Modeliranje fotonaponskih modula

Čurčić, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:931516

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Sveučilišni studij

MODELIRANJE FOTONAPONSKIH MODULA

Diplomski rad

Ivan Čurčić

Osijek, 2017.

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Osijek, 14.07.2017.

Odboru za završne i diplomske ispite

Imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Ime i prezime studenta:	Ivan Čurčić
Studij, smjer:	DEB - Održiva elektroenergetika
Mat. br. studenta, godina upisa:	D 902, 12.10.2015.
OIB studenta:	97492130666
Mentor:	Doc.dr.sc. Danijel Topić
Sumentor:	Matej Žnidarec
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	Prof.dr.sc. Damir Šljivac
Član Povjerenstva:	Matej Žnidarec
Naslov diplomskog rada:	Modeliranje fotonaponskih modula
Znanstvena grana rada:	**Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)**
Zadatak diplomskog rada:	U uvodu diplomskog rada opisati trenutno stanje fotonaponskih sustava, udio u proizvodnji električne energije i godišnji rast instalirane snage te važnost modeliranja takvih sustava. U nastavku opisati osnovne parametre fotonaponskog modula, što utječe na njih i o čemu ovise. Opisati matematički model fotonaponskog modula, odnosno prikazati jednadžbe koje opisuju nadomjesnu shemu fotonaponskog modula. Opisati dostupne računalne modele fotonaponskih modula. Napraviti simulacije karakteristika fotonaponskog modula pomoću računalnih modela. Izmjeriti karakteristike fotonaponskih modula u Laboratoriju za obnovljive izvore energije. Usporediti rezultate simulacije s rezultatima mjerenja te napraviti detaljnu analizu usporedbe. Sumentor: Matej Žnidarec, mag.ing.
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
Datum prijedloga ocjene mentora:	14.07.2017.

Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

IZJAVA O ORIGINALNOSTIRADA

Osijek, 19.07.2017.

Ime i prezime studenta:	Ivan Čurčić
Studij:	DEB - Održiva elektroenergetika
Mat. br. studenta, godina upisa:	D 902, 12.10.2015.
Ephorus podudaranje [%]:	0

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom**: Modeliranje fotonaponskih modula**

izrađen pod vodstvom mentora Doc.dr.sc. Danijel Topić

i sumentora Matej Žnidarec

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.
Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

Sadržaj

UVOD ... 1
1 OSNOVNO O FOTONAPONSKIM MODULIMA ... 2
1.1 Fotonaponski modul ... 2
1.2 Učinkovitost modula ... 3
1.3 Parametri fotonaponskog modula ... 3
1.4 Trenutno stanje fotonaponskih sustava ... 5
2 MODELIRANJE FOTONAPONSKIH MODULA ... 6
2.1 Modeliranje pozicije sunca ... 6
2.1.1 Matematički model kretanja Sunca ... 8
2.1.2 Proračun visine i kut odstupanja od azimuta u MATLABU ... 11
2.2 Ekstrateristično sunčevo zračenje ... 15
2.3 Mjerenje sunčeva zračenja ... 16
2.4 Snaga sunčeva zračenja ... 16
2.4.1 Modeliranje emisije zračenja zemlje kao crnog tijela ... 18
2.5 Matematički opis ekstrateristično zračenja ... 20
2.6 Simulacija satnog ekstrateristično zračenja na horizontalnu površinu Zemlje ... 21
2.7 Matematički opis modeliranja sunčeva zračenja na horizontalnu površinu na zemlji ... 23
2.7.1 Simulacijski model prikaza inteziteta sunčeva zračenja na vodoravnu površinu zemlje ... 25
2.8 Zračenje sunca na nagnutu površinu na zemlji ... 28
2.9 Matematički opis modeliranja sunčeva zračenja na nagnutu površinu na zemlji ... 29
2.9.1 Simulacija modela inteziteta sunčeva zračenja na nagnutu površinu ... 30
3 FOTONAPONSKA ĆELIJA ... 32
3.1 Utjecaj zasjenjenja fotonaponske ćelije ... 33
3.2 Utjecaj temperature ... 34
3.3 Matematički model fotonaponske ćelije ... 34
3.4 Simulacija fotonaponskog modula i usporedba s mjerenjima u laboratoriju ... 37
3.4.1 Simulacija i mjerenja za modul BISOL BMO-250 ... 39
3.4.2 Simulacija i mjerenja za modul BISOL BMU-250 ... 41
3.4.3 Mjerenja za modul MASDAR MPV100-S ... 43
4 ZAKLJUČAK ... 44
LITERATURA ... 45
SAŽETAK ... 46
ŽIVOTOPIS ... 47
PRILOZI ... 48

UVOD

U ovom diplomskom radu opisano je trenutno stanje fotonaponskih sustava, proizvodnja električne energije iz fotonaposnkih sustava. Svake godine bilježi se sve veći rast ukupne instalirane snage ovih sustava. Proizvodnja električne energije iz fotonaponskih sustava ovisi o mjestu instalacije te o intenzitetu sunčeva zračenja.

Fotonaponski sustavi svakog dana sve više su zastupljeni u svijetu za proizvodnju električne energije. Razlog tome jesu serijska proizvodnja što dovodi do pada cijena, razni poticaji i subvencije države, županije.

U drugom poglavlju opisano je općenito o fotonaponskim modulima, njihovoj podjeli na monokristalne, polikristalne, te tanki film. Opisana je učinkovitost modula koja se povećava razvojem novih tehnologija u proizvodnji, razlog pada cijena, osim toga opisani su standardni testni uvijeti prema kojima se modul testira u tvornici.

U trećem poglavlju opisano je teorijskim dijelom, matematičkim izrazima, simulacijom položaj i kretanje Sunca. Zatim promjena intenziteta sunčeva zračenja tijekom dana, ovisno o kutu upada zraka na vodoravnu ili nagnutu površinu.

U četvrtom poglavlju opisano je modeliranje fotonaponske ćelije, te je prema tehničkim podacima za fotonaponski modul u programskom paketu Matlab konstruirana karakteristika tog modula, te je također prema napravljenim mjerenjima u Laboratoriju za obnovljive izvore energije Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek.

Za modeliranje fotonaponskog modula bit će korišten programski alat MATLAB, a prije izvođenja simulacija u MATLAB-u opisat će se matematičke jednadžbe koje su potrebne za dobivanje određenih parametara o gibanju sunca, intenzitetu sunčeva zračenja, temperaturi zraka te ostalih parametara.

1 OSNOVNO O FOTONAPONSKIM MODULIMA

1.1 Fotonaponski modul

Fotonaponski modul ili fotonaponska ćelija je element koji se sastoji od poluvodičkih materijala kao što su galijev arsenid, silicij i kadmij telur te direktno pretvaraju sunčevu svjetlost u električnu energiju. Postoji više izvedbi fotonaponskih modula koji su napravljeni s različitim materijalima te se također razlikuju po svojoj učinkovitosti, a oni su:

Monokristalni silicij - tipično crne boje, uglovi ovih ćelija obično nedostaju što je rezltat u procesu proizvodnje i prirode monokristalnog silicija. Ovakve izvedve modula su često među najskupljima na tržištu, ali zato imaju učinkovitost veću od ostalih izvedbi.

Polikristalni silicij - ćelija izvedena od lijevanih poluga, ali pravokutnih dok su kod monokristalnog cilindrične poluge. Ovakva izvedba je jeftinija tijekom proizvodnje, ali ima manju učinkovitost.

Tanki film - ovakve ćelije i moduli za svoju proizvodnju koriste manju količinu materijala, s tim se umanjuju troškovi proizvodnje. Ovakva manja količina materijala smanjuje učinkovitost modula, ali omogućuje lakšu ugradnju, manju masu modula, fleksibilnost.

