријемницима, у циљу бољег концентрисања Сунчеве светлости.

Идеја да се Сунчева енергија користи за грејање кућа и топле воде, појавила се средином 1930-их година (равни соларни колектори). Производња соларних грејача воде почела је раних 60-их година прошлог века и веома брзо се проширила у многе земље

света. Типични соларни грејач воде је био термосифонског типа са резервоаром изнад колектора. Врста соларних грејача топле воде са принудном циркулацијом преузима примат, због архитектонских и естетских захтева.

Бекерел је открио фотонапонски ефекат селена 1839. године. Ефикасност конверзије ``нових`` силиконских ћелија, развијених 1958. год. била је око 11%, мада је њихова цена тада била висока. Истраживања 1960-их година, довела су до открића других фотонапонских материјала као што су галијум-арсенид (GaAs). Они су могли да раде на вишим температурама од силицијума, али су били и много скупљи. Фотонапонске ћелије су направљене од различитих полупроводника, који су умерено добри проводници електрицитета. Најчешће коришћени материјали су силицијум (Si) и једињења кадмијум-сулфида (CdS), бакар-сулфида (Cu₂S) и галијум-арсенида (GaAs). [7]

Аморфне силицијумске ћелије се састоје од атома силицијума које су постављени у танком хомогеном слоју. Аморфни силицијум апсорбује светлост ефикасније него кристални силицијум, тако да слој ћелија може бити тањи. Из овог разлога, примена аморфног силикона је такође позната и као ФН технологија танког филма. Аморфни силицијум може бити депонован на широком спектру подлога, крутих и флексибилних, што га чини идеалним за закривљене површине. Аморфне ћелије су, међутим, мање ефикасне од ћелија на бази кристала, са типичном ефикасношћу од око 6%, али су лакше и стога јефтиније за производњу. Њихова ниска цена их чини идеалним за многе апликације где се не захтева висока ефикасност и где је битна ниска цена.

Аморфни силикон је стакласта легура силикона и око 10% водоника. Има особине које га чине атрактивним материјалом за танкослојне соларне ћелије:

1. Силикон је еколошки безбедан.
2. Аморфни силикон апсорбује сунчеву светлост изузетно добро, тако да је потребан врло танак активни слој соларних ћелија (око 1 мм у поређењу са 100 мм или више за кристалне соларне ћелије), чиме се у великој мери смањују соларних захтеви за материјалом за израду соларних ћелија.
3. Танки филмови a-Si могу директно да се депонују на јефтин држећи материјал, као што је стакло, челични лим или пластична фолија.

Велики број других материјала као што су кадмијум-телурид и бакар модули могу бити произведени релативно јефтиним индустријским процесима у -индијум-диселенид се данас користе за фотонапонске или ФН модуле. Предност ових технологија је да односу на технологије кристалног силицијума, и ФН модули имају већу ефикасност од аморфног силикона. ФН ћелије се пакују у модуле који производе одређени напон и струју када се осветле. ФН модули се могу повезивати серијски или паралелно у циљу производње већег напона или јачине струје. Фотонапонски системи се могу користити самостално или у спрези са другим извором електричне енергије. Примена ПВ система је у комуникацијама (на земљи и у космосу), даљинском управљању и мониторингу, осветљењу, пуњењу батерија итд.

Два основна типа примене ФН модула су самостални и мрежно повезани модули. Самостални ФН системи се користе у областима које нису лако доступне, или немају приступ мрежи електричне енергије. Самостални систем је независан од електричне мреже, при чему се произведена енергија обично складишти у батеријама. Типичан самостални систем би се састојао од једног или више ФН модула, батерије и контроле пуњења. Инвертор може бити укључен у систем за конвертовање једносмерне струје коју генерише ФН модул у наизменичну струју коју захтевају нормални апарати за свој рад. [10]

Код мрежних ФН система, модули су повезани на локалну мрежу електричне енергије. То значи да током дана, електрична енергија коју генерише ФН систем може одмах да се користи (што је нормално за системе инсталиране у канцеларијама и другим комерцијалним зградама), или може бити продате дистрибутеру електричне енергије (што је чешће код домаћих-кућних система где људи током дана не бораве у објектима становања). У вечерњим сатима, када соларни систем није у могућности да обезбеди целокупну потребну количину струје, тј. електричне енергије, она може да се ``врати`` из мреже. У ствари, мрежа се понаша као енергетски систем за складиштење, што значи да ФН систем не треба да укључује и батерије за складиштење електричне енергије. [9]

До 2002. године је инсталисано око 2 GWp (Wp – снага која се добије при стандардизованим, максимално повољним условима Сунчевог зрачења) и тај тренд експоненцијално расте, уз пад цена оваквог начина производње електричне енергије. [7]

2.6. Предности и недостаци примене соларне енергије

Сунчева енергија као извор енергије за грејање, као и за грејање санитарне воде има следеће предности:

Бесплатна је и доступна;

- Еколошки је чиста (нема сагоревања, па не долази до емисије штетних гасова, као што су CO₂, SO₂, NO_x и слично);
- Припада обновљивим изворима енергије (ОИЕ), па не може доћи до исцрпљивања ресурса (за разлику од угља, нафте и гаса);
- Доприноси одрживом развоју (под одрживим развојем се подразумева развој друштва који је стабилан током дугог низа генерација, тј. енергетски ресурси се користе у оној мери коју обезбеђује обнављање природе);
- У комбинацији са класичним изворима енергије повећава енергетску ефикасност постројења.

Наравно, постоје ограничења и недостаци који спречавају озбиљније коришћење Сунчеве енергије. Они су следећи:

- Сунчево зрачење је изузетно променљивог карактера (и по правцу, и по интензитету). Топлотни добици су променљиви и током дана (висина Сунца током дана, облачност, падавине), као и током године (у зимском периоду, када је најпотребније, има их најмање);
- Са падом спољне температуре смањује се ефикасност соларних уређаја, који претварају Сунчеву енергију у топлотну, због повећаног одавања топлоте у околину;
- Током зимског периода и ниских спољних температура може доћи до замрзавања инсталација уколико се не предузму потребне мере;
- За велике системе потребна је знатна грађевинска површина;
- Тренутно недостају прописи и пројектни параметри који би омогућили веће коришћење Сунчеве енергије.

2.7. Подела пријемника соларне енергије

Подела пријемника соларне енергије се може извршити према начину трансформације исте на:

- соларне колекторе
- хибридне соларне колекторе
- фотонапонске ћелије



Слика 2. Пасивна соларна кућа [11]



Слика 3. Хибридни соларни колектори [11]



Слика 4.1 Изглед фотонапонских ћелија [11]



Слика 4.2 Изглед фотонапонских ћелија [11]

3. Фотонапонске ћелије

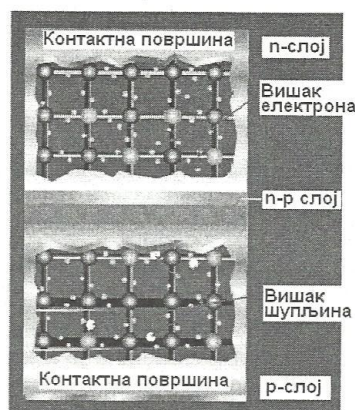
Фотонапонски ефекат и фотонапонске ћелије и системи припадају знатно више нучним областима, као што је електротехника, технологија материјала, нанотехнологије, него термодинамика и пренос топлоте и масе али као незаобилазни вид коришћења Сунчеве енергије.

Фотонапонски ефекат (ефекат појаве напона у материјалу под дејством светлости, или неког другог дела спектра електромагнетног зрачења) открио је Бекерел 1836. Године, а суштински развој фотонапонске технологије почиње од 1954. Године када Белова лабораторија прави експерименте са модификованим силицијумским материјалом, веома осетљивим на светлост. [6]

3.1. Основни принципи функционисања фотонапонске ћелије

Силицијум је најпознатији полупроводнички елемент и други хемијски елемент по распрострањености у природи. Атом Si садржи 14 електрона смештених у три орбите. Прве две су попуњене, док се у трећој налази 4 електрона уместо осам, који би је потпуно попунили. Ма тај начин силицијум формира кристалну структуру у којој су суседни атоми спојени заједничким електронима у трећој орбити. Уколико се у ову структуру убаци елемент, као што је фосфор, који у последњој орбити има, на пример пет електрона (силицијум се "допингује"), један електрон ће остати ван чврсте међуатомске везе, везан слабом везама за сопствено језгро. Овај електрон се лако ослобађа те везе деловањем додатне енергије, каква је енергија фотона електромагнетног зрачења (светлости пре свега) и на тај начин постаје слободан. Овде се ради о n-типу полупроводника.

С друге стране уколико се силицијум допингује елементима који имају три електрона у последњој орбити, као што је бор на пример, везе између атома ће имати "шупљине", места непопуњена електронима. На овај начин добија се p-тип полупроводника. Комбинацијом ова два типа полупроводничког материјала, добија се практично и даље електрично неутралан материјал, јер слободни електрони налазе своје место у слободним шупљинама. Међутим, уколико се између n и p слоја постави неутралан раздвајајући слој (p-n слој), што је шематски приказано на *слици 5*, појавиће се разлика напона на спољним површинама овог полупроводничког "сендвича".



Слика 5. Полупроводнички n и p слојеви, раздвојени n – p слојем

Слој полупроводника n типа изложен је дејству светлости која производи слободне електроне у слоју и тиме ствара разлику потенцијала, горњег и доњег слоја полупроводничког материјала.

Ово је основни принцип функционисања фотонапонских ћелија (ФН) На слици је приказана принципска шема једне фотонапонске ћелије.

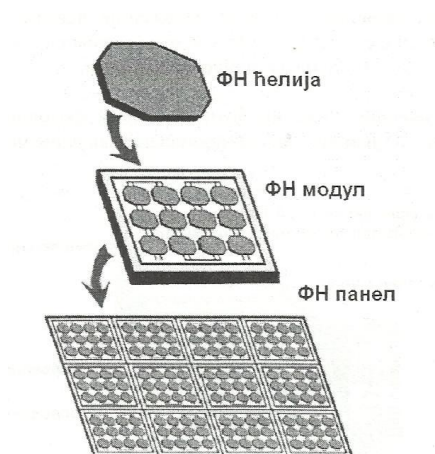
Поред дефинисаних n, p и p-n полупроводничких слојева, касична фотонапонска ћелија на врху поседује антирефлексни транспарентни слој, затим метални контакт (контактну мрежу) на n слоју, следе три описана полупроводничка слоја и рефлексивна метална плоча- контакт са задње стране ћелије. ФН ћелија се прикључује на одговарајући потрошач и електрично коло је затворено.

Занимљиво је истаћи да просечна дебелина класичне силицијумске ФН ћелије износи само 300 μm , а негативни n слој само 2 μm .



Слика 6. Принцип функционисања фотонапонске ћелије

Једна класична силицијумска ФН ћелија има димензије 10X10cm. Како се њен уобичајени радни напон креће око 0.5V, прибегава се повезивању ових ћелија у соларне ФН модуле и веће панеле, где су ФН ћелије спојене редно, како би се добио уобичајени напон од 12 V (даље је могуће паралелно повезивање у панелу), што је приказано на *слици 7*. У суштини могуће су све комбинације серијског и паралелног повезивања ћелија. ФН ћелија прикључена на потрошача даје једносмерну струју (DC), она се даље инвертером може превести у наизменичну струју одговарајућих карактеристика (AC).



Слика7. Повезивање ФН ћелија у модуле и панеле

За формирање антирефлексног слоја на површини модула се користи титанијум- диоксид или у последње време силицијум-нитрит. Модули и панели заштићују се са предње стране слојем темперованог стакла (не у случају технологије са аморфним силицијумом), а са задње стране флексибилним полимером. [6]

3.2. Основни типови силицијумских фотонапонских ћелија

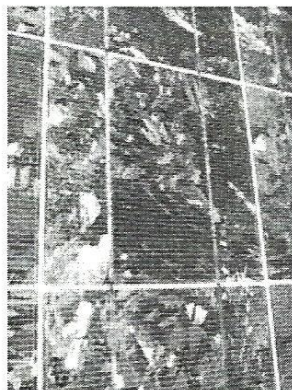
Тренутно 95% фотонапонских ћелија у експлоатацији представљају силицијумске ФН ћелије. Постоје три основна типа силицијумских ФН ћелија:

- Монокристалне силицијумске фотонапонске ћелије,
- Поликристалне силицијумске ФН ћелије и
- ФН ћелије од аморфног силицијума.

У случају монокристалних ФН ћелија из истопљене масе силицијума се издваја потпуно чист силицијум који кристализује као монокристал, а потом се реже специјаним

поступком у веома танке плоче . Оваква ФН ћелија је најквалитетнија и има највећу ефикасност.

Поликристална структура ФН ћелија добија се јефтинијим поступком тако што се течни силицијум лије у калупе, где се кристализује у ситније неправилне кристале, а потом реже у танке плоче (*Слика 8*).



Слика 8. Поликристалне силицијумске ФН ћелије

Због дефекта на границама формираних кристала овакве ФН ћелије од аморфног силицијума, најјефтиније и најмање ефикасности.

Технологије се даље развијају па се силицијум у виду танког филма наноси и као протокристална или нанокристална структура. [6]

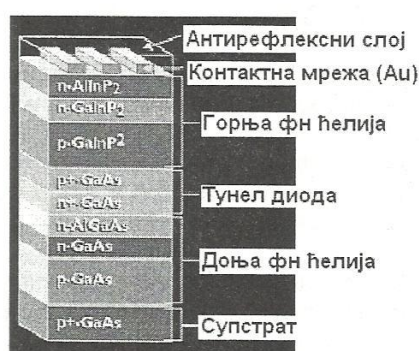
3.3. Фотонапонске технологије и генерације ФН ћелија

Технологија фотонапонских ћелија развија се брзо. Сада се већ говори о четири генерације фотонапонских ћелија:

1. Првој генерацији припадају касичне, силицијумске ФН ћелије од монокристаног или поликристалног силицијума;
2. Друга генерација представља технологије наношења полупроводника у танком филму на одређену подлогу(аморфни силицијум, бакар-индијум-галијум-диселенид, галијум-арсенид, кадмијум-телурид...)

3. Трећа генерација представља ФН ћелије на другачијем принципу фото-електро-хемијског ефекта, који подразумева коришћење полимера, органских ФН ћелија и нанокристала.
4. Четврта генерација представља комбинацију полимера и наночестица у структурама које могу апсорбовати и трансформисати различите делове електромагнетног спектра.

Када се говори о танким филмовима полупроводника, могуће су различите комбинације материјала, које дају фотоелектрични ефекат. Могуће комбинације хемијских елемената су: Cu-Ag-Au, Al-Ga-In, (S-Se-Te)₂



Слика 9. Вишеслојна GaAs ФН ћелија

Најефикаснија структура се истражује и варијанта са вишеслојном фотонапонском ћелијом где више слојева – ФН ћелија, смештених једна испод друге, апсорбују Сунчеву светлост и конвертују је у електричну енергију (multijunction system). Најефикаснија структура (и најскупља) вишеслојне ФН ћелије направљена је од галијум-арсенида (GaAs) са примесама (слика 9). Сличне конструкције граде се и од бакар-индијум-диселенида (CuInSe₂) или аморфног силицијума. Вишеслојна GaAs ФН ћелија под концентрисаним Сунчевим зрачењем дала је ефикасност од 35%. [6]

3.4. Теорија фотонапонског ефекта

Ефикасност фотонапонске ћелије, η_{pvc} представља однос снаге трансформисане у електричну енергију (снага ФН ћелије), P_{pvc} и снаге Сунчевог зрачења, I_p које пада на површину исте ћелије A_{pvc} :

$$\eta_{pvc} = \frac{P_{pvc}}{I_p A_{pvc}} \quad (1)$$

За оцену ефикасности трансформације ФН ћелије користи се и величина фактора испуњена, FF који се дефинише као:

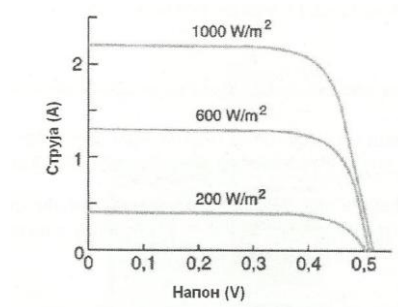
$$FF = \frac{P_{pvc}}{U_{oc} I_{sc}} \quad (2)$$

где су: U_{oc} (V) напон отвореног кола (максимални напон ФН ћелије) и I_{sc} (A) струја кратког споја ФН ћелије (максимална струја ФН ћелије).

Када ФН ћелија није везана за потрошача добиће се на њеним крајевима напон отвореног кола, а када је ФН ћелија у електричном колу без отпора добиће се струја кратког споја.

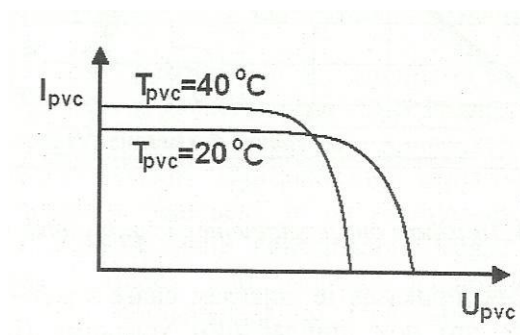
Већ је речено да се снага ФН ћелије изражава у W_p , у снази која се постиже при дефинисаном Сунчевом зрачењу и температури ћелије. Логично је предпоставити да снага ФН ћелије зависи од ова два фактора.

На слици 10 је приказана промена струје и снаге класичне силицијумске ФН ћелије, при различитим интензитетима Сунчевог зрачења.



Слика 10. Зависност снаге класичне силицијумске ФН ћелије од интензитета Сунчевог зрачења (W/m^2)

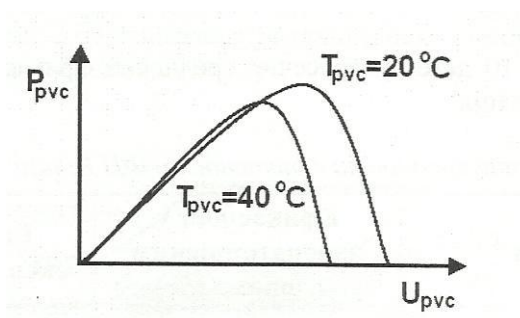
Може се приметити да напон ФН ћелије веома мало зависи од интензитета Сунчевог зрачења, али зато струја снажно зависи од истог фактора, а тиме и снага ФН ћелије.