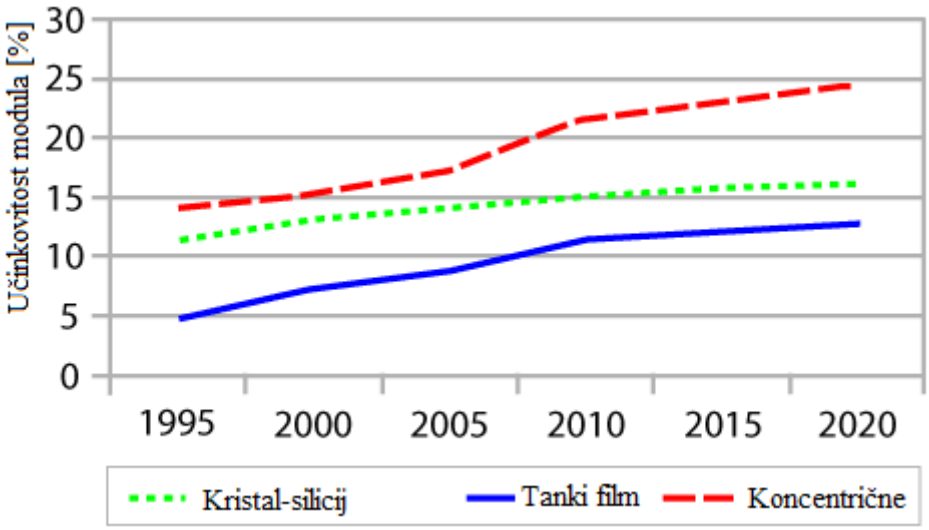


Slika 2.1: *Prikaz opisanih fotonaponskih ćelija.*

Fotonaponski modul sastoji se od više fotonaponskih ćelija vezanih u seriju. Napon koji proizvodi jedna ćelija iznosi oko 0.5 V, dakle da bi postigli veći napon moramo spojiti više fotonaponskih ćelija u serijski spoj. Obično se spaja oko 36 ćelija u seriju.

1.2 Učinkovitost modula

U početku razvoja fotonaponskih modula učinkovitost bila je mala. Stalnim razvojem novih tehnologija učinkovitost se povećava. Učinkovitost određuje sposobnost fotonaponskog modula da pretvori sunčevu svjetlost u električnu energiju, te ona također ovisi i o marki proizvođača. Učinkovitiji modul proizvesti će više električne energije nego modul s manjom učinkovitosti, a jednakom površinom i istom količinom intenziteta sunčeve svjetlosti.



Slika 2.2:*Prikaz učinkovitosti fotonaponskih modula. [1]*

Danas na tržištu možemo naći module od 14% do 17% učinkovitosti, no neke tvrtke kao SunPower proizvode module učinkovitosti i 22.5% što je trenutno najučinkovitija marka dostupna na tržištu. Iza njih odmah se nalazi tvrtka Panasonic s preko 21 % učinkovitosti.*[2]*

1.3 Parametri fotonaponskog modula

Fotonaponski modul je element koji izravno pretvara sunčevu svjetlost u električnu energiju. Za modeliranje fotonaponskog modula nužno je uzeti u obzir sljedeće parametre: temperatura, intezitet sunčeva zračenja, gibanje sunca, položaj modula, zemljopisna dužina i širina kao ulazne varijable. Izlazne varijable su struja, napon i snaga koje pak najviše ovise o ulaznim varijablama.

Svaki fotonaponski modul koji se proizvede odmah u tvornici dobiva svoje tehničke podatke koji se koriste za dimenzioniranje fotonaponskog sustava. Ti tehnički podaci dobiju se prema izvršenim mjerenjima uz standardne testne uvjete (STC) i nalaze se na pozadini svakog fotonaponskog modula.

Standardni testni uvjeti su industrijski standard za testiranje performansi fotonaponskih modula. Mjerenja se provode prema ovim uvjetima:

- Intenzitet sunčeva zračenja od 1000 W/m^2,
- Referentna temperatura ćelije od 25° C uz toleranciju od $\pm$ 2°C,
- Masa zraka od 1.5.

Masa zraka može se definirati kao stvarni put koji sunčeve zrake prođu kroz atmosferu u odnosu na najkraći mogući put. Za intezitet sunčeva zračenja 1000 W/ m^2 iznosi 1.5 i bezdimenzionalna je jedinica.

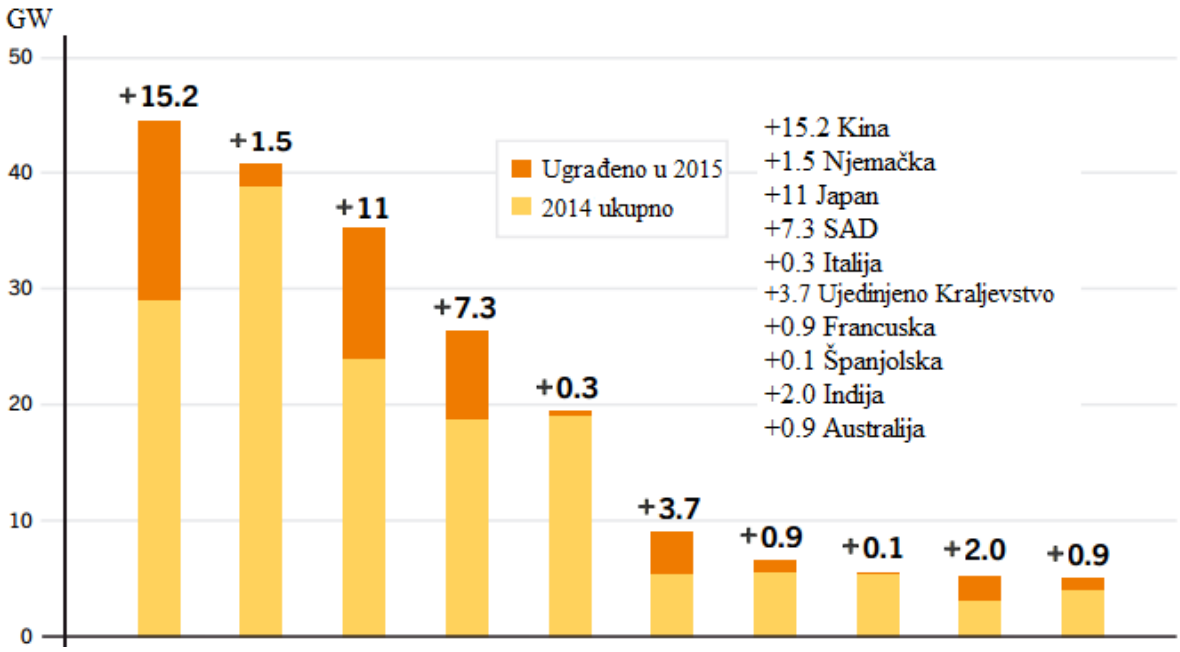
Tablica 2.1: *Tehnički podaci za modul SOLVIS SV60-260.[3]*

MODEL	-	SV60-260
Vršna snaga P_{MPP}	[W]	260
Dozvoljeno odstupanje	[W]	-0/+4.9
Struje kratkog spoja I_{sc}	[A]	8.95
Napon praznog hoda U_{oc}	[V]	37.9
Nazivna struja I_{MPP}	[A]	8.47
Nazivni napon U_{MPP}	[V]	30.9
Efikasnost modula	[%]	15.88
Dimenzije (VxŠxD)	mm	1650x992x40
Masa	kg	18.7
Broj i vrsta ćelija	-	60 ćelija, polikristalni Si, 156x156 mm
Temperaturni koeficijent snage P_{MPP}	[%/K]	-0.41
Temperaturni koeficijent snage I_{SC}	[%/K]	0.05
Temperaturni koeficijent napona U_{OC}	[%/K]	-0.31

Snaga kao izlazni parametar ovisi ponajprije o intenzitetu sunčeva zračenja, ali također i temperatura ima značajan utjecaj na snagu modula. Tako će primjerice izlazna snaga modula ljeti kada je sunčano i vruće biti manja nego kada je po zimi sunčano ali hladno uz uvjet da je intezitet sunčeva zračenja jednak za oba slučaja.

1.4 Trenutno stanje fotonaponskih sustava

Tijekom 2015. godine instalirano je preko 50 GW novih fotonaponskih sustava, što sve ukupno iznosi oko 230 GW ukupne instalirane snage. Sa slike 1 možemo vidjeti da je Kina vodeća zemlja prema ukupnoj instaliranoj snazi s 43 GW, zatim sljedi Njemačka 40 GW, zatim Japan s 34 GW, SAD s 25 GW, Italija S 19 GW, Ujedinjeno Kraljevstvo 9 GW, Francuska 6.5 GW, Španjolska 5.4 GW, Indija 5 GW, te Australija s 5 GW. *[4]*



Slika 2.3:*Instalirana snaga fotonaponskih sustava 2015. godine. [5]*

Tijekom 2016 godine također se povećava instaliranje fotonaponskih sustava u odnosu na prethodnu godinu. Prema *[6]*,u 2016. godini instalirano je dodatnih 75 GW, te ukupna instalirana snaga u fotonaponskim sustavima iznosi oko 303 GW. I dalje je Kina vodeća zemlja s dodanih 34 GW, a za njom sljedi Japan s dodanih 8.6 GW. Ovi sustavi na godišnjoj razini proizvedu 375 TWh električne energije, što iznosi oko 1.8 % potrošnje električne energije u svijetu.

Greentech Media u travnju 2017. predviđa porast fotonaponskih sustava za oko 9 % , što znači da će zemlje instalirati ukupno oko 85 GW dodatnih sustava. *[5]*. S vremenom dolazi do pada cijena modula jer se smanjuju proizvodni troškovi kroz poboljšanje opreme, smanjenje mehaničkih djelova za montažu, razvoja pametnih modula koji omogućuju smanjenje gubitaka u prijenosu.

2 MODELIRANJE FOTONAPONSKIH MODULA

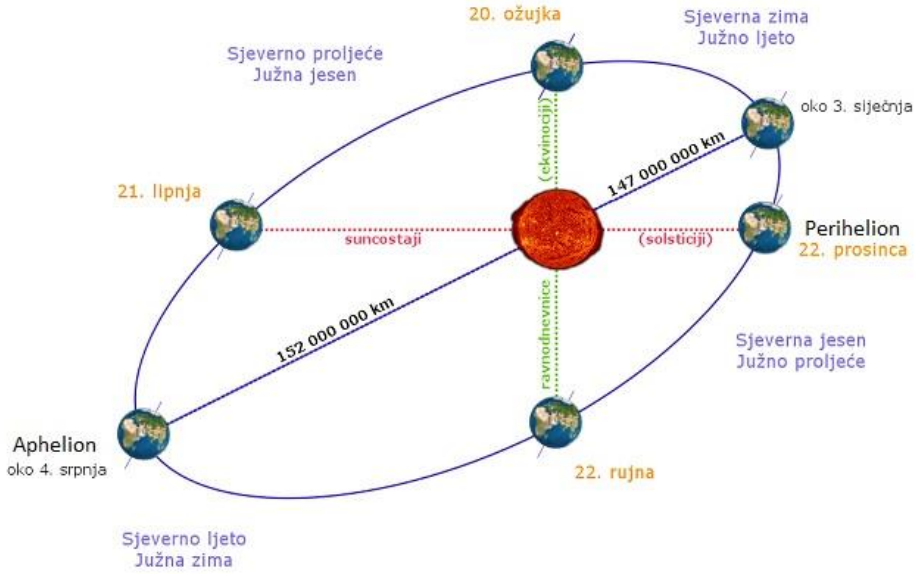
Modeliranje možemo definirati kao predstavljanje nekog objekta ili pojave u stvarnom svijetu opisane matematičkim jednadžbama. Općenito modeliranje je inženjerska tehnika koja je široko prihvaćena i dokazana u svijetu. Modeliranje koristimo kako bi se olakšala izrada nekog proizvoda, projekta vezanog za građevinu, pa tako i projekta fotonaponskih sustava. Bitna stvar kod modeliranja je da putem matematičkog modela, te računalnih modela i simulacija dođemo do željenih rezultata i njihovom analizom imamo uvid u isplativost projekta te uvid u utjecaj čimbenika okoline u našem slučaju na proizvodnju električne energije iz fotonaponskih modula.

Dobra programska podrška bitan je dio za izvođenje simulacija određenog modela ili dijela modela, ali da bi došli do simulacije prvo je potreban matematički model nekog sustava. Prednost računalne simulacije je u uštedi vremena, jednostavnost promjene parametara da bi se vidio očekivani ili neočekivani ishod, što je nekada prije bilo nemoguće te je dolazilo do povećanih troškova.

2.1 Modeliranje pozicije sunca

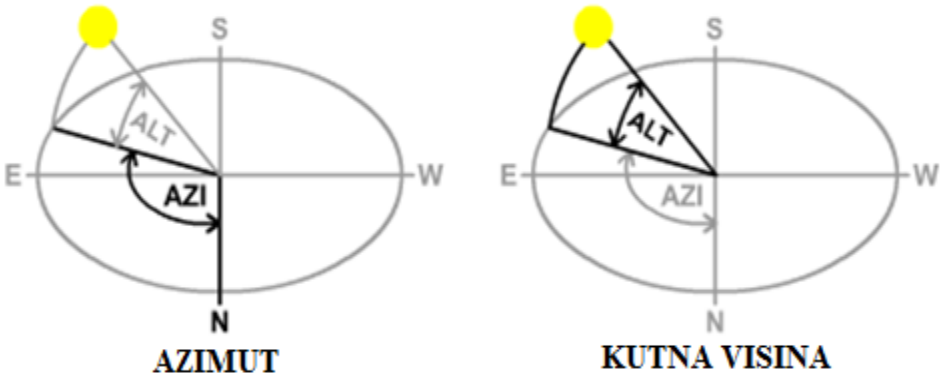
Fotonaponski moduli testiraju se pri sunčevom zračenju od 1000W/m^2 , temperaturi fotonaponske ćelije 25°C te zračnoj masi koja iznosi 1.5 što je već prije navedeno u poglavlju 2.3. Tijekom dana Sunce konstantno mijenja svoj položaj, pa intenzitet sunčeva zračenja koji dolazi na fotonaponski modul neće biti kao pri testnim uvjetima. Zbog toga moramo poznavati gibanje sunca, kako bi znali postaviti fotonaponski modul. Fotonaponski moduli postavljaju se fiksno pod nekim određenim kutom ili vodoravno, ali fotonaponski moduli mogu se postaviti tako da prate sunce tijekom dana i tako osiguraju maksimalnu proizvodnju električne energije.

Matematičkim jednadžbama opisat ćemo poziciju sunca, tako da se u bilo kojem mjestu na svijetu može znati pozicija sunca tijekom dana ili sata. Poznato je da zemlja rotira oko sunca, a duljina svake rotacije zemlje oko sunca iznosi 8760 sati ili 365 dana. Zemlja rotira po eliptičnoj orbiti. Na orbiti postoje neke jedinstvene točke, a to je zimski solsticij koji se događa 21. prosinca te je tada Zemlje od Sunca udaljena 147 milijuna km. A ljetni solsticij događa se 21. lipnja tada je Zemlja od Sunca udaljena 152 miljuna km.*[7]*. Perihelion naziva se točka u kojoj je Zemlja najbliža Suncu, a aphelion kada je Zemlja najudaljenija od Sunca što možemo vidjeti na slici 3.1



Slika 3.1: *Rotacija zemlje oko Sunca. [8]*

Ako promatramo Sunce s neke točke na Zemlji, pozicija sunca određena je s dva glavna kuta. To je kut visine (α) i kut azimuta (θ_s). Azimut možemo definirati kao vodoravnu kutnu udaljenost od sjevera (ili juga) u smjeru kazaljke na satu pa sve do položaja objekta kojeg promatramo, u našem slučaju Sunce. Kutna visina Sunca je kut upada sunčevih zraka na objekt i same horizontalne plohe.