Слика 11. Зависност струје ФН ћелије од њене температуре

Снага ФН ћелије опада са порастом њене температуре.

Силицијумска ФН ћелија просечно губи 0.3 до 0.4% своје снаге са посатом температуре њене површине за 1°C. На сликама 11 и 12 приказана је принципска промена струје и снаге ФН ћелије у зависности од њене температуре.



Слика 12. Зависност снаге ФН ћелије од њене температуре

Напон отвореног кола ФН ћелије и струја кратког споја у зависности од њене температуре се мењају према једначинама, респективно:

$$U_{oc} = U_o(1 + \beta\Delta T) \quad (3)$$

$$I_{sc} = I_o(1 + \alpha\Delta T) \quad (4)$$

Где су: температурски коефицијент промене напона отвореног кола ФН ћелије, температурски коефицијент промене струје кратког споја ФН ћелије и промена температуре ФН ћелије у односу на референтне услове .

Из једначине (1) и (2) може се израчунати максимална снага ФН ћелије, у зависности од њене температуре:

$$P_{pvc\ max} = U_{oc} I_{sc} = U_o I_o (1 + \beta \Delta T)(1 + \alpha \Delta T) = U_o I_o [1 + (\alpha + \beta) \Delta T + \alpha \beta \Delta T^2] \quad (5)$$

Ако се занемари квадратни члан у једначини (3), добија се:

$$P_{pvc\ max} = P_o [1 + (\alpha + \beta) \Delta T] \quad (6)$$

Како је коефицијент отвореног кола већи и негативан, снага ФН ћелије ће се смањивати са порастом њене температуре.

У табели 1. су дате просечне вредности ефикасности најчешће коришћених ФН ћелија.

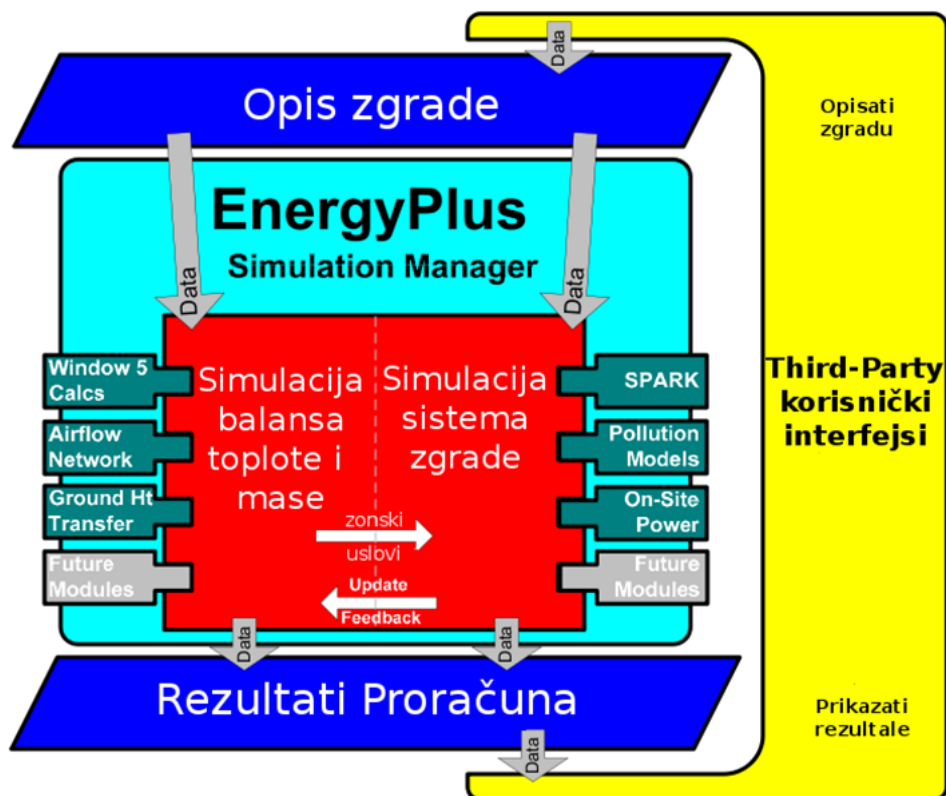
Табела 1. Просечне вредности ефикасности ФН ћелија

Материјал	Ефикасност у лабораторијским условима (%)	Ефикасност у експлоатацији (%)
Монокристални	24	14-17
Поликристални	18	13-15
Аморфни	13	5-7
Кадмијум-телурид	16	6-8
Бакар-индијум-диселенид	18	6-8

Шта се дешава са енергијом зрачења која се трансформише у електричну енергију? Као и у општем случају: један мањи део Сунчевог зрачења се рефлектује са површине ФН ћелије, што се избегава постојањем антирефлексног слоја, део краткоталасног Сунчевог зрачења се апсорбује на силицијумском полупроводнику, један део се претвара у електричну, а други део у топлотну енергију. Сунчево зрачење мањих енергија изнад видљивог дела спектра (до таласне дужине од 1.15 μ m) силицијумска ФН ћелија пропушта, до високорефлексивног задњег металног контакта са кога се одбија назад у атмосферу. У сваком случају, загревање фотонапонске ћелије смањује њену ефикасност и код чистих ФН система се покушава избећи и уградњом расхладних система. [6,7]

4. EnergyPlus i Google SketchUp

За израду овог дипломског рада у основи су коришћени програми Google SketchUp i EnergyPlus [9]. Ова два програма имају међусобну комуникацију тако што Google SketchUp даје геометрију објекта који се симулира у EnergyPlus-u.



Слика 13. На слици се види начин функционисања EnergyPlus-a са свим пратећим додацима

Будући да EnergyPlus не доноси са собом графичке корисничке интерфејсе за препроцесирање (графичко дефинисање геометрије) и постпроцесирање (графички приказ резултата), неопходно је користити програме који већ постоје и могу се применити како за креирање објекта, тако и за приказ резултата прорачуна. На слици 13. су ови програми приказани жутим пољем и могу бити различито конципирани. Најобичнији начин за креирање геометрије је уз помоћ неког текстуалног едитора, али је такође и најтежи будући да је саму геометрију објекта веома тешко дефинисати на овај начин, а и захтева доста времена. Зато је у овом раду коришћен програм за дефинисање геометрије *Google SketchUp* са посебним додатком, *Open Studio*, који је накнадно инсталиран. Након генерисања фајла уз помоћ Google .

SketchUp-a и корекције у IDF едитору добијамо коначну улазну датотеку за EnergyPlus (на слици приказану као *Onisc зграде* у плавом ромбоиду). Улазни фајл се прослеђује у главни програм, EnergyPlus Simulation Manager. У зависности од типа проблема позивају се различити софтвери и користе се различити материјални модели за решавање истих. Симулација баланса топлоте и масе се рачуна и преко зонских услова се преноси на цео модел објекта, а уколико добијене промене утичу на систем враћају назад у симулацију баланса. Са слике1 се, такође, може закључити да је energyplus модуларан и да дозвољава развој и имплементацију нових модула и материјалних модела. Након што софтвер израчуна релевантне вредности у зависности од улазних фактора и толеранције нумеричког прорачуна, EnergyPlus Simulation Manager записује резултате у облику излазних филе-ова (Резултати Прорачуна у плавом ромбоиду). Најпогоднији за алализу система је HTML филе који табеларно приказује резултате. За графички приказ ових резултата се касније могу користити програмски пакети попут Microsoft Excel-а, OpenOffice Spreadsheet-а (секција Приказати резултате у жутом пољу).

4.1. EnergyPlus

Овај софтвер моделира грејање, хлађење, осветљење, вентилацију, и друге енергетске токове као и водену мрежу у домаћинству. Укључује многе иновативне способности симулације као што су временски размаци мањи од једног сата, аутоматски системи, топлотно балансиране зоне симулације, проток ваздуха кроз све термичке зоне, термичку удобност, коришћење воде, као и природну вентилацију. EnergyPlus има своје корене у BLAST I DOE-2 програмским пакетима. Оба ова пакета, BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics- термичка анализа зграда и система термодинамике) и DOE-2, су развијени и објављени у касним седамдесетим и раним осамдесетим годинама XX века, као алати за термичке и енергетске симулације. 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 претходници, и EnergyPlus је програм за енергетску и термичку анализу и симулацију. Заснован на корисничковој 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.

4.2. Google SketchUp

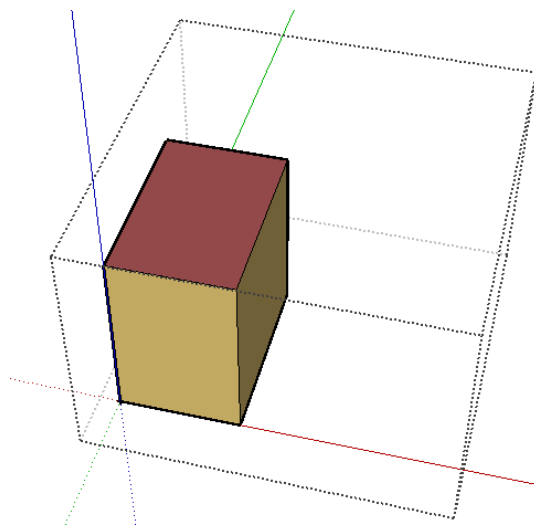
Google Skech Up (skeč-ar) је програм за 3D моделирање намењен за архитекте, грађевинске инжењере, режисере, креаторе игрица и њима сличним професијама. Програм је предвиђен да буде што флексибилнији и лакши за употребу од других CAD програма за 3D компјутерски дизајн. Овај програм се нуди као идејна алатка за развој графичких концепата, који је лакши за употребу, са једноставним окружењем (алаткама и др.). Главна карактеристика Skech Up-a је 3D Warehouse који омогућава корисницима Skech up-a 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.

Систем и метод за тродимензионално моделирање: „Околина за тродимензионалан дизајн и моделирање која омогућује корисницима да цртају скице или параметре на предметима на дводимензионалан начин, сличан оном са оловком и хартијом, који им је већ познат. Дводимензиолне, једнаке стране које је сачинио корисник се затим вуку или гурају са алаткама за уређивање са циљем лакшег и интуитивног моделирања тродимензионалне запремине и геометрије“.

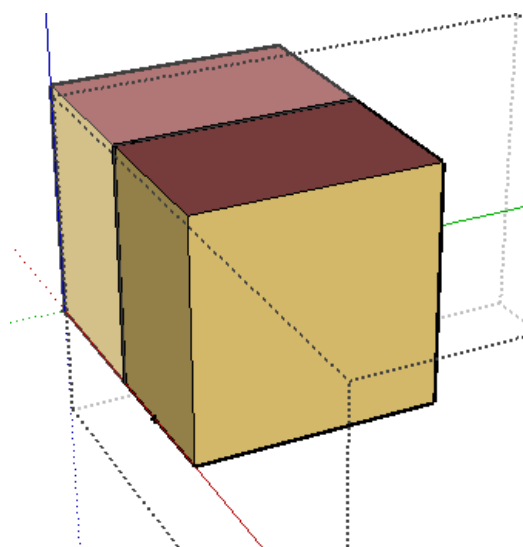
4.3. Дефинисање геометрије објекта

Пре него што се започне са радом у програму EnergyPlus потребно је дефинисати геометрију објекта помоћу програма Google SketchUp. Тај поступак ће бити описан у наредном одељку.

За добијање геометрије потребно је моделирати објекат који се симулира и експортирати га у IDF фајл Energy Plus препознаје. Само моделирање објекта се обавља у Google SketchUp-у коришћењем једноставних алата, а веза између ова два програма је Open studio(plugin) који је неопходно инсталирати. Свака просторија објекта се моделира засебно са тим што се води рачуна да се геометрије заједничких површина поклапају међусобно. Такође, треба водити рачуна и о распореду унутрашњих отвора и њиховоммеђусобном поклапању.

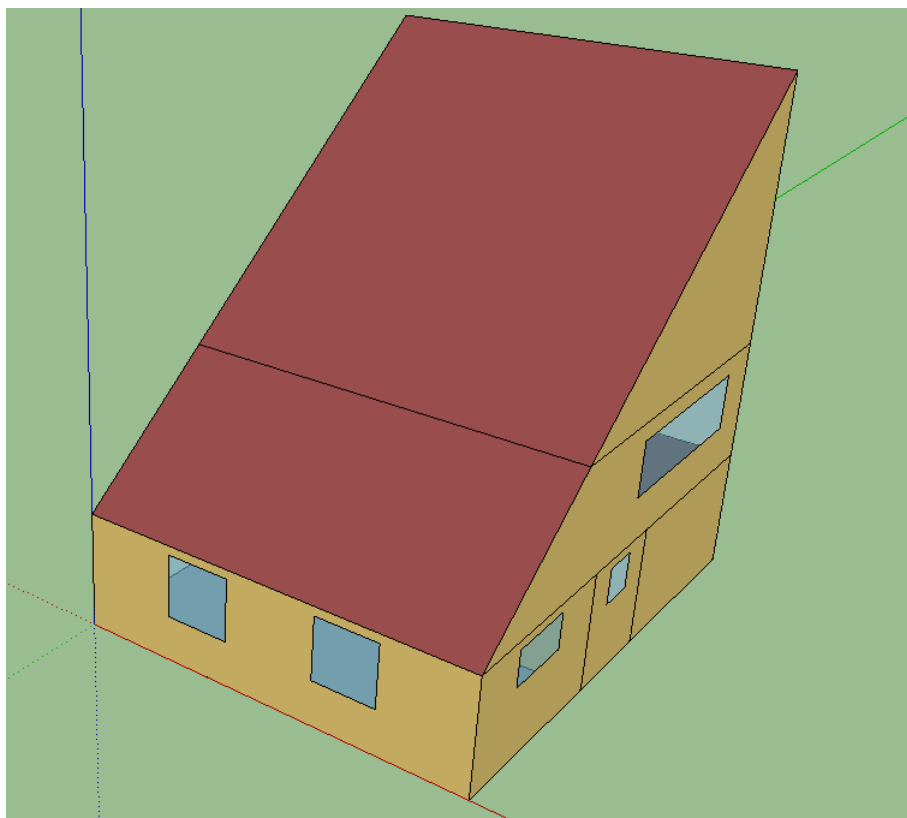


Слика 14. Модел зоне.

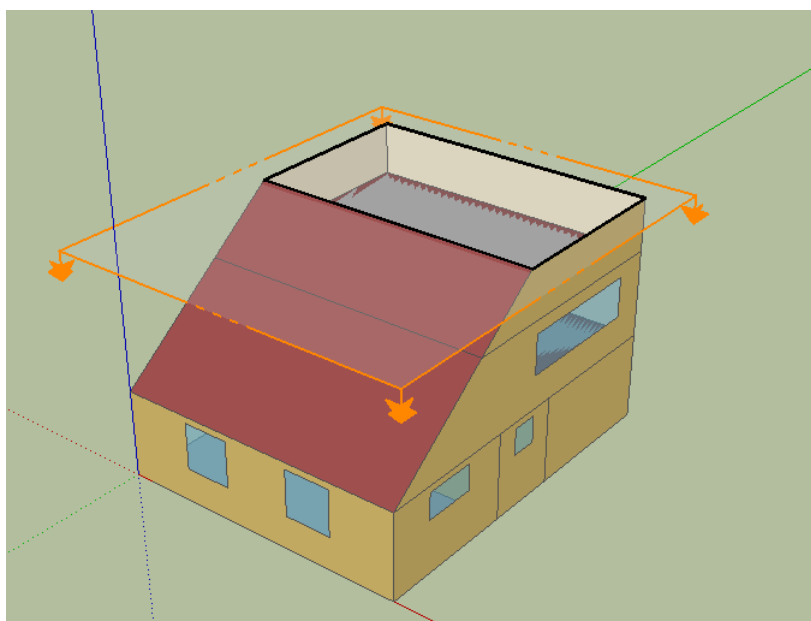


Слика 15. Модел зона са заједничком површином.

Након израде свих просторија и крова као завршног дела, потребно је изменити имена свих површина које ограничавају просторију, ради лакшег даљег руковања истим. На крају се фајл снима, односно, екпортује у IDF формат. Тако добијен IDF фајл олакшава рад у EnergyPlus-у, јер би геометрија објекта морала да се уноси укупцавањем координата свих зона објекта директно у програм, док је у овом случају добија аутоматски. О овоме ће бити још речи у делу који се односи на то, у програму EnergyPlus.



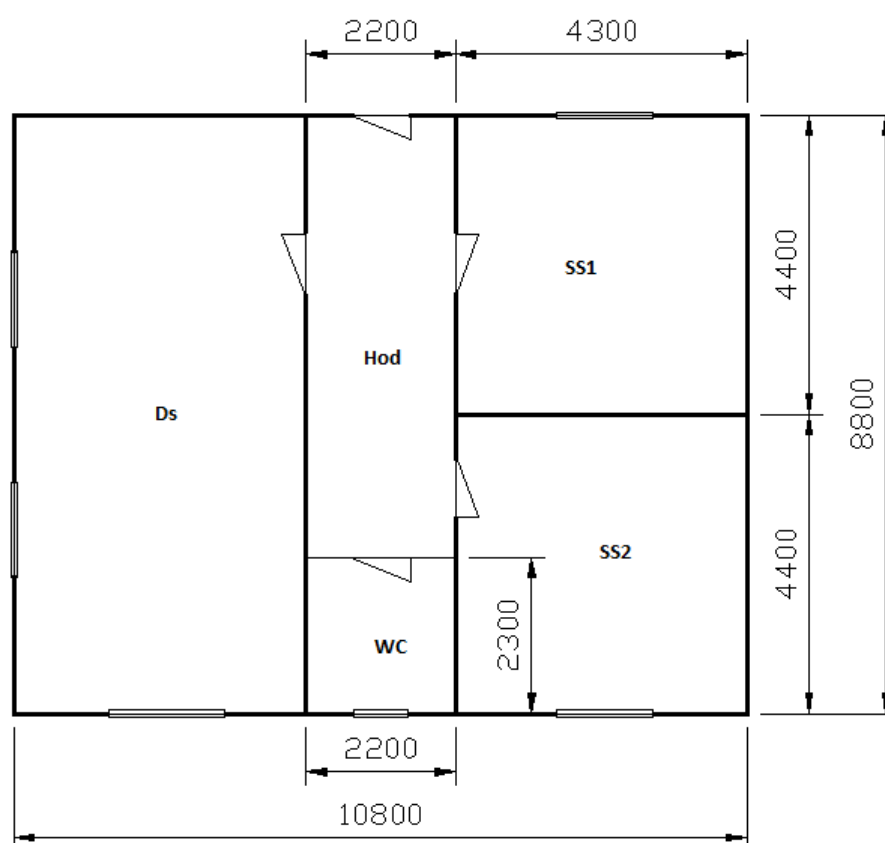
Слика 16. 3D модел стамбеног објекта.