Slika 3.2: *Azimut i kutna visina Sunca.[9]*

Kutna visina može se računati prema sljedećem izrazu:

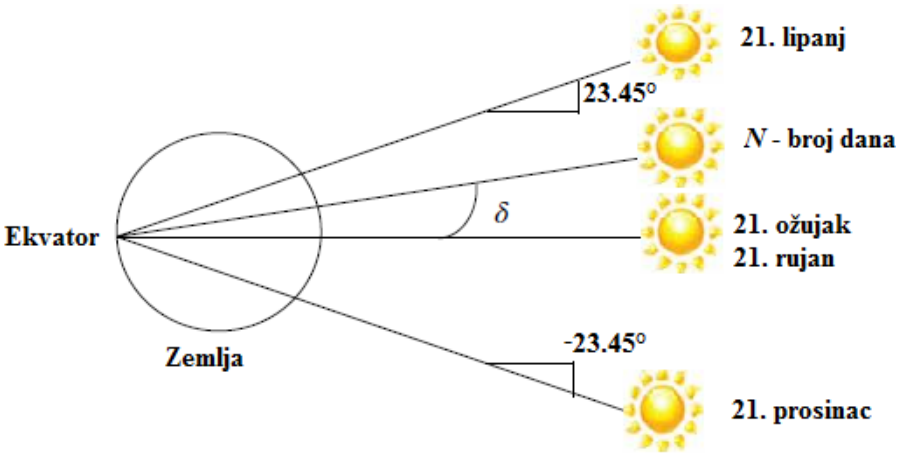
$$\sin\alpha = \sin L \sin\delta + \cos L \cos\delta \cos\omega \tag{3-1}$$

gdje je:

- L zemljopisna širina,
- δ je kut deklinacije,
- ω je satni kut.

2.1.1 Matematički model kretanja Sunca

Glavni potrebni parametar za proračunavanje položaja Sunca je deklinacija Sunca, koju možemo definirati kao kut između središta zemlje i središta Sunca te ravnine u kojoj leži ekvator. Zemljin ekvator nagnut je pod kutem od 23.45° na ravninu zemljine orbite oko sunca, tako da se tokom godine kako zemlja kruži oko sunca deklinacija mjenja između 23.45° sjeverno do 23.45° južno.



3.3:*Grafički prikaz deklinacije Sunca.*

Sunce svoju najvišu točku ima pri ljetnom solsticiju a to je 21. lipnja , tada se njegove zrake spuštaju od sredine sunca do središta zemlje i s ekvatorom zatvaraju kut od 23.45°. Najnižu točku ima sunce za vrijeme zimskog solsticija te tada zatvara kud od -23.45°.

Deklinaciju sunca računamo prema sljedećem izrazu:

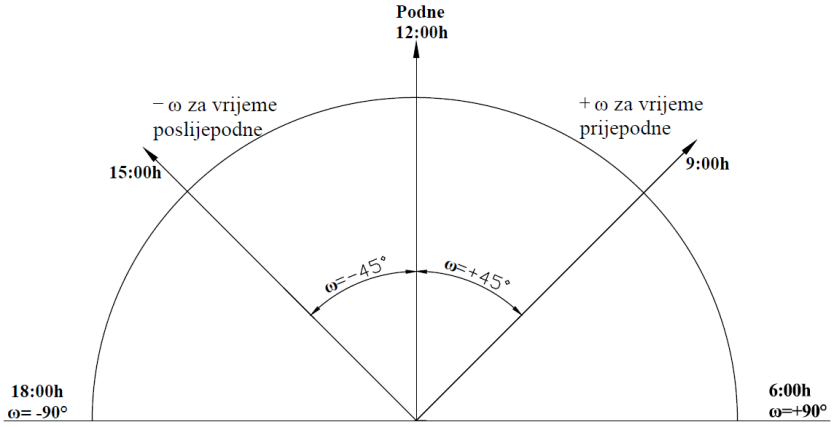
$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left[\frac{360}{365} \cdot (n - 81)\right] \tag{3-2}$$

gdje je:

- n - dan u godini za koji računamo deklinaciju,
- δ - deklinacija,
- 81- prvi dan proljeća.
- 360/365 predstavlja broj dana u godini za položaj u orbiti

Dalje nam je bitan satni kut sunca ω koji se može definirati kao razlika između lokalnog i sunčevog meridijana. Satni kut može biti izražen pozitivno i negativno. Vrijednosti pozitivnog satnog kuta sunca označavaju jutro, odnosno sve dok sunce ne pređe lokalni meridijan satni kut bit će negativan. Satni kut također se može izraziti i u stupnjevima. Poznato je da zemlja prilikom rotacije napravi 360°. Tih 360° stupnjeva podijelimo s 24 sata koliko iznosi trajanje jednog dana i dobijemo iznos od 15° kao vrijednost jednog sata.

$$Satni\ kut\ sunca\ \omega = 15^{\circ} / satu \cdot broj\ sati \tag{3-3}$$



Slika 3.4: *Grafički prikaz satnog kuta Sunca.*

Ili se može iskazati pomoću relacije koju ću i koristiti u daljnjem teksu i simulaciji:

$$\omega = 15^{\circ}(AST - 12h) \tag{3-4}$$

gdje je:

ω - satni kut sunca

AST- pravo sunčevo vrijeme (engl. *apparent solar time*)

Pravo sunčevo vrijeme - može se definirati kao interval između dva uzastopna prolaska sunca kroz lokalni meridijan. Sunčevo vrijeme može se grubo mjeriti sunčanim satom. Duljina sunčanog dana varira tijekom godine. Za ta odstupanja učinak imaju dva glavna uzroka. Prvi je to da je Zemljina orbita elisa, a ne krug, tako da se Zemlja kreće brže kada je najbliža suncu i sporije kada je najudaljenija od Sunca. Drugi uzrok je Zemljin aksijalni nagib poznat kao zakretanje ekliptike. Lokalno vrijeme možemo računskim putem izračunati iz pravog sunčevog vremena. Pravi sunčev dan dulji je blizu periheliona kada se sunce kreće pod većim kutem duž ekliptike, tada traje oko 30 sekundi dulje, a 20 sekundi kraće kada je blizu apheliona.

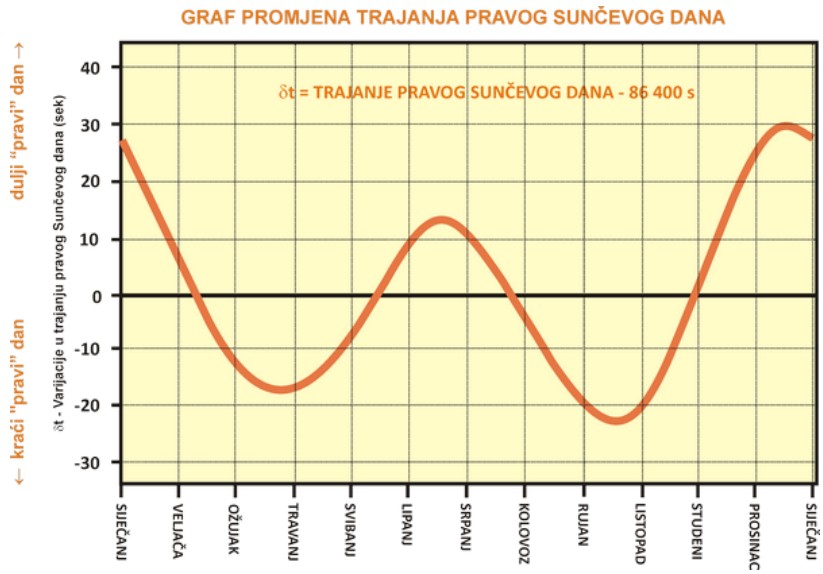
$$AST = LMT + EoT \pm 4^{\circ} / (LSMT - LOD) \tag{3-5}$$

Gdje su:

- *LMT* - engl. *Local Meridian Time,*
- *EoT* - engl. *Equation of Time* - jednadžba vremena,
- *LSMT* - engl. *Local Standard Meridian Time*- lokalni standardni vremenski meridijan,
- *LOD* - engl. *longitude* - zemljopisna dužina.