Слика 17. 3D модел стамбеног објекта.



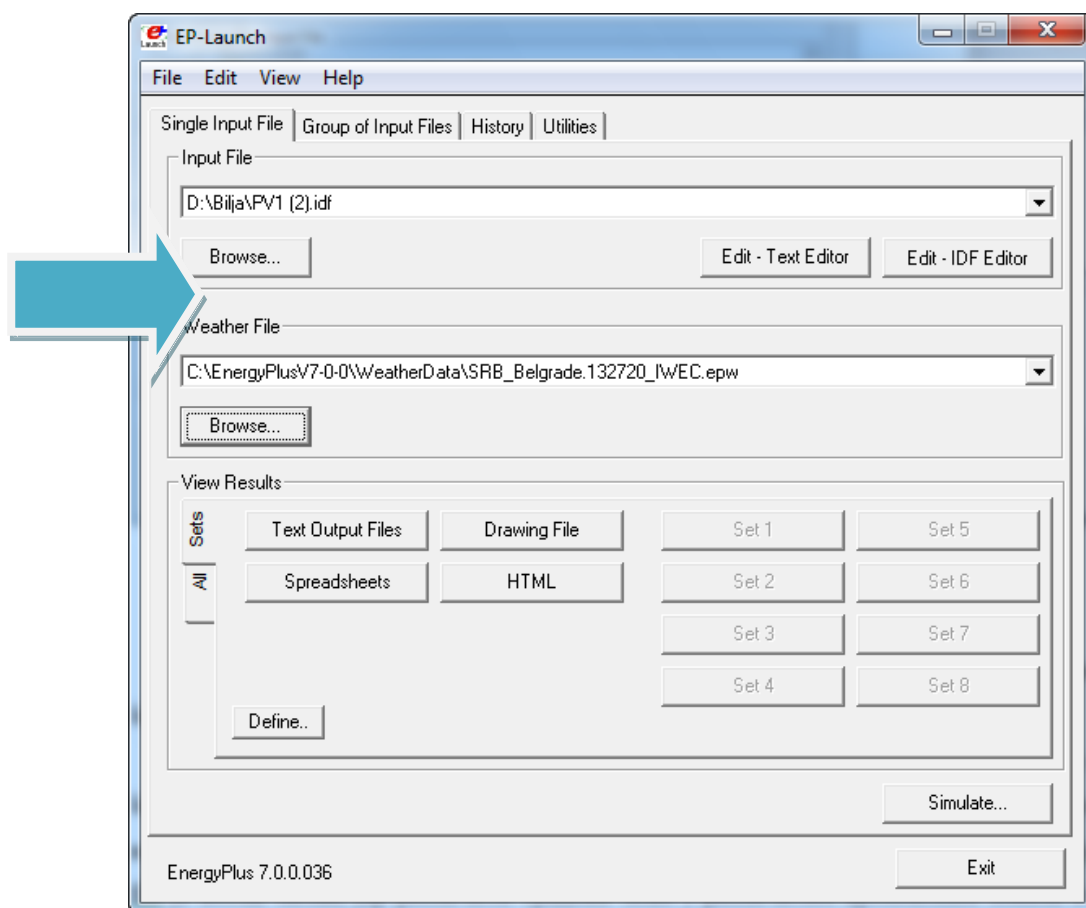
Слика 18. 3D модел стамбеног објекта.



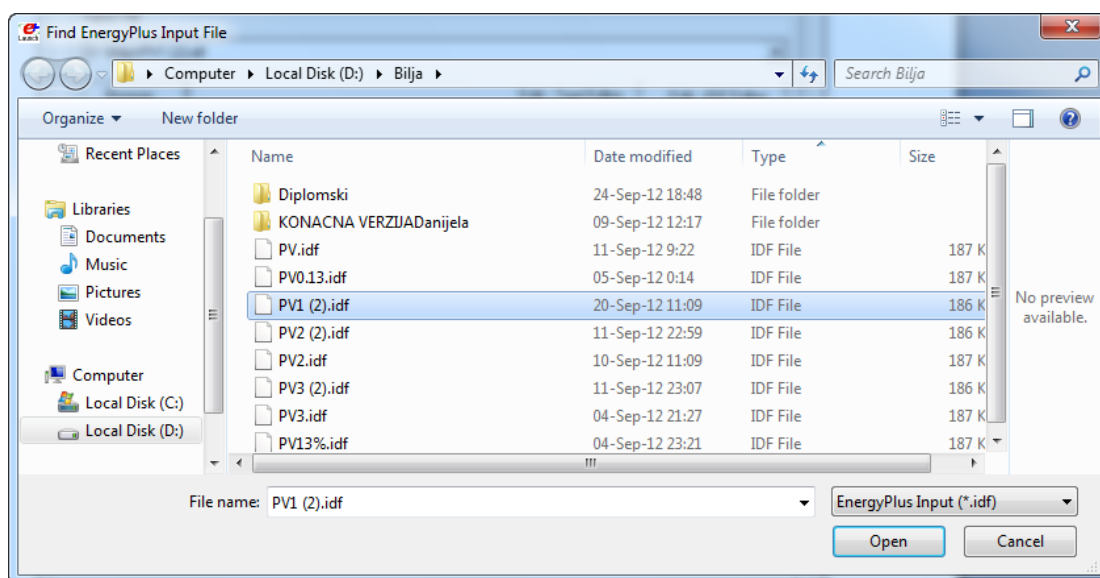
Слика 19. Основа стамбеног објекта

4.4. Основна подешавања EnergyPlus-a

Добијени IDF фајл сада само треба отворити и припремити за обраду. Једноставним дуплим кликом на сам IDF фајл отвара се главни мени (слика 21) преко ког се врше све операције у програму.



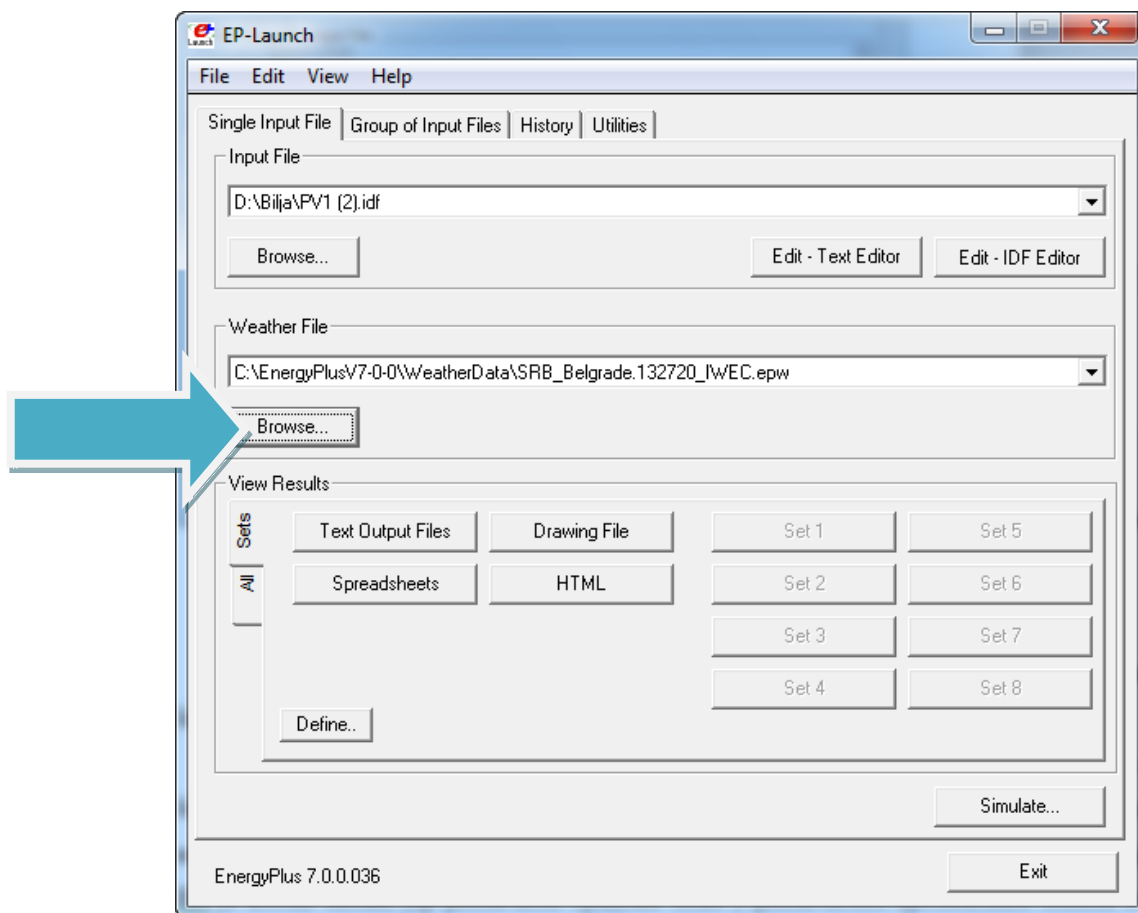
Слика 20.



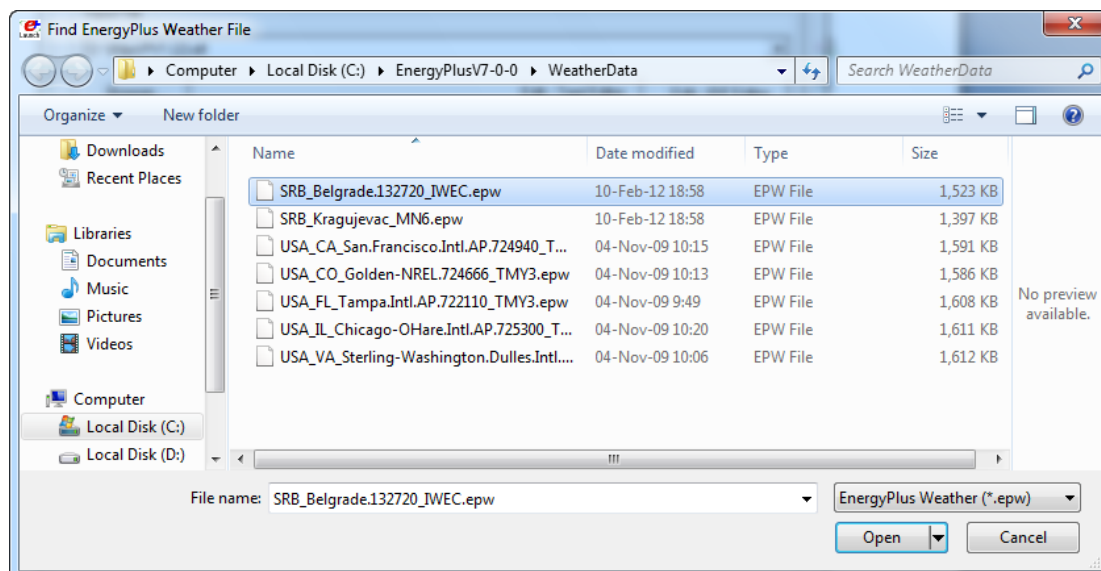
Слика 21. Поступак уношења input фајл-а

Уоквирена опција на слици 20. отвара дијалог који служи за уношење било ког IDF фајл-а из базе података који желимо да симулирамо.

Уоквирена опција Browse на слици отвара дијалог (слика 22) у коме се бира **Weather file**, односно фајл који у себи садржи податке о временским условима неког града. Ови фајл-ови су доступни на интернету и потпуно су бесплатни. Weather file је веома битан, јер различити градови леже у различитим временским зонама и у различитим климатским подручјима па ће самим тим резултати симулирања бити другачији.



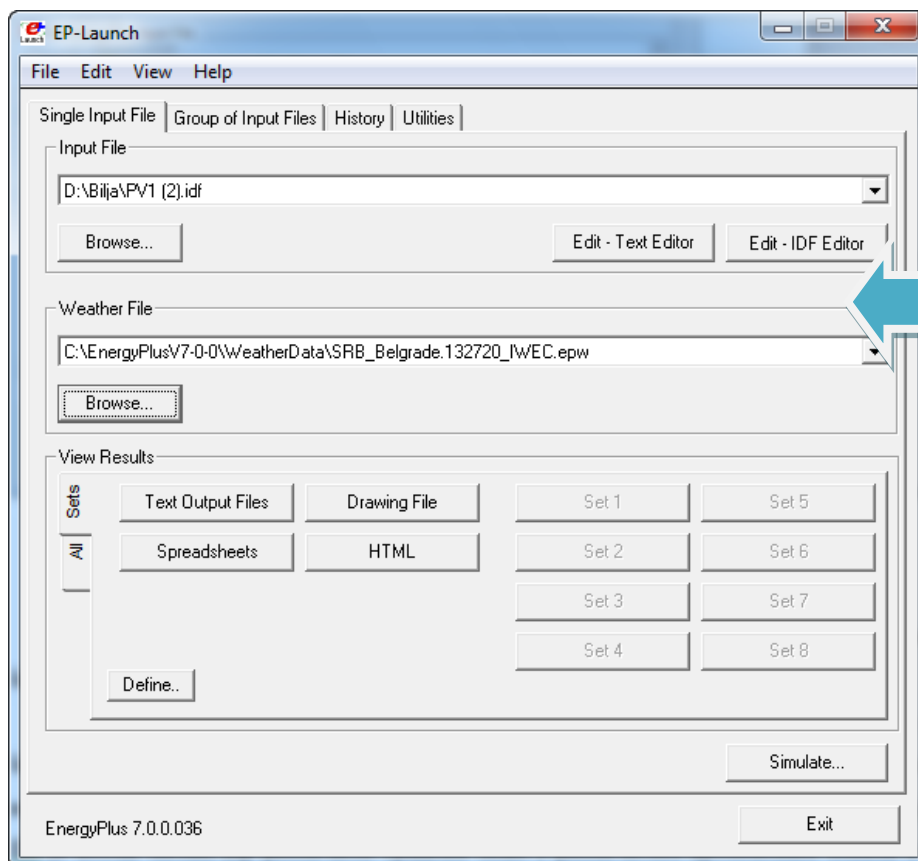
Слика 22.



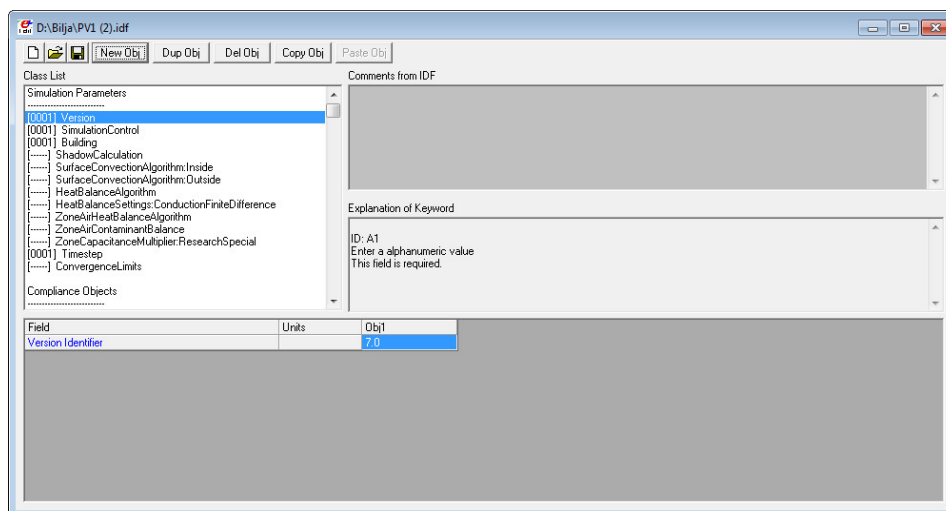
Слика 23. Поступак уношења Weather file-а.

4.5. Подешавање параметара за симулирање фотонапонских панела објекта

Да би уопште могла да се изврши симулација (у овом случају фотонапонских панела) потребно је пре тога подесити параметер, тј. програму задати одређене релације, команде, ограничења... Отварањем опције IDF Editor у главном менију, добија се списак свих група параметара (слика 23). У зависности од тога шта се симулира бирају се групе параметара које се подешавају, док постоје и параметри које морамо да задамо јер чине основу за израчунавање. Углавном су то основни подаци о објекту. Такође, сваки параметер посебно има своја битна поља која су означена плавом бојом и морају се попуњавати.



Слика 24.



Слика 25. Отварање IDF Editor-a

У наредним одељцима биће описана свака група параметара посебно, шта представља и на који начин се одређује садржај ћелија које се налазе у картицама сваке групе.

4.5.1. Simulation Parameters - Основни параметри симулације

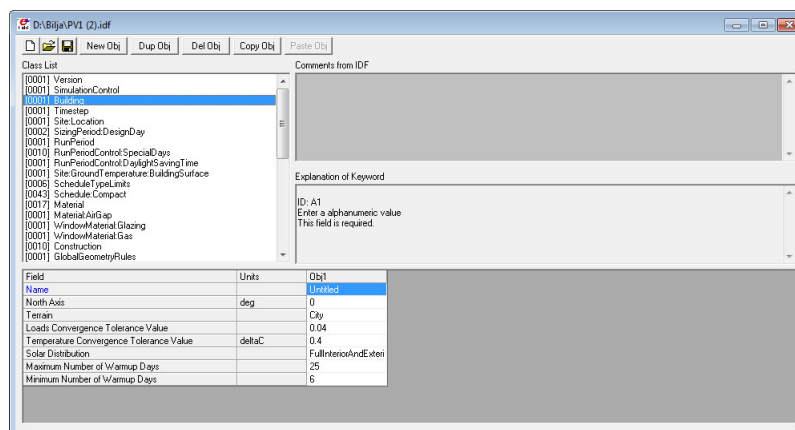
Version – програм сам учитава верзију EnergyPlus-a V7-0-0 која се користи у симулацији. За овај рад је коришћена тренутно најновија верзија.