Local meridian time - kada hoćemo odrediti položaj sunca ne nekoj željenoj točki ili u željeno vrijeme koristimo LMT kao vrijeme trajanja dana u minutama. Želimo li poziciju sunca za primjer 15:35h dakle LMT iznosit će 935 minuta.

EoT - jednadžba vremena - je razlika između srednjeg Sunčevog vremena i pravog sunčevog vremena. Za naše građanske potrebe pravi sunčev dan i srednji sunčev dan jednako traju. Jednadžba vremena uvedena je zbog zemljine nepravilnosti putanje oko Sunca, ali i zbog nagnutosti osi rotacije u odnosu na ravninu ekliptike.



Slika 3.5:*Varijacija trajanja srednjeg i pravog sunčevog dana.[10]*

Jednadžba vremena računa se prema sljedećem izrazu:

$$EoT = 9.87\sin(2B) - 7.53\cos B - 1.5\sin B \tag{3-6}$$

gdje se B računa prema izrazu

$$B = \frac{2\pi}{365}(N - 81) \tag{3-7}$$

N - protekli broj dana u godini, na primjer 15.lipnja proteklo je 166 dana.

Kut azimuta računa se prema izrazu:

$$\sin\theta = \frac{\cos\delta \sin\omega}{\cos\alpha} \tag{3-8}$$

2.1.2 Proračun visine i kut odstupanja od azimuta u MATLABU

Nakon matematičkog opisa pozicije sunca, u Matlabu izračunati ćemo visinu i azimut kuta sunca za grad Osijek na datum 15.lipanj u 12:30 h. Prethodno opisane jednadžbe potrebno je prilagoditi Matlabu kako bi uspješno izračunali visinu i azimut kuta. U program potrebno je unijeti, zemljopisnu širinu i dužinu, broj proteklih dana u godini koji iznose 166 za određeni datum, te LMT za 12:30 što iznosi 750 minuta.

Matlab kod korišten je iz literature: Tamer Khatib, Wilfried Elmenreich, Modeling of photovoltaic systems using MATLAB®, 2016 i ispravljen za podatke grada Osijeka.

MATLAB KOD:

```
%Modeliran fotonaponskog modula korištenjem Matlab-a
 %-----------------------------------------------------
 %datum 15/06/2017 (N=165)
%Lokacija Hrvatska, Osijek, L =(45.5511111), LOD =
(18.6938889)
%Vrijeme za izračun visine i azimuta je odabrano 12:30 h
ili LMT=750
L=45.5511111; % zemljopisna širina
LOD=18.6938889; % zemljopisna duljina
N=166; %Broj dana/
Sjecanj+veljaca+ozujak+travanj+svibanj+15
T_GMT=+2; %Time difference with reference to GMT
LMT_minutes=750; %local mean time
Ds=23.45*sin((360*(N-81)/365)*(pi/180)); % kut deklinacije
B=(360*(N-81))/364; %Jednadžba vremena
EoT=(9.87*sin(2*B*pi/180))-(7.53*cos(B*pi/180))-
(1.5*sin(B*pi/180)); % jednadžba vremena
Lzt= 15* T_GMT; %LMST
if LOD>=0
Ts_correction=(-4*(Lzt-LOD))+EoT; %solar time correction
else
Ts_correction=(4*(Lzt-LOD))+EoT; %solar time correction
end
Ts=LMT_minutes+Ts_correction; %solar time
Hs=(15*(Ts-(12*60)))/60; %Hour angle degree
```

```
sin_Alpha=(sin(L*pi/180)*sin(Ds*pi/180))+(cos(L*pi/180)*cos
(Ds*pi/180)*cos(Hs*pi/180)); %altitude angle
Alpha=asind(sin_Alpha) %altitude angle
Sin_Theta=(cos(Ds*pi/180)*sin(Hs*pi/180))./cos(Alpha.*pi/18
0); %Azimuth angle
Theta=asind(Sin_Theta) %Azimuth angle
```

Nakon izvršenja prethodnog koda dobivamo riješenje:

Alpha=67.5427°

Theta=-9.3289°

Proračun ovih kuteva bitan je kod projektiranja i izgradje sustava fotonaponskih modula koji imaju mogućnost praćenja kretanja sunca. Ovaj proračun trenutno je za samo određeni sat koji smo odabrali i prema kojemu se radi simulacija.

Sunčani dan definira se kao vrijeme od izlaska do zalaska sunca. Da bi vidjeli gibanje Sunca tijekom dana od njegovog izlaska do zalaska potrebno je napraviti proračun visine i azimut kuta sunca za svaki sat.

Satni kut izlaska i zalaska sunca može se smatrati jednakim te se računa oprema relaciji:

$$\omega_{sr,ss} = \cos^{-1}(-\tan L \tan \delta) \tag{3-9}$$

Sada se sunčevo vrijeme za svaki kut može izračunati prema izrazu:

$$\frac{\omega_{\mathrm{ss,sr}}}{15} \pm 12h = AST_{\mathrm{sr,ss}} \tag{3-10}$$

za računanje vremena izlaska sunca ide minus u izrazu, a za računanje vremena zalaska sunca ide plus u formuli.

Prema već opisanim matematičkim relacijama od (3-2) - (3-8) te prema prethodno dvije napisane izračunat ćemo u programu visinu i kut za svaki korak koji iznosi 5 minuta.

Matlab kod korišten je iz literature:

Tamer Khatib, Wilfried Elmenreich, Modeling of photovoltaic systems using MATLAB®, 2016.

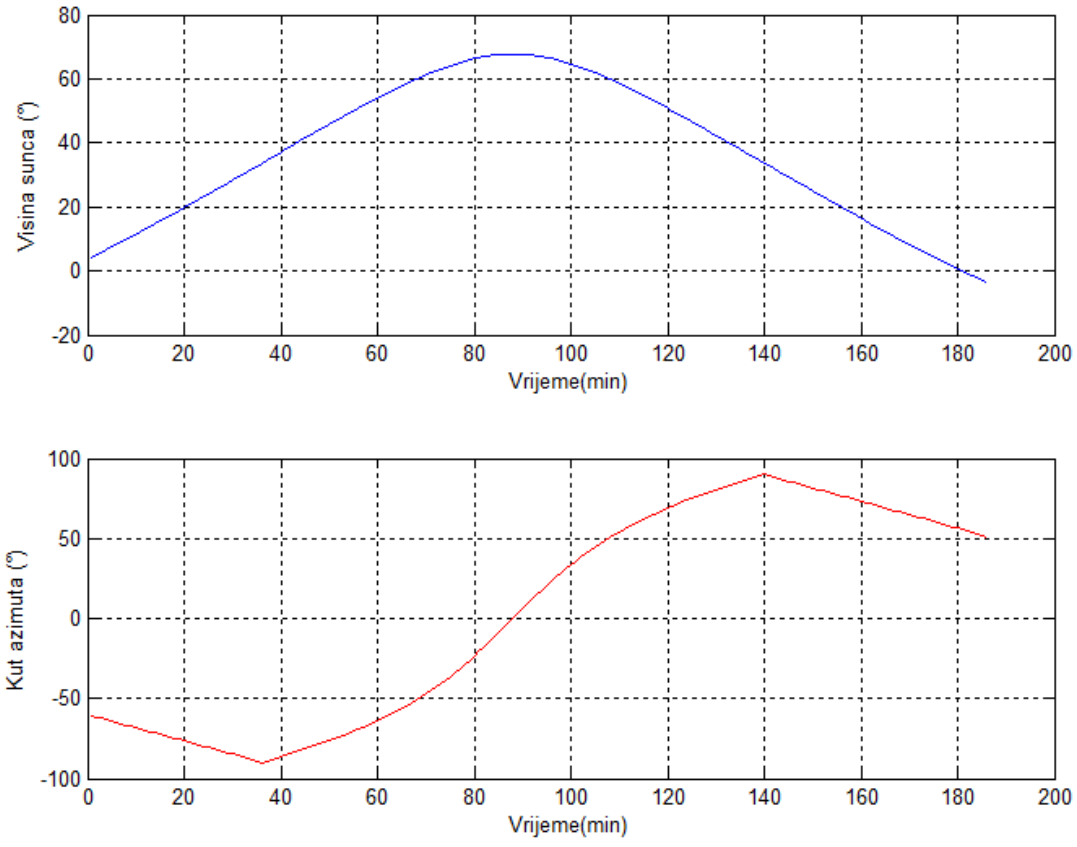
Matlab kod:

```
%-------------------------------------------------------
%datum 15/06/2017 (N=166)
%lokacija Hrvatska, Osijek, L =(45.5511111), LOD =
(18.6938889)
%Trajanje dana od izlaska do zalaska sunca 07:09 to
19:27

L=45.5511111; %Latitude / zemljopisna širina
LOD=18.6938889; %longitude /zemljopisna duljina
N=166; %Broj dana/
Sjecanj+veljaca+ozujak+travanj+svibanj+15
T_GMT=1; %Time difference with reference to GMT
Step=5;
Ds=23.45*sin((360*(N-81)/365)*(pi/180)); % Kut
deklinacije
Lzt= 15* T_GMT; %LMST
B=(360*(N-81))/364; %Jednadžba vremena
EoT=(9.87*sin(2*B*pi/180))- (7.53*cos(B*pi/180))-
(1.5*sin(B*pi/180)); %Jednadžba vremena
if LOD>=0
Ts_correction= (-4*(Lzt-LOD))+EoT; %solar time
correction
else
Ts_correction= (4*(Lzt-LOD))+EoT; %solar time
correction
end
Wsr_ssi=-tan(Ds*pi/180)*tan(L*pi/180);%satni kut
izlaska sunca
Wsrsr_ss=acosd(Wsr_ssi);%satni kut zalaska sunca
ASTsr=abs(((Wsrsr_ss/15)-12)*60));%Sunrise solar time
ASTss=(((Wsrsr_ss/15)+12)*60);%Sunset solar time
Tsr=ASTsr+abs(Ts_correction); %Sunrise local time
Tss=ASTss+abs(Ts_correction); %Sunset local time
Alpha=[];
Theta=[];
for LMT=Tsr:Step:Tss %for loop for the day time
Ts= LMT + Ts_correction; % solar time at each step
Hs=(15 *(Ts - (12*60)))/60; % Hour angle degree at each
step
sin_Alpha=(sin(L*pi/180)*sin(Ds*pi/180))+(cos(L*pi/180)
*cos(Ds*pi/180)* cos(Hs*pi/180)); %altitude angle
Alpha_i=asind(sin_Alpha) ; %altitude angle
```

```
Alpha=[Alpha;Alpha_i];%store altitude angle in array
Sin_Theta= (cos (Ds*pi/180)*sin
(Hs*pi/180))./cos(Alpha_i.*pi/180);%Azimuth angle
Theta_i=asind(Sin_Theta);%Azimuth angle
Theta=[Theta;Theta_i];% store azimuth angle in array
end
Alpha;
Theta;
subplot(2,1,1)%plot results
plot(Alpha)
```

Rezultat proračuna i simulacije:



Slika 3.6:*Grafovi visine sunca i satni kut sunca.*

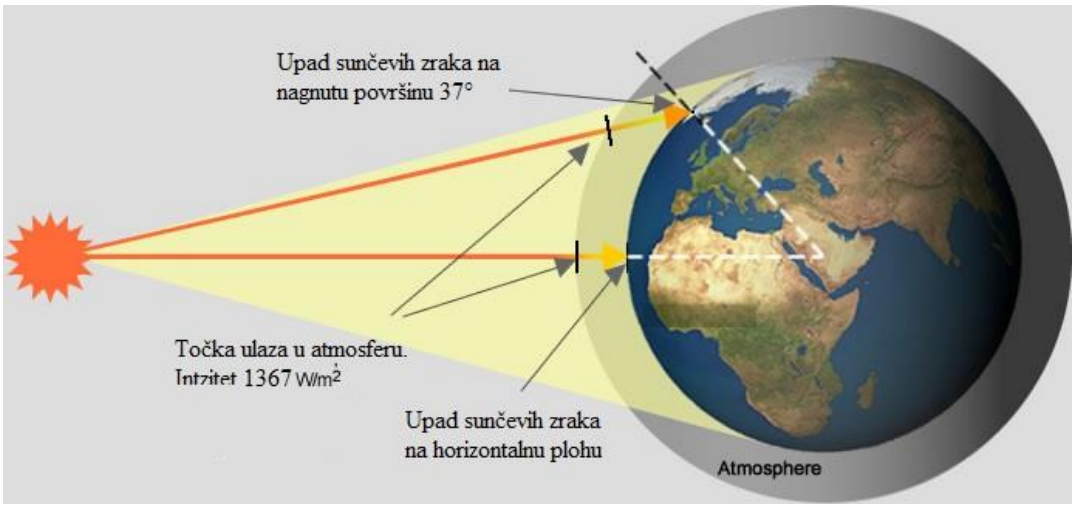
Simulacija je rađena za dan 15.06, kada je trajanje dana od izlaska u 7:09 do zalaska sunca u 19:27 h.

U rezultatima simulacije dobili smo dva grafa, koja prikazuju gibanje sunca tijekom dana, što nam je i bio zadatak. Na prvom grafu koji prikazuje alfu prema prethodno opisanim jednadžbama, to dakle predstavlja visinu sunca, od njegovog izlaska pa sve do zalaska. Vidimo kada je prvi graf na najvišoj mogućoj točki te ako iz te točke povučemo okomitu liniju na drugi graf koji prikazuje satni kut sunca, vidimo da tada crvena linija točno prolazi kroz nulu, što znači da je tada podne. A prema tome možemo zaključiti da smo točno napravili proračune i simulaciju.

2.2 Ekstraterističko sunčevo zračenje

Ekstrateristričko zračenje je zračenje sunca na granici Zemljine atmosfere. Vrijednost ekstraterističkog zračenja mijenja se s promjenom udaljenosti Zemlje od Sunca tijekom godine. Te promjene su od 1321 W/m^2 što se uzima kao najmanja vrijednost, a najveća 1412 W/m^2

Solarna (sunčeva) konstanta - može se definirati kao mjera gustoće svjetlosnog toka koji pada na neku površinu. Ova konstanta ne samo da uključuje vidljivu svjetlost, nego sve vrste elektromagnetskog zračenja. Njezin prosječni iznos je 1367,7 W/m^2. Njezina vrijednost se od kako su mjerenja postala pouzdana nije mijenjala ili obično dođe pro promjene za desetinku postotka jer preko sunčeva diska prolaze sunčeve pjege.



Slika 3.7:*Grafički prikaz ekstraterističkog sunčevog zračenja.[11]*

2.3 Mjerenje sunčeva zračenja

Mjerenje obuhvaća:

- Kratkovalno zračenje
    - raspršeno
    - izravno
- Dugovalno zračenje

Ukupni intenzitet sunčevog zračenje koje ploha primi sa Sunčevog diska sastoji se od izravnog te od raspršenog zračnja. Instrument kojim se mjeri zračenje na neku vodoravnu plohu uključujući sve valne duljine naziva se Piranometar.



Slika 3.8: *Piranometar.[12]*

Piranometri kao senzore koriste bimetalne, fotoelektrične, termoelektrične, piroelektrične elemente. Ovi uređaji stalno su izloženi atmosferskim utjecajima vlage, vode, korozije pa su na isto i otporni. Prijemnik zračenja hermetički je zatvoren te ima sustav za odvodnju vlage koja se kondenzira. U upotrebi najčešće su termoelektrični piranometri koji imaju toplinske detektore koji na temelju termoelektričnog efekta proizvode napon.

2.4 Snaga sunčeva zračenja

Prvi korak pri modeliranju izvora svjetla je procjena emitiranog zračenja iz Sunca. Energiju zračenja bilo kojeg objekta ili tijela možemo opisati funkcijom njegove temperature. Uobičajena praksa određivanja koliko neko tijelo zrači je usporedba s crnim tijelom.