SimulationControl - налази се више ћелија које се односе на период симулације. У овом случају је укључен период симулације директно везан за Weather file.



Слика 26. Подешавање контроле симулације везане за Weather file

Building - осим имена објекта уписује се положај зграде, одређује се терен, утицај Сунчевог зрачења на зграду, максималан број топлих дана.



Слика 27. Основна подешавања везана за објекат

SurfaceConvectionAlgorithm:Inside- задаје се алгоритам по ком програм рачуна размену топлоте на унутрашњим површинама објекта. За овај случај је коришћена опција Detailed=променљива природне конвекције базирана на температурној разлици.

Field	Units	Obj1
Algorithm		Simple

Слика 28. Одабирање алгоритма за прорачун размене топлоте

HeatBalanceAlgorithm – алгоритам топлотног баланса се задаје као функција кондукције.

Field	Units	Obj1
Algorithm		ConductionTransfer
Surface Temperature Upper Limit		200

Слика 29. Одабирање алгоритма топлотног баланса

Timestep – ова опција служи да одреди временски корак симулације, по default-у је препоручено да то буде 4.

Field	Units	Obj1
Number of Timesteps per Hour		4

Слика 30. Подешавање временског корака.

4.5.2. Location and Climate – Локација и клима

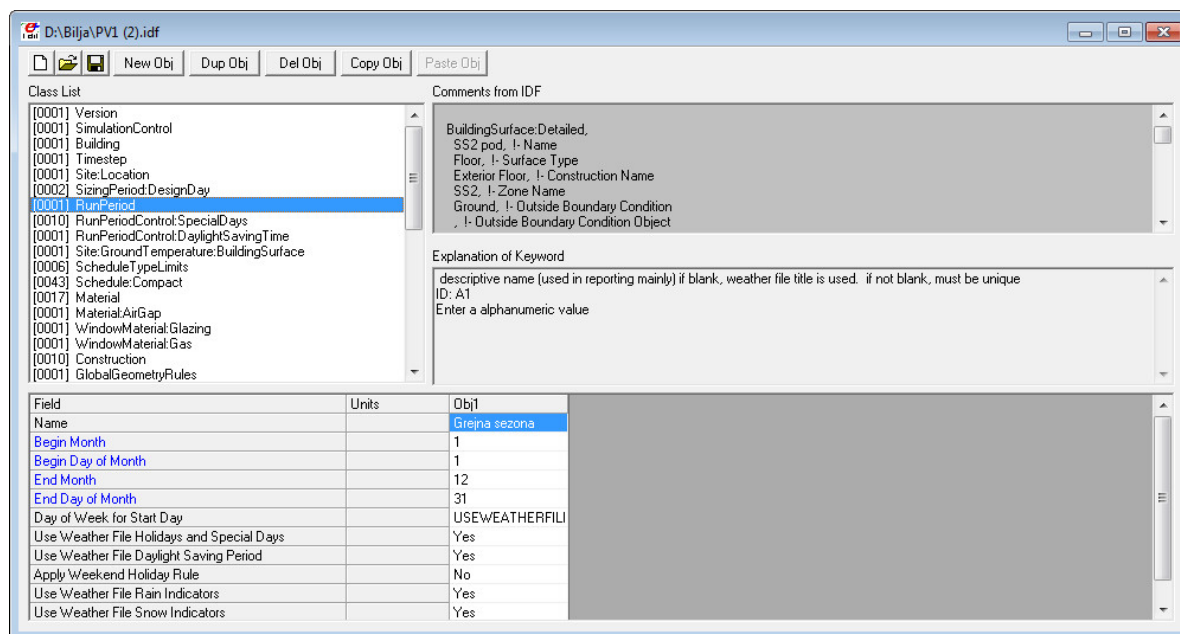
Site:Location– као што име говори, односи се на локацију објекта, поред имена локације треба унети географску ширину и дужину, временску зону и надморску висину. Самим уносом Weather file-а аутоматски добијамо ове параметре.

Field	Units	Obj1
Name		Kragujevac-Srbija
Latitude	deg	44.1
Longitude	deg	20.55
Time Zone	hr	1
Elevation	m	209

Слика 31. Подаци везани за локацију објекта.

SizingPeriod:DesignDay– односи се на временске услове у различитим периодима, тј. на њихове карактеристичне дане. За карактеристичан дан у летњем периоду узет је датум 31.07., а у зимском периоду године 1.12. Потребно је унети његове екстремне температуре, атмосферски притисак, брзину ветра, правац дувања, ведрост.

RunPeriod–период симулације, за почетни датум симулације се одабира 1.1., а крајњи 31.12. Поред овога треба нагласити да се узимају у обзир празници и дани одмора као и индикатори снега и кише.



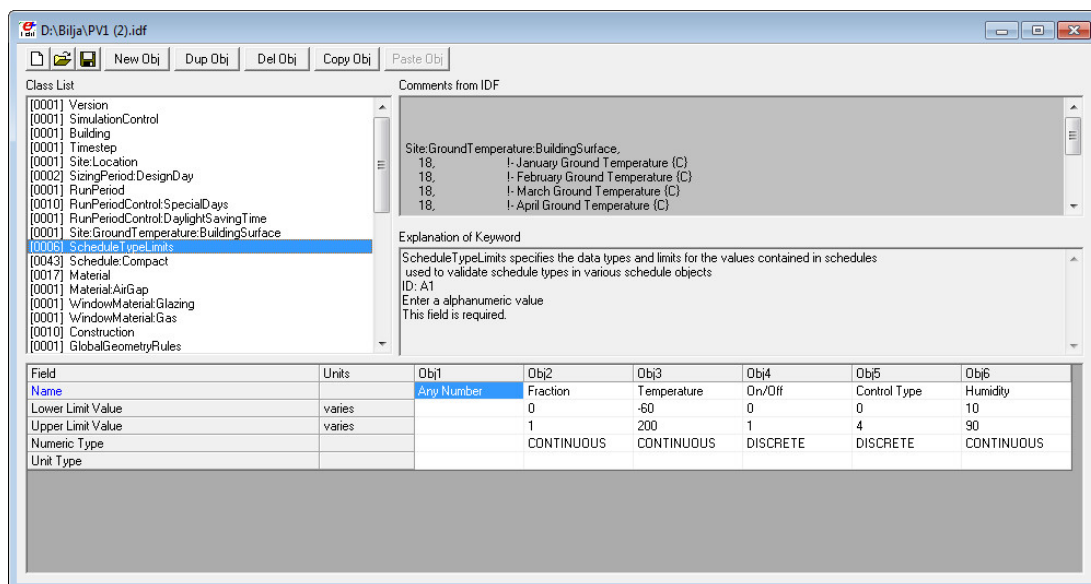
Слика 32. Одређивање периода за који се врши симулација.

Site:GroundTemperatureBuildingSurface— за температуре тла су узете температуре по default-у, тј. 18°C за свих 12 месеци.

4.5.3. Schedules – Распореди

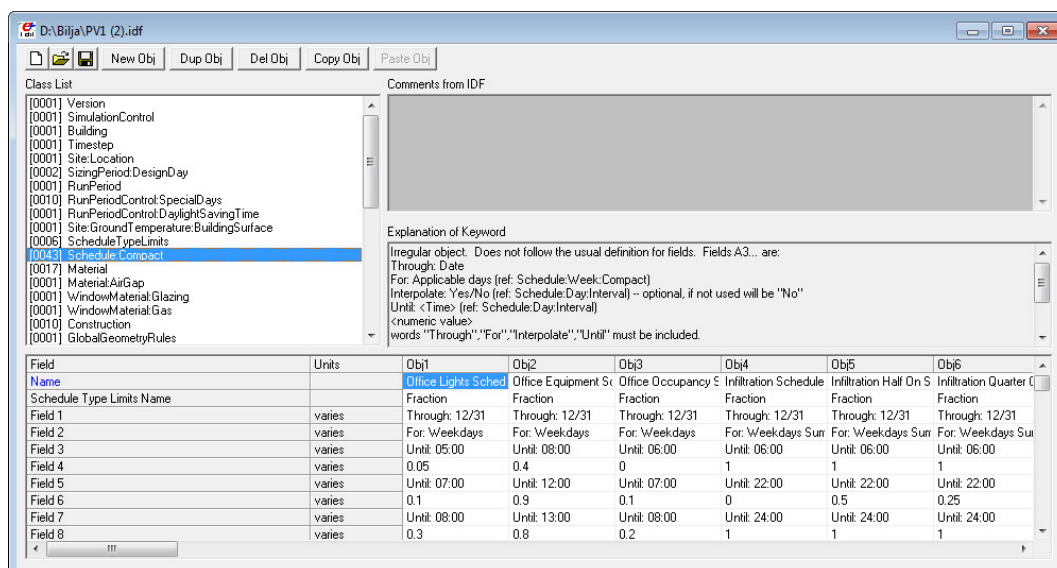
Одређивање распореда је један од најбитнијих фактора који се никако не сме заобићи. Наиме, ради се о распореду покретања појединих функција у односу на временски период који корисник задаје на основу претпоставки или искуства. При вршењу прорачуна програм мора да зна шта се дешава у објекту за сваки тренутак у току 24 часа.

ScheduleTypeLimits— пре него што се зада конкретан распоред функција потребно задати типове и мерни опсег различитих величина. Пошто се распореди праве за функције као што су рад грејања, рад климатизације, присуство људи, рад електричних уређаја итд., где фигуришу различите мерне јединице, неке мере ће се мењати дискретно, а неке континуално у свом опсегу. Дискретан тип препознаје само целе бројеве, док континуалан препознаје и децималне, што је битно када се ради о опсегу температуре или притиска.



Слика 33. Одређивање типова распореда.

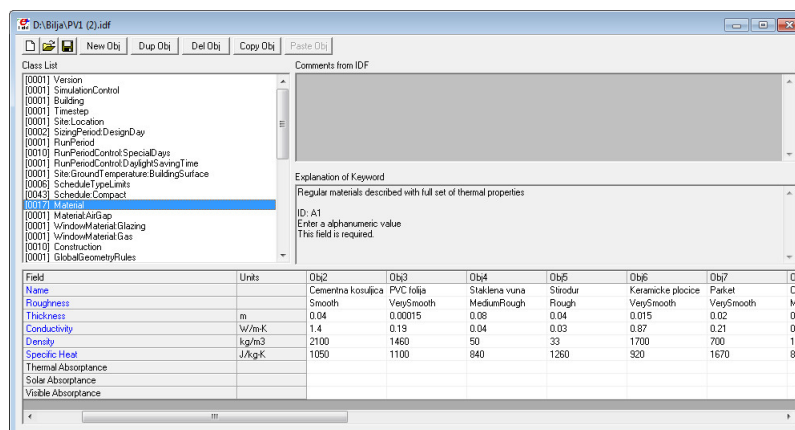
Schedule:Compact – када су типови познати задаје се шема или распоред по зонама. У овом случају је направљен распоред за присуство људи, контролу осветљења, контролу електричне опреме, грејања, термостата, вентилације и активирања саме симулације. Типове који су горе споменути се сада бирају у зависности од потребе. Поред овога треба напоменути програму за који период се врши симулација наредбом “*Through*”, за које дане конкретно наредбом “*For*” и на крају распоред по часовима наредбом “*Until*”.



Слика 34. Део картице са распоредима по зонама.

4.5.4. Surface Construction Elements – Elementi konstrukcije objekta

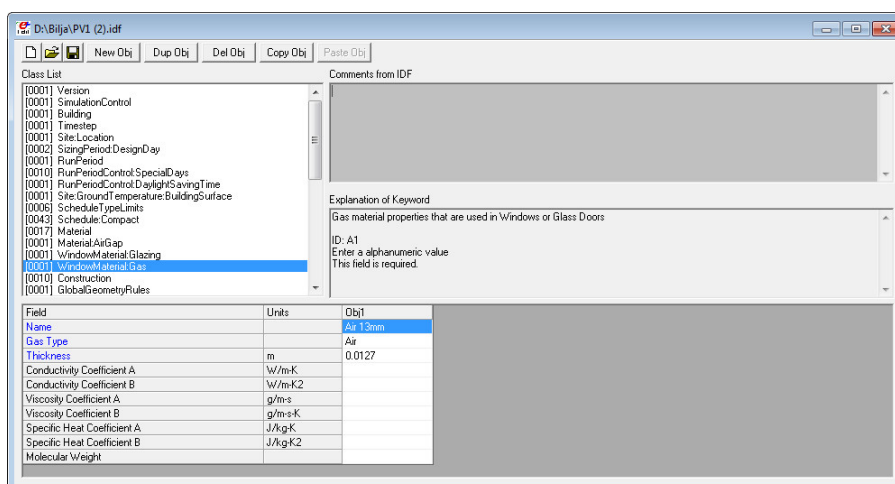
Material – да би ближе описали конструкцију објеката, али и због велике улоге у топлотном билансу морамо задати све материјале од којих је сачињена. Осим имена морамо задати и карактеристике свих тих материјала као што су храпавост, дебљина, топлотна проводљивост, густина и специфична топлота.



Слика 35. Врсте материјала који се користе у конструкцији.

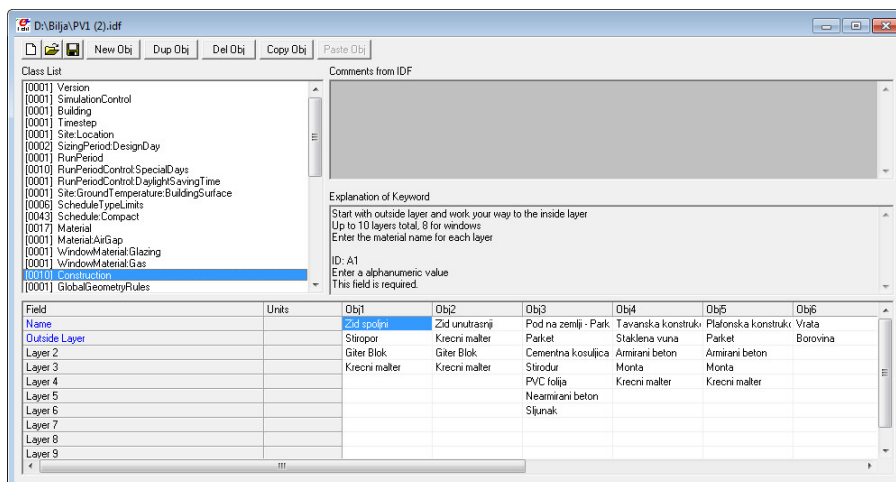
WindowMaterial:Glazing– односи се на материјал прозора, тј. на стакло и његове карактеристике. Избор стакла може знатно утицати на уштеду топлотне енергије.

WindowMaterial:Gas– гас који се налази у прозору између стакала игра знатну улогу као изолатор јер има веома низак коефицијент проводљивости топлоте.



Слика 36. Дефинисање гаса који је део прозорске конструкције

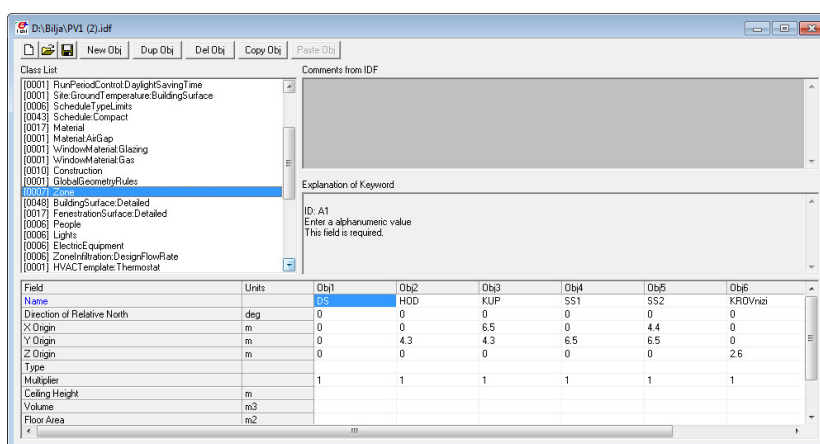
Construction – на крају ове групе је картица у којој се конструкцији објекта задају слојеви. Треба дефинисати све различите материјале које се налазе у објекту. Слојеви (материјали) се ређају по правилу које каже да се почиње увек са спољашњим слојем па све до последњег (унутрашњег). Наравно, материјали су већ учитани претходним задавањем па их треба само изабрати из падајућег менија.



Слика 37. Дефинисање конструкције површина које чине објекат.

4.5.5. Thermal Zones and Surfaces – Termičke zone i površine

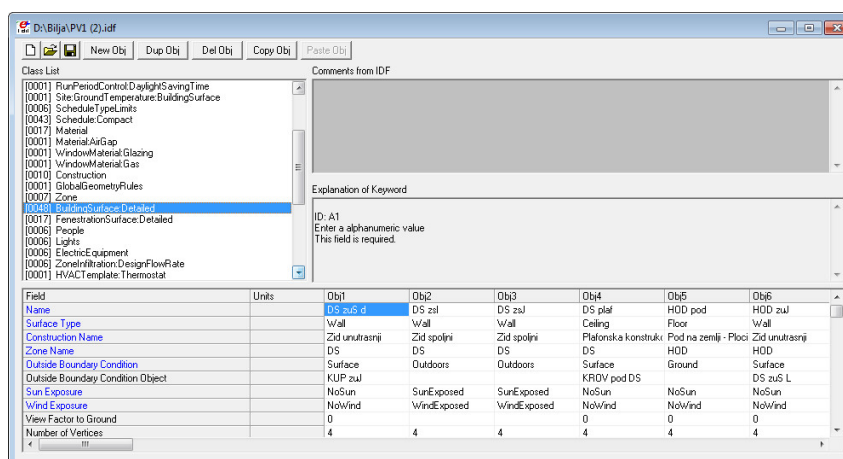
Zone – ова картица је директно добијена из програма Google SketchUp. Представља списак зона (просторија) које су учтране у оквиру објекта. Имена зона су, такође, уписана у Google SketchUp-у, а могуће је и овде их заменити. Најбитнија ставка су координате аутоматски добијене које би у супротном корисник морао сам да уноси.



Слика 38. Списак свих просторија са својим почетним координатама

DS – Дневна соба, HOD - Ходник, КУ - Купатило, SS1 – Спаваћа соба 1, SS2 – Спаваћа соба 2.

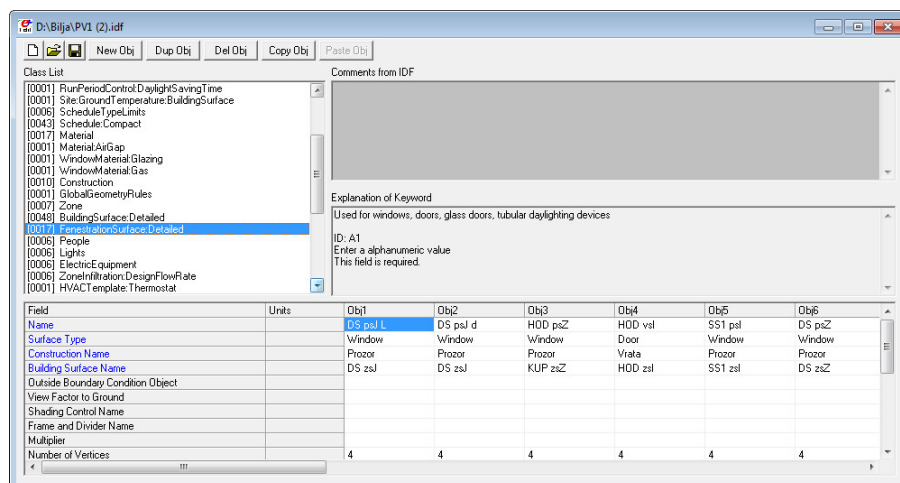
BuildingSurface:Detailed– односи се на површине просторија(омотач). Координате се, такође, добијају аутоматски, као и име површине, име зоне у којој се налази, тип површине и утицај ветра и Сунца. Наравно, подразумева се да је све ово урађено у Google SketchUp-у. Оно што је битно још да се уради је да се за сваку површину понаособ додели њена одговарајућа конструкција из картице “*Construction*”. Ипак, најбитнија ствар је упарити површине које се међусобно поклапају. Када су учртаване просторије, програм је заједничке површине прочитао посебно па му ми морамо сугерисати које да повеже.



Слика 39. Списак површина објекта са координатама.

Због великог броја површина и њихових координата, на горњој слици су приказане само неке, али су и све остале добијене истим принципом. У именима површина ознаке I, Z, S и J представљају стране света према којима су окренуте.

FenestrationSurface:Detailed– за разлику од претходне картице, ова се односи на отворе у зонама тј. прозоре и врата, све остало се добија на потпуно исти начин као код омотача.

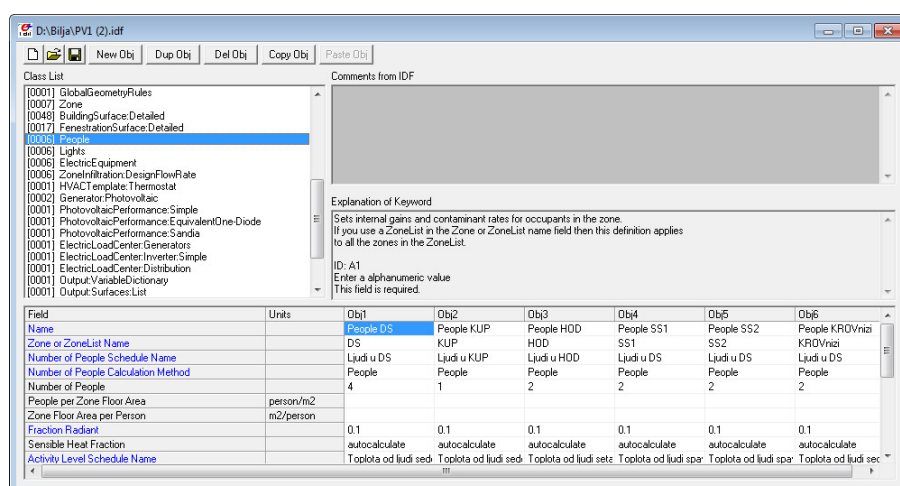


Слика 40. Списак отвора објекта са координатама.

4.5.6. Internal Gains– Унутрашњи добици топлоте

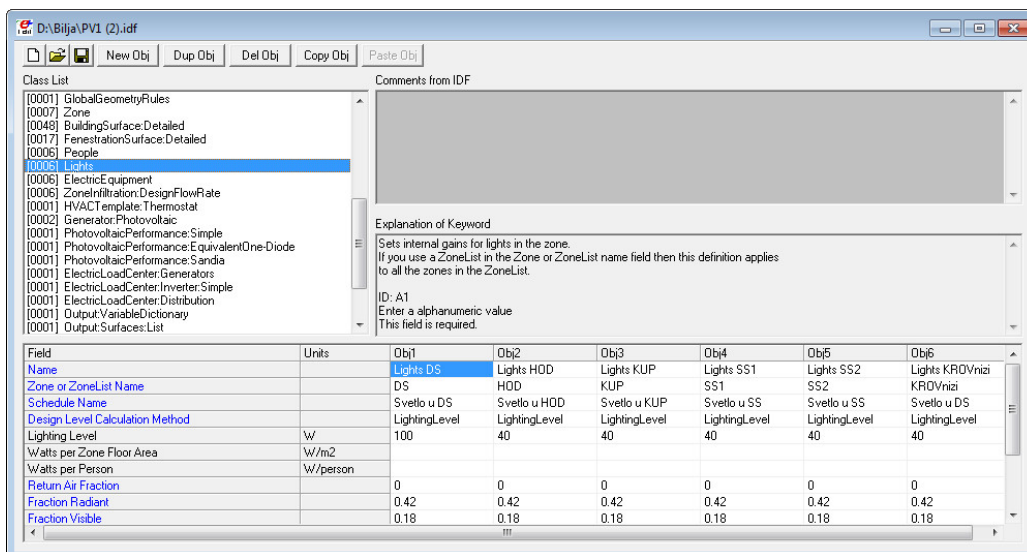
Осим спољашњих добитака топлоте, постоје и унутрашњи добици. Сваки електрични уређај емитује одређену количину топлоте, такође расвета и сами људи који се налазе у просторији, тако да је потребно узети у обзир ту енергију при коначним прорачунима.

- **People** – у свакој од просторија треба одредити колико људи борави у току дана. Уписује се максималан број људи за ту просторију а потом се задаје распоред који је претходно направљен. На тај начин је познато колико је људи у просторији у сваком тренутку.



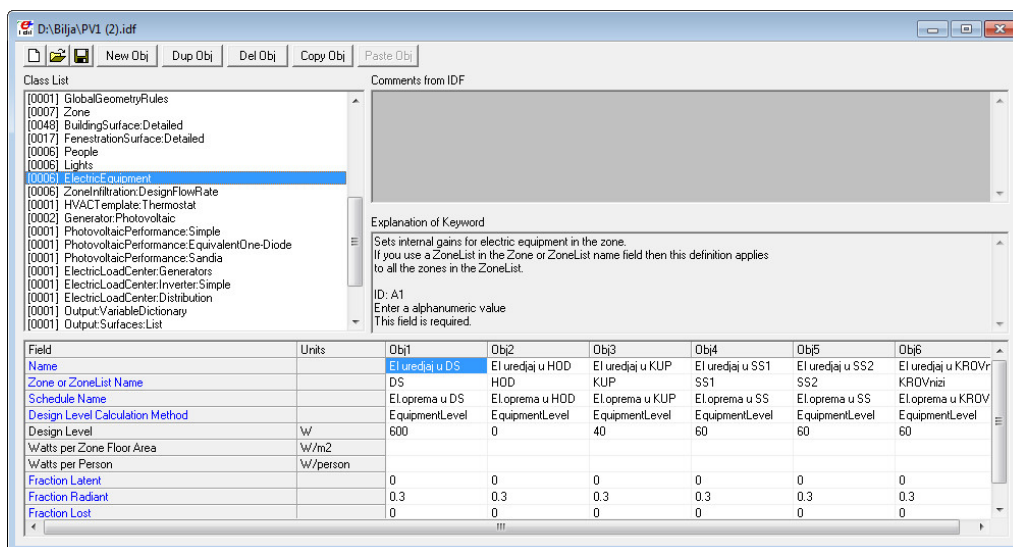
Слика 41. Дефинисање окупације просторија

- **Lights** – осветљење, осим основне намене, одаје топлоту коју треба одредити за сваку просторију задавањем инсталиране снаге и додељивањем распореда укључења.



Слика 42. Дефинисање осветљења по просторијама.

- **ElectricEquipment** – на крају ове групе имамо електричну опрему која знатно више утиче на унутрашњу топлоту. Ту се, пре свега, мисли на веће потрошаче електричне енергије као што су електрични шпорети, фрижидери...



Слика 43. Дефинисање електричне опреме по просторијама.

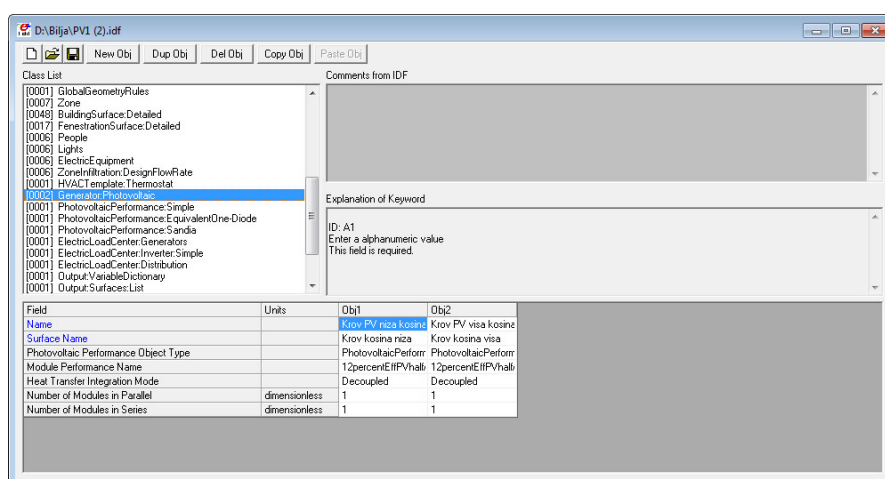
4.6. Фотонапонски модули

Energy plus садржи Photovoltaics.f90 у коме су унета три модела фотонапонских панела познатији као *Simple*, *Sandia*, *EquivalentOne-Diode*, а избор једног од њих ће одредити математички модел (и улазне податке) који се користе за одређивање енергије коју произведу фотонапонски панели, конверзијом Сунчеве енергије у електричну.

Имајмо на уму да неки изрази из терминологије који се користе да се објасни фотонапон преклапају са терминологијом која се користи у Fortran програмима. Реч модул може да се односи на ФН панел или ентитет програмирања у програму Fortran 90. Модел може да се односи на производни модел произвођача за одређену врсту ФН модула или на математички модел који се користи за инжењерску анализу. Низ може да се односи на колекцију ФН модула заједно повезаних или на математичке променљиве са више елемената.

Предпоставља се да фотонапонски модули увек раде када је укупно зрачење Сунчеве енергије веће од 0.3 V, уколико тај услов није испуњен онда модули не дају никакву снагу.

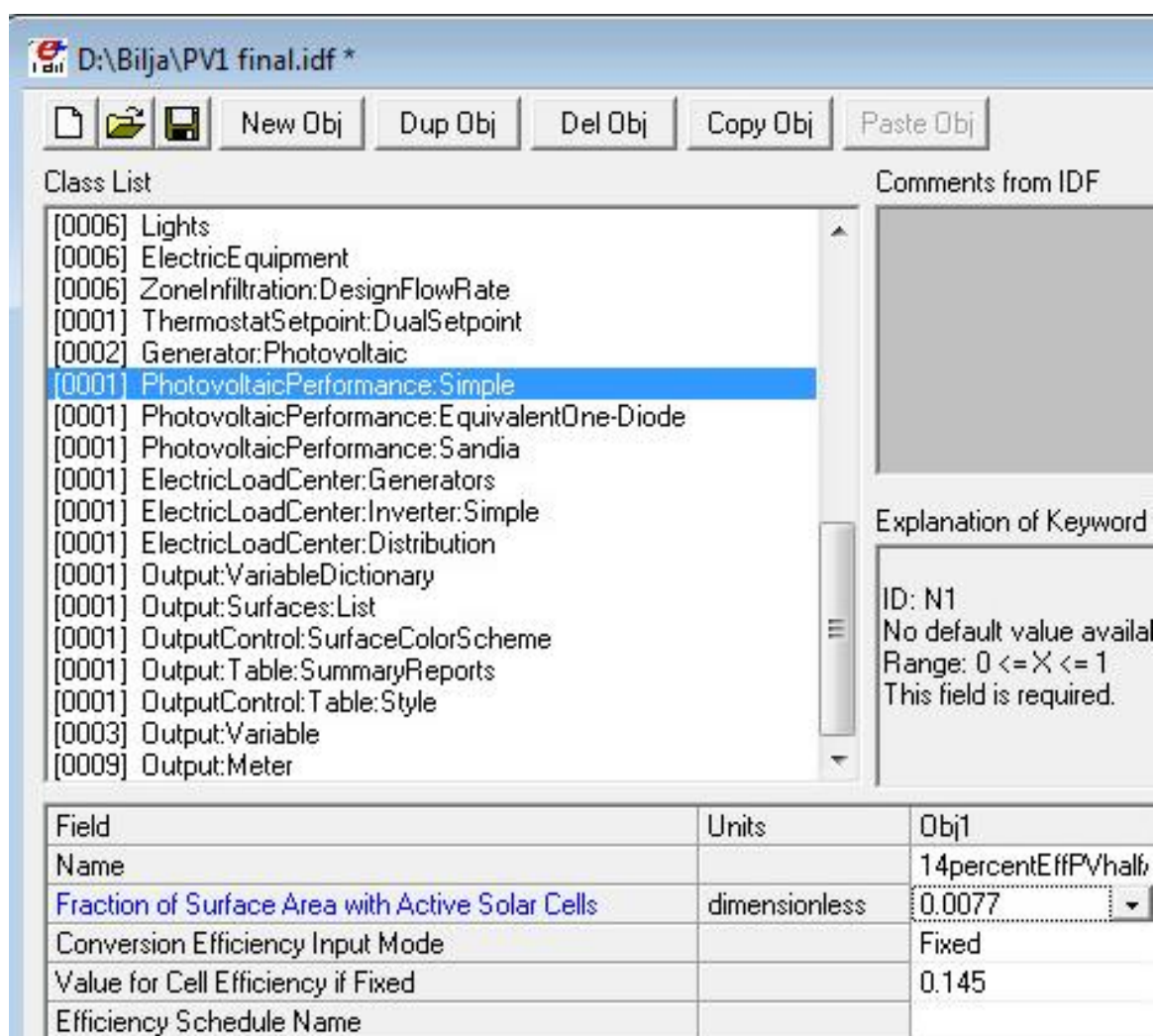
ФН модулима управља центар електричног оптерећења. Центар оптерећења је "оптерећење" у вези са опремом за генерисање, али је и "центар снабдевања" за остатак зграде. ФН модули треба да буду повезани са Центаром електричног оптерећења: додељује се објектима који имају тип магистрале наизменичне струје.



Слика 44. Фотонапонски генератори

4.6.1. Simple модел

Simple модел (Слика 45) објекат је најједноставнији модел за предвиђање фотонапонске производње енергије. У овом моделу корисник одређује ефикасност са које површине 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 учинка.



Слика 45. Simple фотонапонски модел

Tabela 2. Општа номенклатура за ФН модел

Matematički opis

Matematička

promenljiva	Opis
P	Електрична снага произведена фотонапонски [W]
A_{surf}	Укупна површина [m^2]
f_{activ}	Део површине са активним соларним ћелијама []
G_T	Укупно сунчево зрачење на ПВ низ [W/m^2]
η_{cell}	Ефикасност модула конверзије []
η_{invert}	Ефикасност конверзије једносмерне у наизменичну струју []

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

$$P = A_{surf} \cdot f_{activ} \cdot G_T \cdot \eta_{cell} \cdot \eta_{invert} \quad (7)$$

На десној страни ове једначине, само G_T је *израчунат* од стране EnergyPlus, а остало су кориснички улази. Претпоставља се да је енергетски ниво константна током временског корака када стигне на производњу енергије.

Постоје два начина који могу бити изабрани од стране корисника који регулишу како је ФН систем спојен са површином зграде. Ако је изабран режим интеграције као "растављен" онда се не врше подешавања на рачун добијене енергије у виду електричне енергије. Ако је изабран режим интеграције као "интегрисани" онда се енергија добијена у виду електричне енергије уклања из прорачуна површинских преноса топлоте користећи термин потопити. Овај термин потопити заостаје у односу на претходни временски корак.

4.6.2. 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 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.