Crno tijelo - je tijelo koje apsorbira gotovu svu vidljivu svjetlost, odnosno kojemu je za sve valne duljine koeficijent apsorcije približno jednak broju 1. Crno tijelo možemo još definirati i kao savršeni emiter, što bi značilo da po jedinici površine emitira više energije od nekog drugog

objekta na istoj temperaturi. A tijelo koje upija cijeli spektar valnih duljina nazivamo idealnim crnim tijelom. Tijelo koje savršeno apsorbira svu pristiglu energiju je tijelo kod kojeg ne dolazi do refleksije i transmisije. Takvo tijelo ne postoji, ali se može vrlo dobro prikazati s velikom zatvorenom šupljinom koja ima mali otvor i zračenje koje u uđe u šupljinu, skoro pa i nema šansu da izađe van.

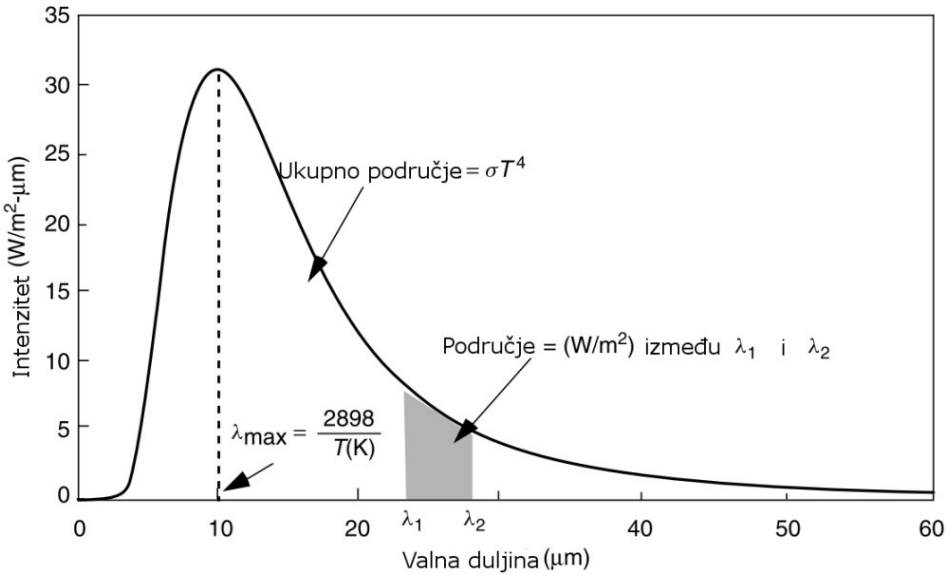
Planckovim zakonom mogu se opisati valovi emitirani od crnog tijela a ovise o temperaturi, prema izrazu koji slijedi:

$$E_\lambda = \frac{3.74 \cdot 10^8}{\lambda^5 \cdot \left[\exp\left(\frac{14400}{\lambda T_{ct}} \right) - 1 \right]} \tag{3-11}$$

gdje je:

- E_λ - snaga po jedinici površine crnog tijela [W/m^2],
- $\lambda -$ valna duljina,
- T_{ct} - temperatura crnog tijela.

Zemlja se može modelirati kao crno tijelo čija je temperatura 288K, što nam je i potrebno za daljnju simulaciju u programu MATLAB i vidljivo na slici 3.9.



Slika 3.9:*Emisija crnog tijela za temperaturu od 288K.*

Područje između valnih duljina predstavlja emisiju zračenja između njih, a cijelo područje ispod krivulje predstavlja ukupnu emisiju zračenja. Ukupna snaga zračenja može se izraziti prema Stefan-Boltzmanovom zakonu:

$$E = \varepsilon \cdot A_{ct} \cdot T_{ct} \cdot \sigma \tag{3-12}$$

Gdje je:

- E- emisija crnog tijela,
- ε - stupanj emisije od 0-1, 1 za crno tijelo,
- A_{ct} - površina crnog tijela,
- σ - Stefan-Boltzmannova konstanta, iznosi 5.67×10^{-8} W/m^2-K^4.

2.4.1 Modeliranje emisije zračenja zemlje kao crnog tijela

Prema prethodno opisanoj teoriji, i relacijama kao što je Planckov zakon, razvijen je kod u programskom paketu Matlab, prema kojem ćemo dobiti emisiju zračenja zemlje kao crnog tijela pri temperaturi zemlje od 288 K (15°C).

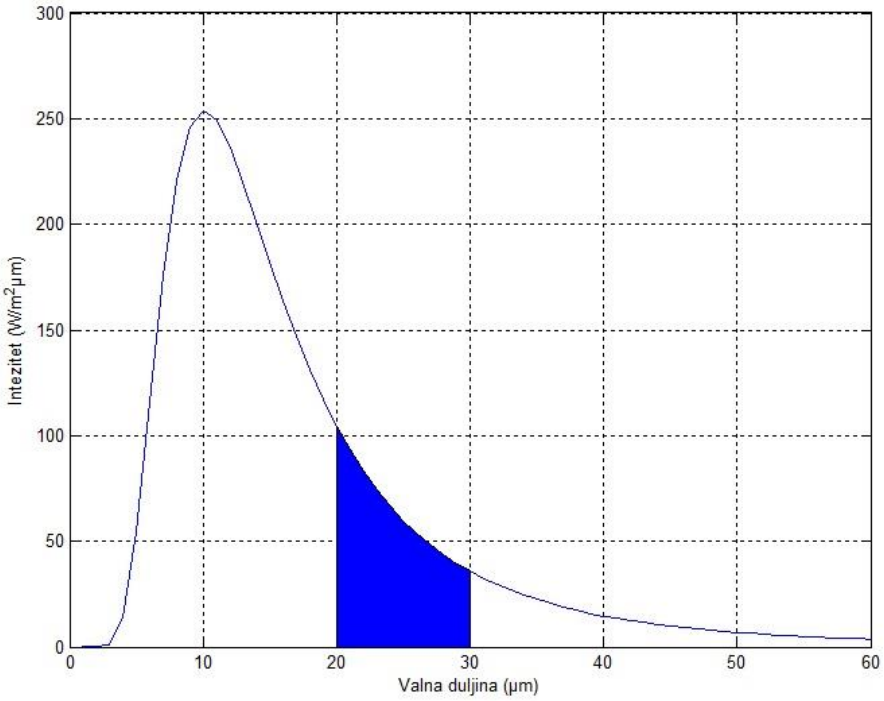
Spektar emisije zračenja zemlje kao crnog tijela računati ćemo prema izrazu (2-11), u koji je potrebno unijeti podatke o valnoj duljini, te temperaturi crnog tijela, prema sljedećem matlab kodu:

Matlab kod korišten je iz literature: Tamer Khatib, Wilfried Elmenreich, Modeling of photovoltaic systems using MATLAB®, 2016 i ispravljen za podatke grada Osijeka.

```
%-----------------------------------------------
%Spektralna snaga zračenja crnog tijela u rasponu
valnih duljina od 1 do 60 mikro metara
T=288; %temperatura crnog tijela
E_lamda=[]; %ukupna snaga zračenja crnog tijela po
jedinici površine
for lamda=1:1:60;
E_lamda_i= (3.74*10e8)/(lamda^5*(exp(14400/(lamda*T))-
1));
E_lamda=[E_lamda; E_lamda_i];
end
E_lamda
```

```
lamda=1:1:60;
plot(lamda,E_lamda);
hold on
lamda=20:1:30;
area(lamda,E_lamda(lamda),'Facecolor','b');
xlabel('Valna duljina (µm)')
ylabel('Intezitet (W/m^2µm)')
grid
```

Kao rezultat dobijemo:



Slika 3.10:*Rezultat simulacije za emisiju zračenja crnog tijela, za valne duljine u rasponu od 1- 60 µm.*

Za iscrtano područje valne duljine od 20 do 30 µm izračunati ćemo snagu emisije zračenja. Također prema izrazu (2-11) program će za svaku vrijednost od 20 do 30 µm uzimati broj i za svaki pojedini izračunati snagu, te ih sve na kraju zbrojiti.