Табела 3. Опишта номенклатура за ФН модел

Математичка

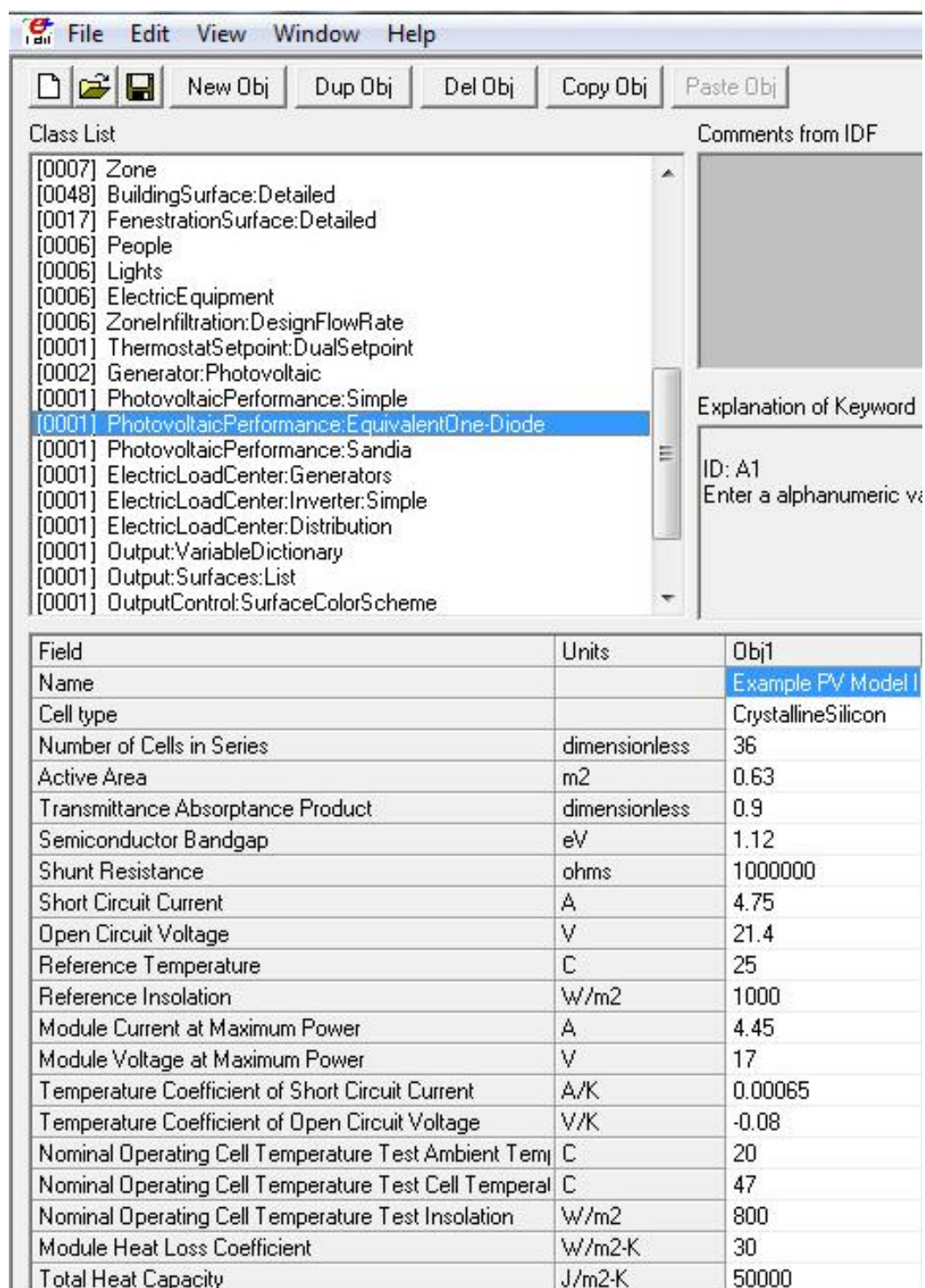
променљива

Опис

β	Нагиб ФН низова [°]
γ	Емпиријски параметер подешавања ФН криве
ϵ_{γ}	Опсег полупроводника [eV]
η_c	Ефикасност конверзије модула
μ_{Isc}	Температурни коефицијент струје кратког споја [A/K]
$\mu_{\zeta_{oc}}$	Температурни коефицијент струје отвореног кола [V/K]

θ	Упадни угао соларног зрачења [$^{\circ}$]
$\tau\alpha$	Трансмисионо абсорпциони модул
$\tau\alpha_{\text{normal}}$	Модул трансмисионо-абсорпционе производње при нормалним условима
G_T	Укупно зрачење на ФН низ
$G_{T, \text{beam}}$	Компонента снопа зрачења
$G_{T, \text{diff}}$	Компонента расипања зрачења
$G_{T, \text{gnd}}$	Компонента зрачења коју упије тло
$G_{T, \text{NOCT}}$	Случајно зрачење при NOCT условима
$G_{T, \text{ref}}$	Случајно зрачење при референтним условима
I	Струја
I_L	Фотоструја модула
$I_{L, \text{ref}}$	Фотоструја модула при референтним условима
I_o	Струја обрнутог засићења диоде
$I_{o, \text{ref}}$	Струја обрнутог засићења диоде при референтним условима
I_{sc}	Струја кратког споја
$I_{sc, \text{ref}}$	Струја кратког споја при референтним условима
I_{mp}	Струја у тачки максималне снаге дуж струјно-напонске криве
$I_{mp, \text{ref}}$	Струја у тачки максималне снаге дуж струјно-напонске криве, референтни услови
I_{AM}	Бездимензијски модификатор упадног угла
K	Болцманова константа [J/K]
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 модула [Ω]
R_{sh}	Отпорност споредног вода модула [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 низа
V	Напон
V_{mp}	Напон у тачки максималне снаге дуж струјно-напонске криве
$V_{mp, ref}$	Напон у тачки максималне снаге дуж струјно-напонске криве, референтни услови
V_{oc}	Напон отвореног кола
$V_{oc, ref}$	Напон отвореног кола у референтним условима [V]

Слика 46. *EquivalentOne-Diode* фотонапонски модел

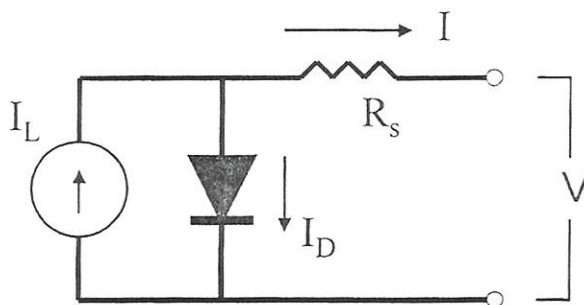
Математички Опис**1. Четворопараметарски модел**

Еквивалентни четворопараметарски модел је развијен у великој мери од стране Townsend [1989] и разрађен од стране Duffie и Beckman [1991]. Овај модел је први пут укључен у компоненте TRNSYS симулационог пакета од стране Eckstein [1990]. EnergyPlus модул користи Eckstein-ов модел за кристалне ФН модуле, при чему у четворопараметарском моделу претпоставља да је нагиб струјно-напонске криве нула у стању кратког споја:

$$\left(\frac{dI}{dV} \right)_{V=0} = 0 \quad (8)$$

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.

Четворопараметарско еквивалентно коло је приказано на следећој слици:



Слика 47. Еквивалентно коло у четворопараметарском моделу

V је напон оптерећења I је струја која протиче кроз оптерећења и ФН.

Одређивање карактеристика у радним условима

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

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

$$I = I_L - I_o \left[\exp \left(\frac{q}{\gamma k T_c} (V + I R_s) \right) - 1 \right] \quad (9)$$

P_c и γ су константе. фотоструја I_L , линеарно зависи од упадног зрачења:

$$I_L = I_{l,ref} \frac{G_T}{G_{t,ref}} \quad (10)$$

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:

$$\frac{I_o}{I_{0,ref}} = \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}} \right)^3 \quad (11)$$

Једначина (9) даје тренутну струју као функцију напона. Када се I_o и I_L одреде из једначина (10) и (11), 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.

Израчунавање $I_{L,ref}$, $I_{0,ref}$, γ и 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 и 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 алгоритама коришћених за добијање карактеристика за четири еквивалентна кола.

Три од ових вредности, $I_{L,ref}, I_{o,ref}, \gamma$, могу се алгебарски израчунати. Први корак је да се замени струја и напон у једначини (9) за отворено коло кратак споја, за услове максималне снаге:

$$0 = I_{L,ref} - I_{o,ref} \left[\exp \left(\frac{q}{\gamma k T_{c,ref}} V_{oc,ref} \right) - 1 \right] - \frac{V_{oc,ref}}{R_{sh}} \quad (12)$$

$$I_{sc,ref} = I_{L,ref} - I_{o,ref} \left[\exp \left(\frac{q I_{sc,ref} R_s}{\gamma k T_{c,ref}} \right) - 1 \right] - \frac{I_{sc,ref} R_s}{R_{sh}} \quad (13)$$

$$I_{mp,ref} = I_{L,ref} - I_{o,ref} \left[\exp \left(\frac{q}{\gamma k T_{c,ref}} (V_{mp,ref} + I_{mp,ref} R_s) \right) - 1 \right] - \frac{V_{mp,ref} + I_{mp,ref} R_s}{R_{sh}} \quad (14)$$

У сваком случају "-1", термин се може 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 да би дала следећа три израза $I_{L,ref}, I_{o,ref}, \gamma$:

$$I_{L,ref} \approx I_{sc,ref} \quad (15)$$

$$\gamma = \frac{q(V_{mp,ref} - V_{oc,ref} + I_{mp,ref} R_s)}{k T_{c,ref} \ln \left(1 - \frac{I_{mp,ref}}{I_{sc,ref}} \right)} \quad (16)$$

$$I_{o,ref} = \frac{I_{sc,ref}}{\exp \left(\frac{q V_{oc,ref}}{\gamma k T_{c,ref}} \right)} \quad (17)$$

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:

$$\frac{\partial V_{oc}}{\partial T_c} = \mu_{voc} = \frac{\gamma k}{q} \left[\ln \left(\frac{I_{sc,ref}}{I_{o,ref}} \right) + \frac{T_c \mu_{isc}}{I_{sc,ref}} - \left(3 + \frac{q\epsilon}{AkT_{c,ref}} \right) \right] \quad (18)$$

где је:

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

"TRNSYS PV model" користи итеративну рутину за претрагу у ове четири једначине за израчунавање еквивалентне карактеристике кола. Први корак је да подесите горње и доње границе за параметар серијске отпорности R_s : физичка ограничења захтевају да вредност R_s лежи између 0 и вредност таква да даје $\gamma = N_s$. Почетна претпоставка вредности R_s се налази између ових граница, γ и $I_{o,ref}$ се налазе из једначина (16) и (17), док једначина (15) даје тривијално решење $I_{l,ref}$. Модел тада користи једначине (18) да упореди аналитичке и каталошке вредности за μ_{voc} . Када се све остале варијабле 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 вредности. Исто тако, горња граница је постављена на тренутну вредност, ако је израчуната вредност μ_{voc} превелика. По ресетовања горње или доње граница за R_s , нова претпостављена вредност се налази постављањем граница на просечне. Овај поступак се понавља док год R_s и μ_{voc} не конвергирају. Имајте на уму да се за претпоставља да су стални и да се израчунавају само на први позив у $I_{L,ref}, I_{o,ref}, \gamma$ и R_s

симулацији. Алтернативно, корисник може унети познати серијски отпор тако што ћете унети позитивну вредност у idf . У овом случају итеративна рутина описана горе се прескаче и једначине (15), (16) и (17) налазе директно из задате вредности R_s .

$$I_{L,ref}, I_{o,ref}, \gamma$$

Радна температура модула

ФН модел користи један од пет метода за одређивање податка о температури ћелије. Температура ћелија ФН модула је важна, јер што је температура панела већа, то је нижи њен електрични излаз. Метод израчунавања температуре ћелије је изабран од стране корисника у EnergyPlus idf фајлу преко параметра 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 Beckman (1991) за процену температуре ћелије. Ово се заснива на стандардним NOCT (Номинална радна температура ћелија) мерењима како би се израчунала температуре 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 [Beckman i Dufi, 1991]. Вредности за GT. NOCT излагања Сунцу и температури, $T_{A,NOCT}$ су обично 800 V/m^2 и 20 °C. η_c је ефикасност конверзије модула, који варира у зависности од амбијенталних услова, $\tau\alpha$ је константа дефинисана од стране корисника.

Једначина је:

$$T_c = T_a + \frac{\left(1 - \frac{\eta_c}{\tau\alpha}\right)}{\left(\frac{G_T \tau\alpha}{U_L}\right)} \quad (19)$$

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

$$T_{cell} \big|_t = T_{ambient} + T_{cell} \big|_{t-1} - T_{ambient} e^{\frac{-UL}{Cap} \Delta t} \quad (20)$$

Другим речима, температура ћелије је функција претходне температуре ћелија и топлотног капацитета материјала ФН модула.

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

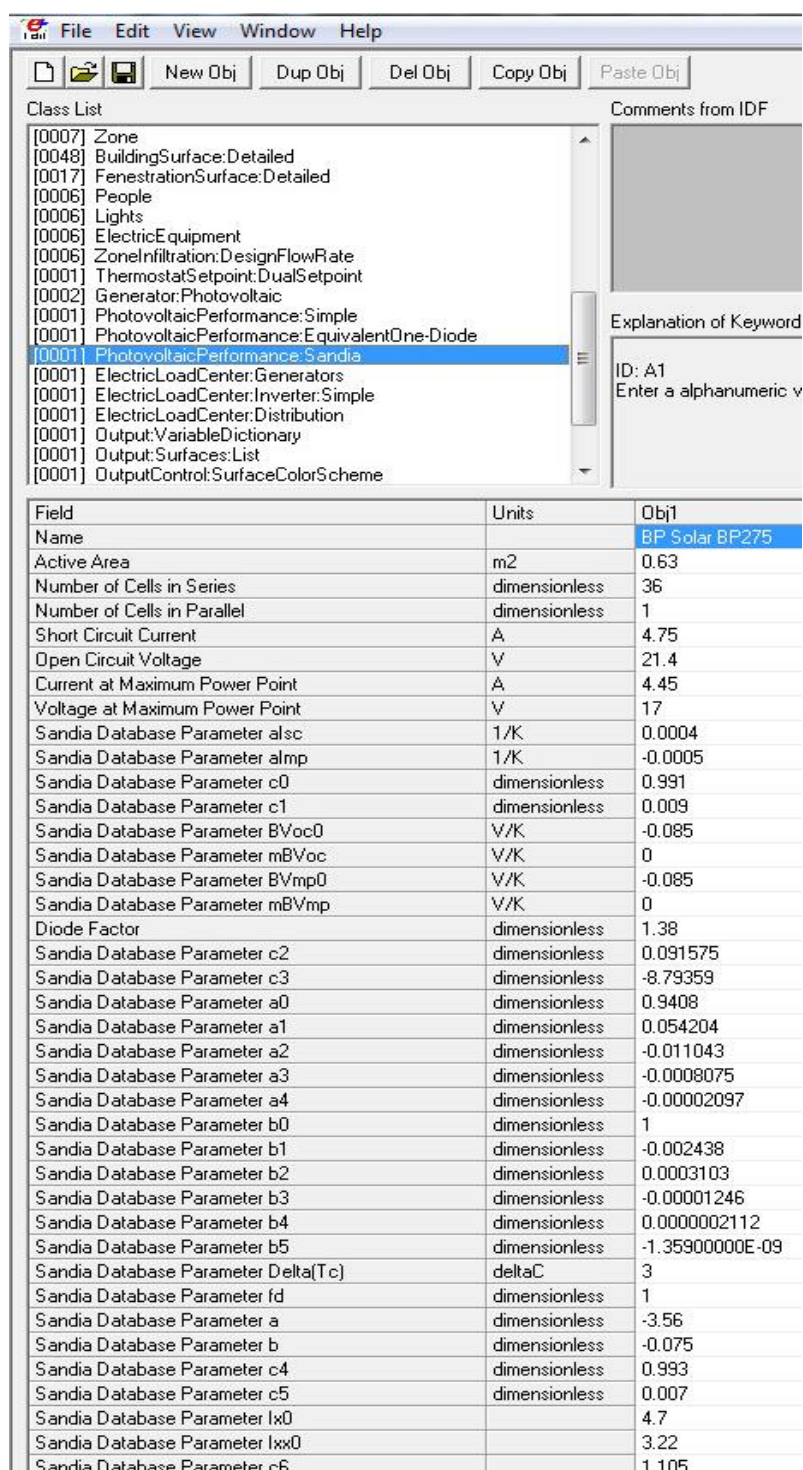
Ако корисник наводи "Integrated Transpired Collector" за овај параметар, онда резултат за температуру неглазиране површине колектора се користи за температуру ћелије. Такође енергија добијена из површине колектора, као електрична енергија се добија коришћењем изворног термина у моделирању температуре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

Модули са мултинизовима

Електрични прорачуни разматрани у претходним одељцима баве се само са једним модулом. EnergyPlus ФН компонента се може користити за симулацију низова са било којим бројем модула. Idf дефинише број модула у серији (NS) и модула у паралели (NP) за цео низ. Укупан број модула у низу је производ NS и NP. Када се симулира само један модул и 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.

4.6.3. Sandia фотонапонски модел



Слика 47. Sandia фотонапонски модел

Трећи модел доступан у EnergyPlus за предвиђање електричне енергије коју генерише фотонапон се назива Sandia модел. Овај модел се заснива на раду извршеним у лабораторији Sandia National, Albukuerkue, NM Dejvid 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 Sandia у FORTRAN77 као прилагођени тип (Type101) за TRNSIS компјутерски програма.

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

Математички Опис

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

Табле 4. Номенклатура за Sandia ФН модел

Математичка

Опис

променљива

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)
fd	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, 1.38066E-23 (J/k)
q	Основно наелектрисање, 1.60218E-19 (Kulon)
T_c	Температура ћелија унутар модула ($^{\circ}C$)
$\delta(T_c)$	'Топлотни напон' по ћелији при температури T_c , приближно 1 V за типичан 26-то ћелијски силицијумски модул
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 bezdimenzijski, C_3 is 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
AMa	Апсолутна маса ваздуха
AOI	Соларни угао учесталости (степени)
$f_1(AM_a)$	Емпиријски полином који се користи да повеже струју кратког споја са спектром сунчевих зрака преко масе

	ваздуха
$f_2(\text{AOI})$	Емпиријски полином који се користи да повеже струју кратког споја са соларним углом учестаности
$a_0, a_s, a_2, a_3, 0_4$	Емпиријски коефицијенти за $f_1(\text{AM}_a)$ полином
$b_0, b_i, b_2, b_3, b_4,$ b_5, b_6	Емпиријски коефицијенти за $f_2(\text{AOI})$ полином
T_o	Референтна температуре хелије, 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 $V = 0.5 V_{\text{oc}}$ и референтним условима
I_{xho}	Струја при $V = 0.5 (V_{\text{mp}} + V_{\text{oc}})$ и референтним условима
α_{lsc}	Нормализован коефицијент температуре за (1/°C)
α_{Imp}	Нормализован коефицијент температуре за I_{mp} (1/°C)
$\beta_{V_{\text{oc}}}(E_e)$	Температурски коефицијент за напон отвореног кола као функција E_e
$\beta_{V_{\text{OCO}}}$	Температурски коефицијент за напон отвореног кола при референтним условима
$m_{\beta_{V_{\text{OCO}}}}$	Коефицијент за ирадијације зависност од коефицијента отвореног кола снага-напон, често једнак нули (V/°C)
$\beta_{V_{\text{mp}}}(E_e)$	Температурски коефицијент за максимални напон модула као функција E_e
$\beta_{V_{\text{mpo}}}$	Температурски коефицијент за максимални напон модула при референтним условима

$m_{\beta V_{mpo}}$	Коефицијент за иррадианце зависност од коефицијента максималне температуре снага-напон, често једнак нули ($V/^{\circ}C$)
T_m	Температура ФН модула на позадинској површини ($^{\circ}C$)
T_a	Температура околине ($^{\circ}C$)
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 ($^{\circ}C$)
E_o	Референтно зрачење ($1000 W/m^2$)
ΔT	Разлика температуре између T_c и T_m при E_o ($^{\circ}C$) (ovo je $d(T_c)$ у бази података Sandie)

Тренутна имплементација у EnergyPlus фокусира се на утврђивање 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:

$$I_{sc} = I_{sco} \cdot f_1(AM_a) \cdot \left(\frac{E_o}{E_c} \right)^{f_2(AOI)} + f_d \cdot E_{diff} \cdot \left(\frac{E_o}{E_c} \right)^{f_3(AOI)} + \alpha_{isc} \cdot (T_c - T_o)$$

$$I_{mp} = I_{mpo} \cdot \left(\frac{E_o}{E_c} \right)^{C_0} \cdot E_e + C_1 \cdot E_e^2 + \alpha_{imp} \cdot (T_c - T_o)$$

$$V_{oc} = V_{oco} + N_s \cdot \delta \cdot \ln \left(\frac{E_e}{E_c} \right) + \beta_{voc} \cdot \left(\frac{E_e}{E_c} \right) \cdot (T_c - T_o)$$

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

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

$$I_x = I_{xo} \cdot \left(\frac{E_o}{E_c} \right)^{C_4} \cdot E_e + C_5 \cdot E_e^2 + \alpha_{isc} \cdot (T_c - T_o)$$

$$I_{xx} = I_{xco} \cdot \left(\frac{E_o}{E_c} \right)^{C_6} \cdot E_e + C_7 \cdot E_e^2 + \alpha_{imp} \cdot (T_c - T_o)$$

где је: $E_e = I_{sc} / \left[\left(\frac{E_o}{E_c} \right)^{f_1(AOI)} + \alpha_{isc} \cdot (T_c - T_o) \right]$

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

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

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

$$\beta_{voc} \left(\frac{E_e}{E_c} \right) = \beta_{voco} + m_{\beta_{voc}} \cdot (T_c - T_o)$$

$$\beta_{vmp} \left(\frac{E_e}{E_c} \right) = \beta_{vmpo} + m_{\beta_{vmp}} \cdot (T_c - T_o)$$

$$T_m = E \cdot e^{(1+b) \cdot WS} \cdot T_a$$

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

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 ФН генератора.

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

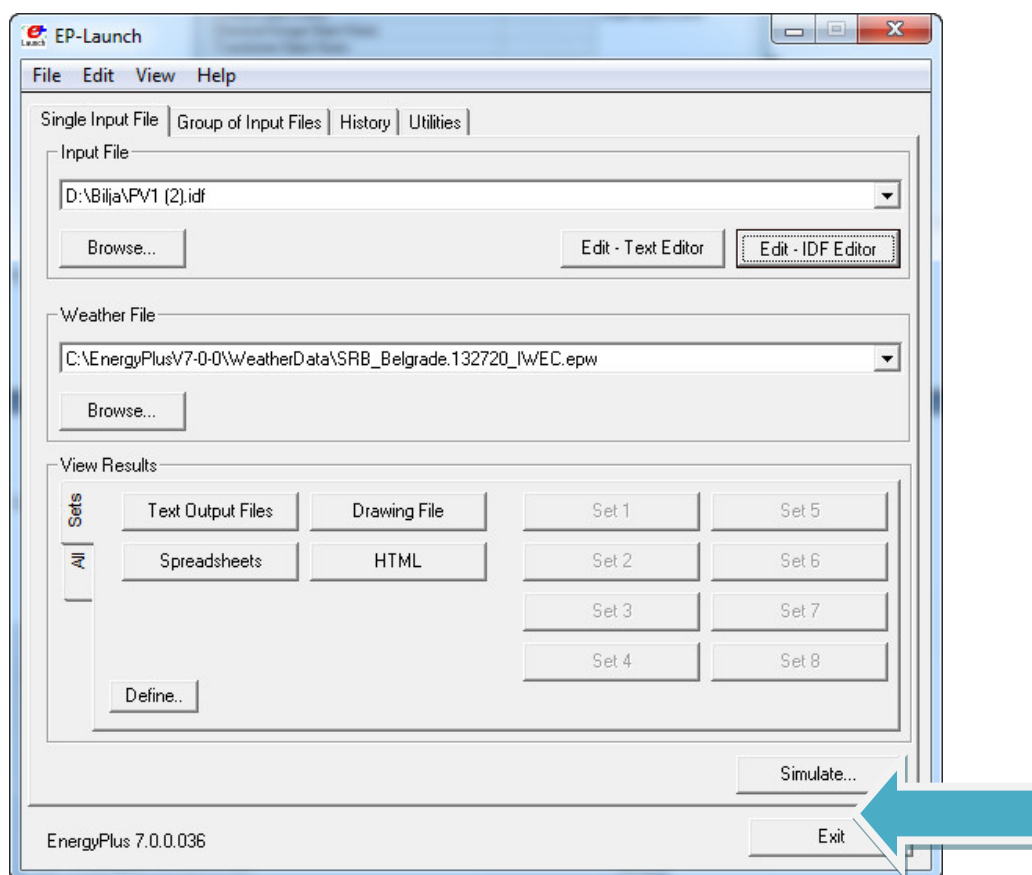
Једначина изнад за T_m се користити за предвиђање температуре изван модула када је изабран мод Sandia RACK. То би било прикладно за већину монтираних сталака ФН инсталације. Ако корисник изабере "интегрисани" EPLUS тада се температура изван модула добија од температуре спољашње површине обрачунате од стране модела биланса топлоте користећи функцију провођења које потиче из EnergyPlus. А енергија добијена из површине се обрачунава за коришћење термина извора/одвода који је додат у односу на претходни временски корак.

Објекат **ElectricLoadCenter** се користи за попис генератора укључених у симулацију. На попису се налазе имена и облици свих генератора уз засебне распореде, називне снаге и односе топлотне (електричне) енергије за сваки. Сетови података од пет поља се уносе засебно за сваки генератор.

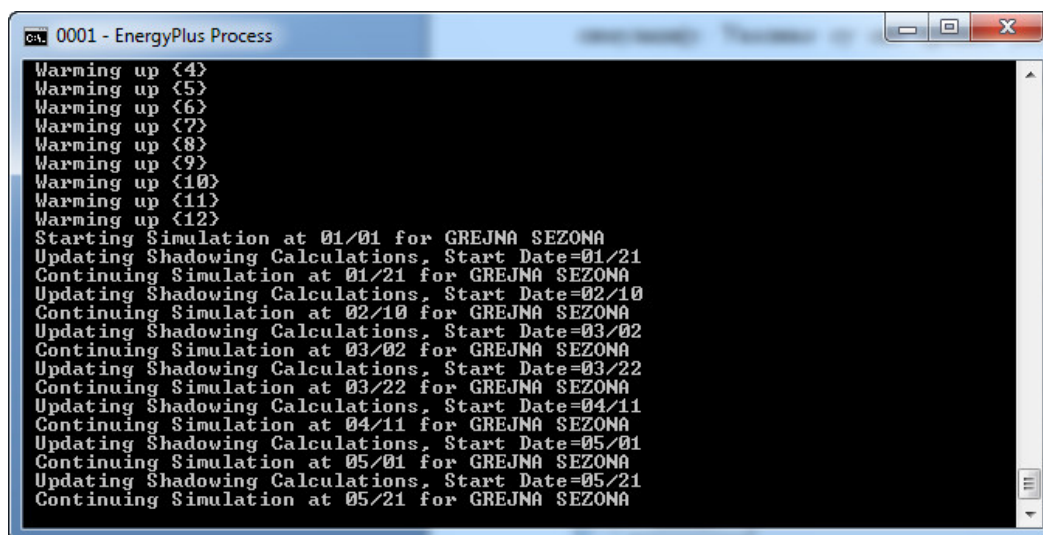
ElectricLoadCenter објекти служе да укључе на лицу места електричне генераторе у симулацију. ElectricLoadCenter пошаље параметре генератора и према начину рада прати и извештава о износу генерисане електричне енергије, као и преузете.

Објекат **Output:Surfaces:List**, **Output:Table:SummaryReports**, **OutputControl:Table:Style**, **Output:Variable**, **Output:Meter** служи како би дефинисао детаљан извештај резултата, начин њихових презентовања, које унапред дефинисане резултате желимо приказати, контролу како ће стандардизовани извештаји бити генерисани (Comma, Tab, Fixed, HTML, CommaAndHTML, TabAndHTML, All), омогућавају једноставније управљање резултатима итд.

Након унетих свих параметара објекта, приступамо процесу симулирања.



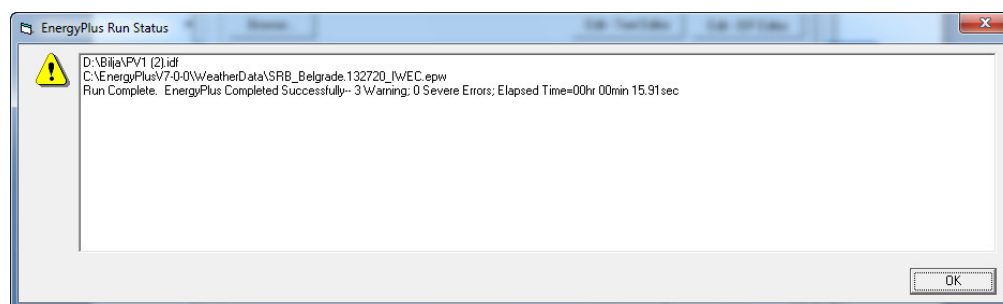
Слика 48.



Слика 49. Покретање симулације

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 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.

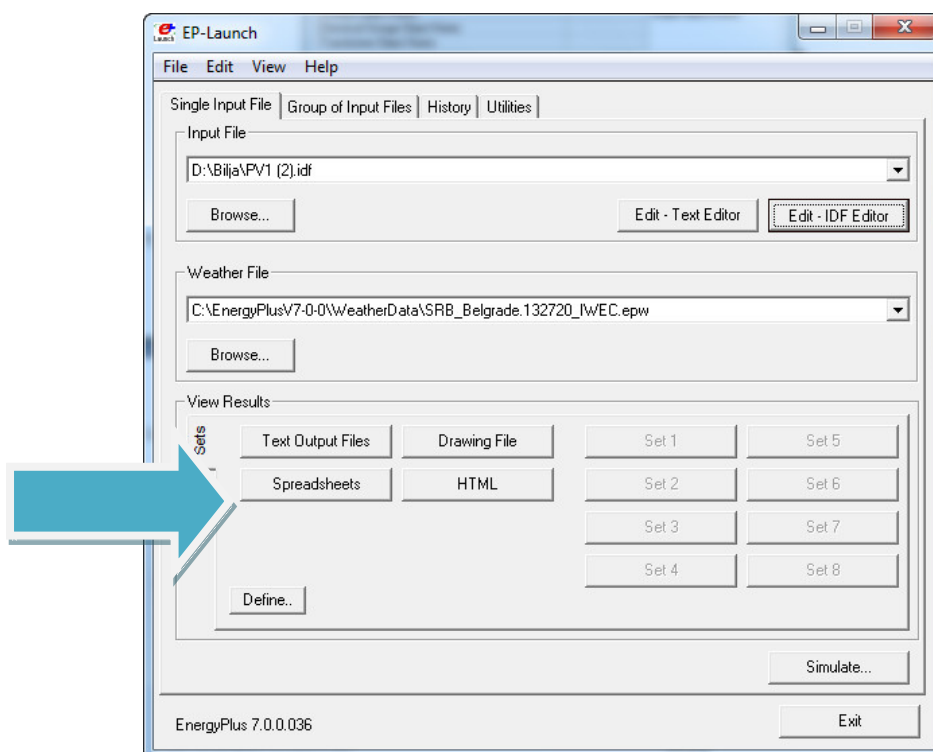


Слика 50. Извештај на крају симулације о могућим грешкама

Када је напокон све успешно обављено, остаје само позабавити се резултатима и могућом калкулацијом. Програм је направио неколико излазних фајл-ова са раличитим подацима прорачуна. Пошто су то HTML, excel и Auto Cad фајл-ови, неопходно је инсталирати Microsoft Office и Auto Cad, док је интернет browser саставни део оперативног система.

4.7. Excel извештај

Као што се могло приметити опција „*Spreadsheets*” у главном менију није могла да се активира пре симулације јер једноставно није постојао извештај. Отварањем извештаја може се уочити низ бројних вредности, наиме као што је већ унапред дефинисано добили смо вредности укупне електричне енергије коју произведе фотонапонски модул, вишак електричне енегије који се не троши тренутно већ продаје мрежи, укупне електричне енергије која се купује из мреже да би испунила тренутне захтеве, како на месечном, тако и на годишњем нивоу.



Слика 51.

	A1												
	Date/Time	Environment	Environment	Whole Bu	Electricity	Electricity	Electricity	Electricity	Electricity	Electricity	Electricity	Electricity	Electricity
1	January	0	0	0	0	22766400	22766400	0	22766400	0	0	22766400	22766400
2	July	53.72253	400.2005	3716507	3716507	22766400	19197230	147337.6	19049893	147337.6	3716507	19049893	19197230
3	January	32.78352	53.12315	28199155	28199155	7.06E+08	6.78E+08	0	6.78E+08				
4	February	49.57347	81.60352	38117672	38117672	6.37E+08	5.99E+08	132045.1	5.99E+08				
5	March	68.04335	137.562	65394255	65394255	7.06E+08	6.41E+08	256170.8	6.4E+08				
6	April	93.51944	138.4738	69240495	69240495	6.83E+08	6.14E+08	536406.9	6.14E+08				
7	May	115.6326	169.8589	84151476	84151476	7.06E+08	6.23E+08	1323398	6.22E+08				
8	June	127.3454	180.0564	85200483	85200483	6.83E+08	5.99E+08	1616513	5.98E+08				
9	July	107.6394	216.433	92228620	92228620	7.06E+08	6.15E+08	1281355	6.14E+08				
10	August	100.3439	193.3905	89822886	89822886	7.06E+08	6.17E+08	742169.4	6.16E+08				
11	September	77.41797	153.1157	70638453	70638453	6.83E+08	6.13E+08	281333.8	6.12E+08				
12	October	56.86946	124.9471	59390450	59390450	7.06E+08	6.46E+08	43960.05	6.46E+08				
13	November	33.85599	85.91467	37138342	37138342	6.83E+08	6.46E+08	212421.1	6.46E+08				
14	December	28.76067	40.88962	22868884	22868884	7.06E+08	6.83E+08	0	6.83E+08	6425773	7.42E+08	7.57E+09	7.57E+09

Слика 52. Покретање excel фајл-а са резултатима

Након успешног последњег корака када је све успешно инсталирано може се направити анализа. Ехсел извештај пружа могућност упоређивања вредности за различите дане, месеце са различитим улазним параметрима. Најлакши начин представљања резултата је дијаграмима, хистограмима, који се једноставно праве у ехсел-у.

5. Резултати и дискусија

5.1. Истраживани објект

Анализирана зграда је стамбена породична кућа приказана на *слици. 16*. Зграда је пројектована за једну породицу и има површину од 190.08 m^2 . Омотач зграде направљен је од 190 mm порозне цигле, 50 mm термо-изолационог слоја и 20 mm кречног малтера. U -вредност је $0.57 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Прозори су двоструко застакљени са U -вредности $2.72 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Укупан део стакла на спољашњим зидовима је 7.32% , где укупна површина спољних зидова је 264.35 m^2 и површина прозора 19.36 m^2 .

ФН систем је инсталиран у стамбеној кући, [8]. Орјентација куће је кров ка југу, под нагибом од 37.5° . Кров има укупну површину 119.6 m^2 и подељен је у два сегмента: први укупне површине 82 m^2 и други укупне површине од $37,6 \text{ m}^2$, на које је могуће инсталирати ФН низове.

Локација куће је у Крагујевцу, тако да временски фајл коришћен у симулацији је за Крагујевац, Србија.

5.2 Резултати симулације

Анализирали смо три различита модела ФН панела - Simple, Equivalent One-Diode и Sandia.

Карактеристике које разматрамо у овом раду су представљене за Simple модел у табели 1.

Табела 5. ФН карактеристике за Simple модел

Укупна површина	82 m^2
Део површине са активним соларним хелијама	0.0077
Ефикасност хелије	14.5 %
Ефикасност конверзије једносмерне у наизменичну струју	1

Ефикасност струјно-напонске конверзије је изабрана да буде максимална, јер у овом раду анализирамо само ФН карактеристике.

Карактеристике за Equivalent One-diode модел и за Sandia модел које разматрамо у овом раду приказани су у табели 6 и табела 7. Детаљан списак коефицијената и база података параметара за ове моделе је дат у предходном одељку.

Табела 6. ФН карактеристике за *Equivalent One-Diode* модел

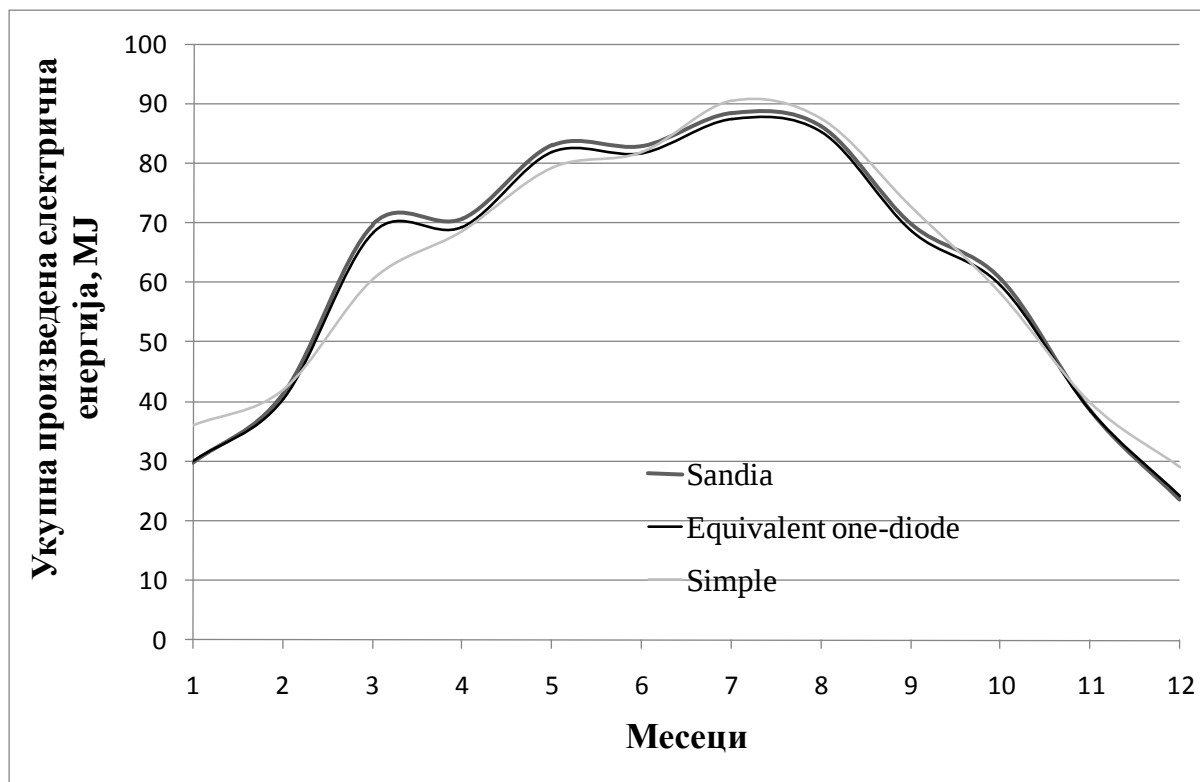
Тип ћелије	CrystallineSilico
Број ћелија у серијама	36
Активна површина	0.63 m ²
Модул трансмисионо апсорбционе производње	0.9
Полупроводник Bandgap	1.12 eV
Напонски отпор	1000 KΩ
Струја кратког споја	4,75 A
Напон отвореног кола	21,4 V
Референтна температура	25° C
Референтна инсолација	1000 W/m ²
Модул струје при максималној снази	4.45 A
Модул напона при максималној снази	17 V

Табела 7. ФН карактеристике за *Sandia* модел

Име	BP Solar BP275
Број ћелија у серији	36
Активна површина	0.63 m ²
Струја кратког споја	4,75 A
Напон отвореног кола	21,4 V
Модул струје при максималној снази	4.45 A
Модул напона при максималној снази	17 V
Фактор диоде	1.38

Као резултат овог рада излази су ФН енергије три различита модела у EnergyPlus окружењу и направили смо њихово поређење. Укупна произведена електрична енергија

представља укупну енергију произведену фотонапонским ћелијама на лицу места за цео модел.

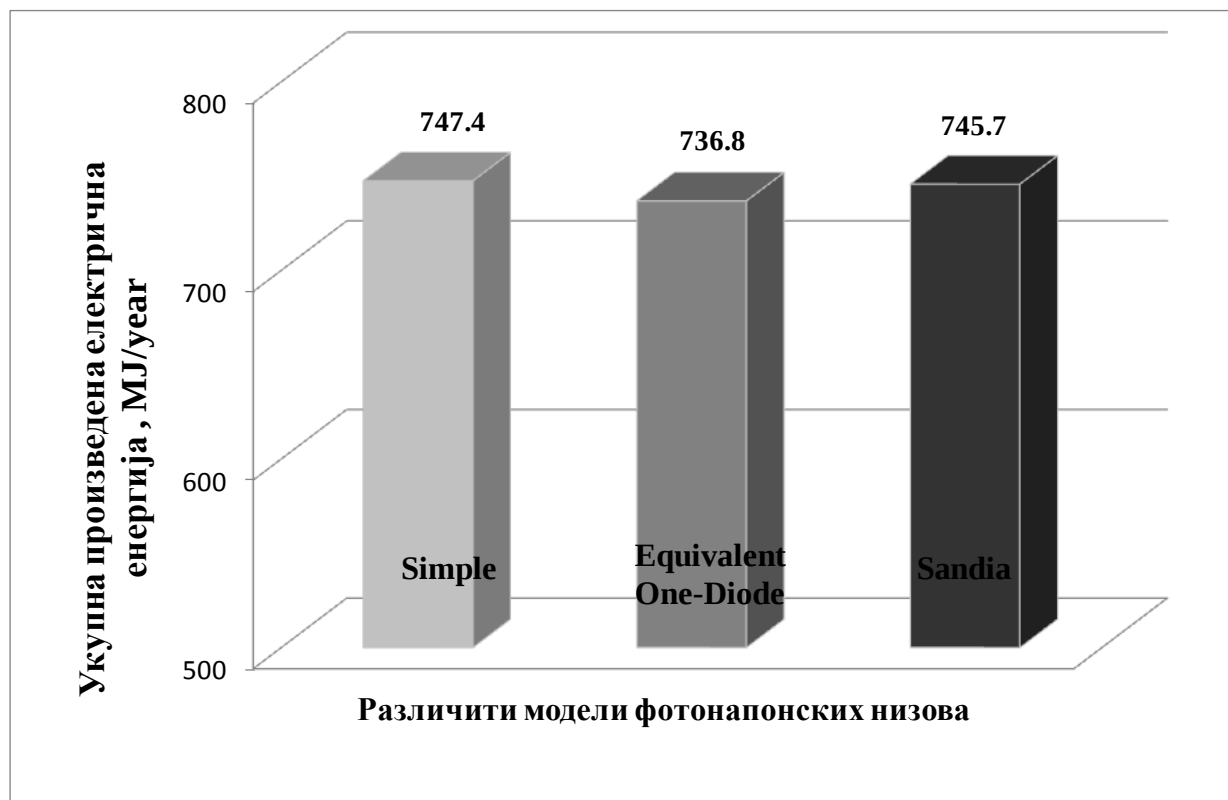


Слика 53. Укупна произведена електрична енергија за различите ФН моделе, израчунавана у EnergyPlus-у за сваки месец у години

Слика 53. представља укупну произведену електричну енергију, у MJ, за различите типове ФН модела, израчунати у EnergyPlus-у за сваки месец у години.

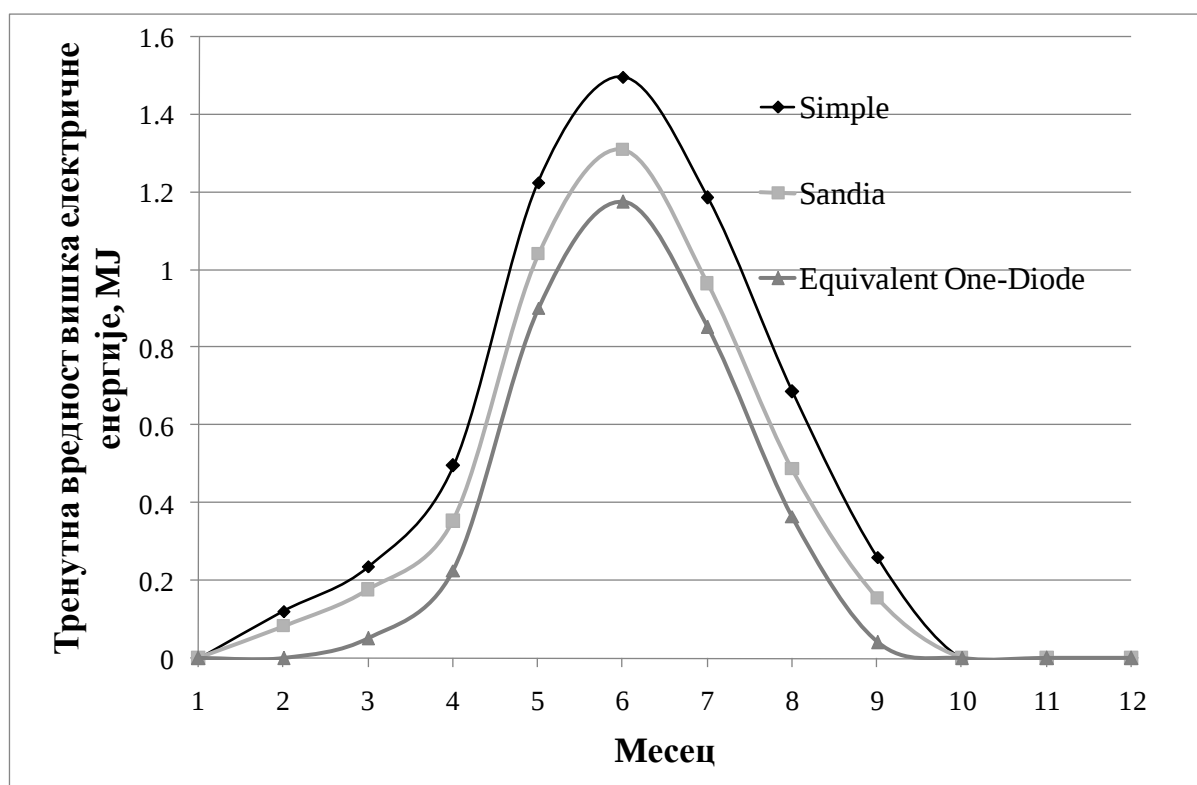
Добијени резултати за моделе који се разматрају у овом раду су веома слични, са малим разликама из месеца у месец. Укупна електрична енергија произведена за сваки модел фотонапонских низова знатно расте од марта до августа, а након тога опада, од септембра до фебруара.

Слика 54. показује укупну произведену електричну енергију у MJ на годишњем нивоу, за различите типове ФН модела, коју израчунава EnergyPlus. Simple ФН модел и Sandia ФН модел даје мало више вредности за укупну произведену електричну енергију, него Equivalent one-diode модел.



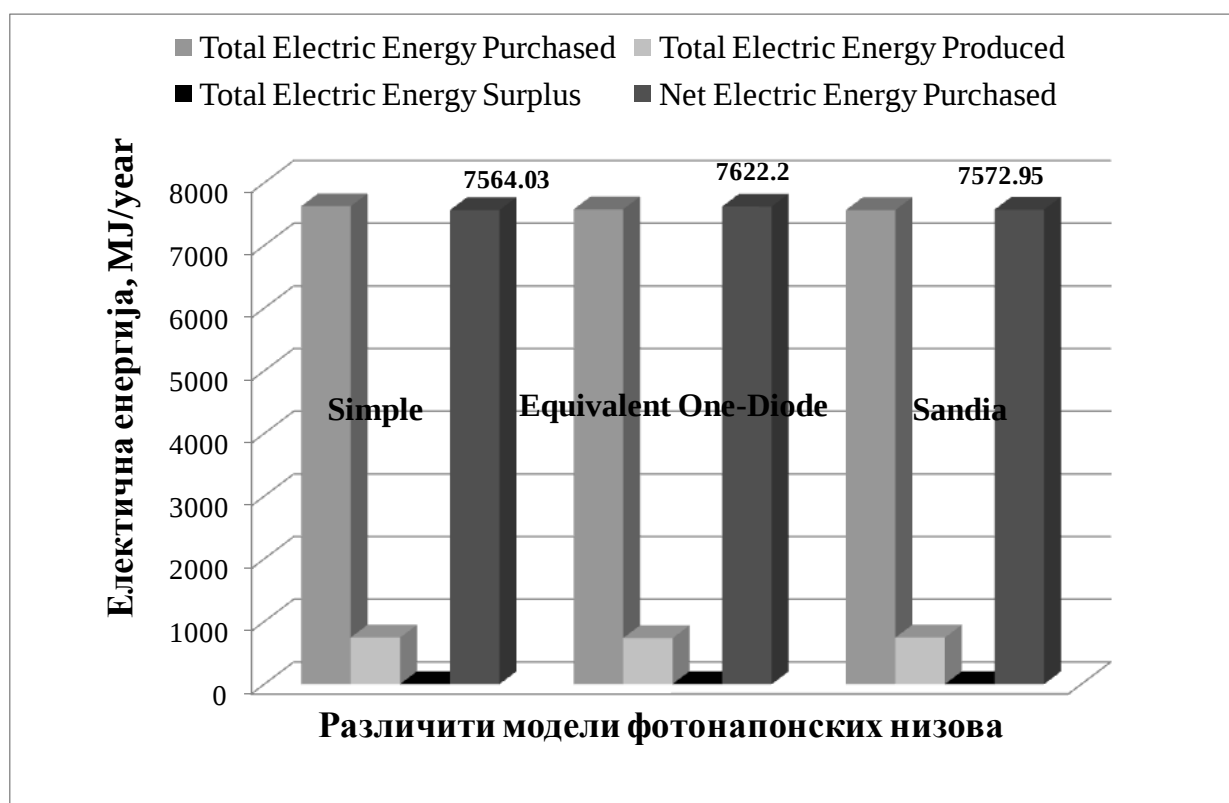
Слика 54. Годишња укупна произведена електрична енергија за различите ФН моделе, израчунавана у EnergyPlus-у

Слика 55. представља тренутни вишак електричне енергије који се продаје електро-мрежи, тј. то је онај део електричне енергије који се произведе, а не искористи у тренутку производње, у MJ, за различите ФН моделе, израчунаван у EnergyPlus-у, за сваки месец у години. Највећу вредност даје Simple ФН модел, док најмању вредност даје Equivalent one-diode модел, у складу са својим произведеним количинама електричне енергије, на годишњем нивоу.



Слика 55. Тренутни вишак електричне енергије у MJ, за различите ФН моделе, израчунаван у EnergyPlus-у, за сваки месец у години

Слика.56. Представља годишње количине електричне енергије за различите ФН моделе, израчунаване у EnergyPlus-у, тј. укупну произведену електричну енергију - *Total Electric Energy Produced*, тренутна вредност вишака електричне енергије који се неискористи у тренутку производње - *Total Electric Energy SurPlus* и продаје мрежи, нето количину купљене електричне енергије из електро система - *Net Electric Energy Purchased*, укупну купљену електричну енергију - *Total Electric Energy Purchased* која збирно представља нето количину купљене електричне енергије и тренутни вишак електричне енергије. На приказаној слици видимо да најмања количина електричне енергије се купује (*Total Electric Energy Purchased*) код Simple ФН модела, јер он има највећу производњу електричне енергије (*Total Electric Energy Produced*), а највећа количина електричне енергије се купује (*Total Electric Energy Purchased*) код Equivalent one-diode ФН модела, јер он има најмању производњу електричне енергије (*Total Electric Energy Produced*).



Слика 56. Годишње електричне енергије за различите ФН моделе, израчунаване у EnergyPlus-у

6. Закључак

Заоштравање питања расипања енергије (тзв. енергетска криза) седамдесетих година XX века изазвало је озбиљна настојања за рационализацијом потрошње и штедњом енергије у свим подручјима. Тако да је уштеда енергије у стамбеним објектима данас један од светски трендова. Жеља за значајним редукацијама у трошковима коришћења могу се постићи употребом новијих видова енергетских система, као што су пасивни соларни системи и други облици обновљивих извора енергије.

Фотонапонска енергија се сматра као један најперспективних обновљивих енергетских технологија која има потенцијал да значајно допринесе одрживом снабдевању енергијом и која потпомаже ублажавању емисије гасова стаклене баште.

Карактеристике фотонапонских модела се користе да процене излазну снагу фотонапонског система. ФН ћелије са њиховом подршком се налазе на крову куће и повезани су на националну мрежу електричне енергије и / или куће. Ови модели су дизајнирани у складу са географском локацијом, географском ширином, расположивим соларним зрачењем итд.

Са становишта електротехнике, ФН модуле карактеришу њихова струјно напонска крива, $I-V$ крива. Снага модула је производ његовог напона и струје, тако да је потребно знати радну тачку модула за утврђивање произведене енергије.

Овај дипломски рад пореди енергетске излазе три различите врсте фотонапонских панела (Simple, Equivalent One-Diode и Sandia) у EnergyPlus окружењу. Добијене ФН енергије за ове моделе су веома сличне. Овај софтвер има велике могућности за моделирање понашања енергије зграда и коришћење обновљивих извора енергије у зградама. Помоћу EnergyPlus софтвера, дизајнери зграда могу дефинисати оптималне вредности ФН панела за сваку зграду, према потребама за електричном енергијом.

7. Литература

- [1] Radulovic, J. J., M., Bojic, J., Skerlic, D., Nikolic, D. Taranovic, Energy generation and CO2 emissions of PV systems, 6th International Quality Conference, Faculty of Engineering, University of Kragujevac (2012) 802–808.
- [2] Klise, G. T., J. Stein, Models Used to Assess the Performance of Photovoltaic Systems, Sandia report, SAND2009-8258, Sandia Nacional Laboratory(2009) 1–61.
- [3] Thevenard, D., Review and Reccommendations for improving the modeling of Building Integrated Photovoltaic Systems, Ninth International IBPSA Conference Montréal, Canada August 15-18, (2005), 1222-1228.
- [4] Kashif, I., Z., Salam, An improved modeling method to determine the model parameters of photovoltaic (PV) modules using differential evolution (DE), Solar Energy, 85 (2011) 2349–2359.
- [5] EnergyPlus Engineering Document: The Reference to EnergyPlus Calculations, Lawrence Berkeley national laboratory, 2009.
- [6] Др Слободан Зрнић, дипл.инж.; др Живојин Ђулум, дипл.инж.: *Грејање и климаизација са применом соларне енергије*, осмо издање, Београд
- [7] Др Небојша Лукић, др Милун Бабић.: *Соларна енергија*, Монографија, Машински факултет у Крагујевцу, 2008.
- [8] Bojic, M., D., Bigot, F., Miranville., A. Parvedy-Patou., J., Radulovic., Optimizing performances of photovoltaics in Reunion Island—tilt angle, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, DOI: 10.1002/pip.1159, (2011) Online ISSN:1099-159X.
- [9] Soteris A. Kalogirou, Solar thermal collectors and applications, *Progress in Energy and Combustion Science* 30 (2004), p. 231–295
- [10] <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/> (приступљено 22.08.2012.)
- [11] http://www.izvorienergije.com/svijet_treba_obnovljive_izvore_energije.html (приступљено 30.08.2012.)
- [12] <http://www.solarenergy.net/Articles/how-photovoltaic-cells-work.aspx> (приступљено 28.08.2012.)
- [13] http://www.eere.energy.gov/basics/renewable_energy/pv_cell_materials.html (приступљено 15.09.2012.)
- [14] <http://www.originenergy.com.au/2029/Photovoltaic-cells> (приступљено 15.09.2012.)