Matlab kod korišten je iz literature: Tamer Khatib, Wilfried Elmenreich, Modeling of photovoltaic systems using MATLAB®, 2016 i ispravljen za podatke grada Osijeka.

```
T=288; %zračenje crnog tijela
E_lamda=[];
for lamda=20:1:30;
```

```
E_lamda_i=(3.74*10e8)/(lamda^5*(exp(14400/(lamda*T))-
1));
E_lamda=[E_lamda; E_lamda_i];
end
E_lamda;
Power=sum(E_lamda)
```

Prema odabranim valnim duljinama od 20 do 30 μm snaga zračenja prema proračunu iznosi:

Snaga zračenja=704.0801 W/m^2

2.5 Matematički opis ekstraterističkog zračenja

Vrijednost sunčeva zračenja izvan atmosfere varira kada zemlja kruži oko Sunca. Dakle, prilikom modeliranja ekstraterističkog sunčevog zračenja mora biti uzeta u obzir udaljenost između Sunca i Zemlje. Ekstraterističko sunčevo zračenje dano je prema sljedećem izrazu:

$$G_{ex} = G_o\left(\frac{R_{av}}{R}\right)^2 \tag{3-13}$$

Gdje je:

G_o= Solarna konstanta, 1368 W/m^2,
R_{av}= srednja udaljenost između Sunca i Zemlje,
R= trenutna udaljenost između Sunca i Zemlje.

Trenutna udaljenost između Sunca i Zemlje ovise o danu u godini. Za faktor R_{av}/R postoje različite aproksimacije jedna od njih je:

$$\left(\frac{R_{av}}{R}\right) = 1 + 0.0333\cos\left(\frac{2\pi N}{365}\right) \tag{3-14}$$

ako izraz (2-14) ubacimo u izraz (2-13) dobijemo:

$$G_{ex} = G_o\left(1 + 0.0333\cos\left(\frac{2\pi N}{364}\right)\right) \tag{3-15}$$

Ovo nam je bitno za koncept koji često koristimo u modelima sunčevog zračenja, je koncept ekstraterističkog sunčevog zračenja koji pada na vodoravnu površinu zemlje na granici atmosfere. Taj koncept ćemo razmotriti, te izvršiti simulaciju.

Ekstraterističko sunčevo zračenje koje pada na vodoravnu površinu koja se nalazi na određenoj lokaciji može se izračunati prema izrazu:

$$G_{exH} = G_{ex} \cos\varphi \tag{3-16}$$

gdje je φ zenitni kut. Iznos zenitnog kuta jednak je visinskoj vrijednosti već ranije opisanoj pa jednadžbu (2-16) možemo zapisati:

$$G_{exH} = G_o\left(1+0.0333\cos\left(\frac{360N}{364}\right)\right)\sin L\sin\delta+\cos L\cos\delta\cos\omega \tag{3-17}$$

2.6 Simulacija satnog ekstraterističkog zračenja na horizontalnu površinu Zemlje

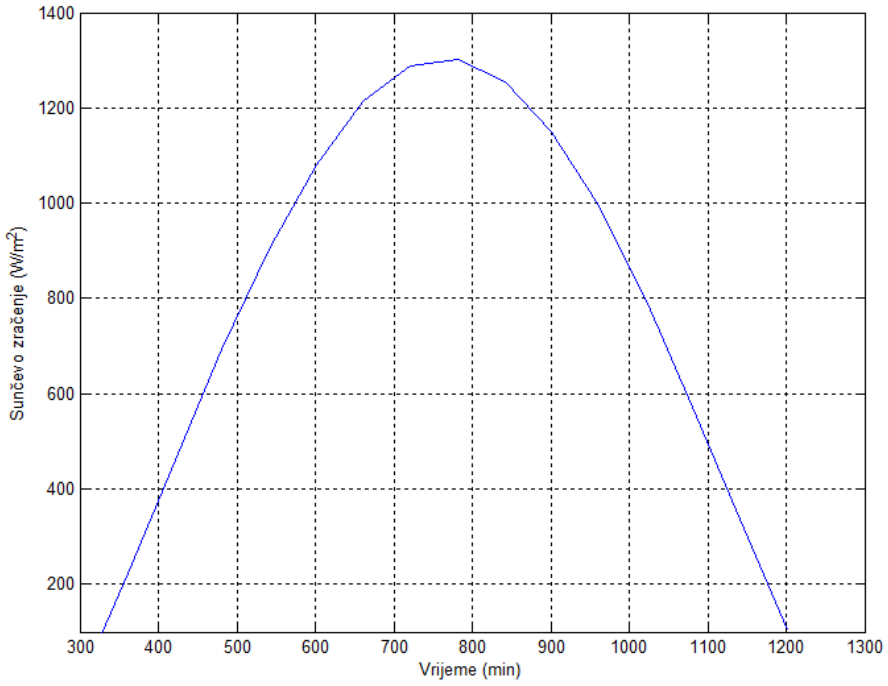
Potrebno je razviti kod u Matlab-u koji će nam prikazati satno ekstraterističko zračenje na horizontalnu površinu Zemlje. Što znači da ćemo dobiti iznos sunčevog zračenja na ulazu u Zemljinu atmosferu. Prema matematičkim jednadžbama za ekstraterističko zračenje koje ćemo koristiti, također su bitne i jednadžbe koje su već korištene u prethodnim simulacijama.

Matlab kod korišten je iz literature: Tamer Khatib, Wilfried Elmenreich, Modeling of photovoltaic systems using MATLAB®, 2016 i ispravljen za podatke grada Osijeka.

Matlab kod:

```
%-----------------------------------------------------
%datum 15/06/2017 (N=166)
%lokacija Hrvatska, Osijek, L =(45.5511111), LOD =
(18.6938889)
L=45.5511111; %zemljopisna širina
LOD=18.6938889; %zemljopisna duljina
N=166; %Broj dana/
Sjecanj+veljaca+ozujak+travanj+svibanj+15
T_GMT=2; % GMT
Step=60; %korak svakog sata
```

```
Ds=23.45*sin((360*(N-81)/365)*(pi/180)); % kut
deklinacije
B=(360*(N-81))/364; %jednadžba vremena
EoT=(9.87*sin(2*B*pi/180))- (7.53*cos(B*pi/180))-
(1.5*sin(B*pi/180)); %jedndžba vremena
Lzt= 15* T_GMT; %LMST
if LOD>=0
Ts_correction= (-4*(Lzt-LOD))+EoT; %trajanje sunca
ispravak
else
Ts_correction= (4*(Lzt-LOD))+EoT; %trajanje sunca
ispravak
end
Wsr_ssi=- tan(Ds*pi/180)*tan(L*pi/180); %Satni kut
izlaska sunca
Wsrsr_ss=acosd(Wsr_ssi); %Satni kud zalaska sunca
ASTsr=abs((((Wsrsr_ss/15)-12)*60)); %Sunrise solar time
ASTss=(((Wsrsr_ss/15)+12)*60); %Sunset solar time
Tsr=ASTsr+abs(Ts_correction) %Actual Sunrise time
Tss=ASTss+abs(Ts_correction) %Actual Sunset time
sin_Alpha=[];
for LMT=Tsr:Step:Tss %petlja za izračun trajanja
vremena  sunca
Ts= LMT + Ts_correction;
Hs=(15 *(Ts - (12*60)))/60;
sin_Alpha_i=(sin(L*pi/180)*sin(Ds*pi/180))+(cos(L*pi/18
0)*cos(Ds*pi/180)* cos(Hs*pi/180));
sin_Alpha=[sin_Alpha;sin_Alpha_i];
angle results
end
LMT=Tsr:Step:Tss
sin_Alpha;
Go=1367; %solarna konstanta
Gext=Go*(1+(0.0333*cos(360*N/365)));
GextH=Gext*sin_Alpha; %Ekstrateristično zračenje na
horizontalnoj plohi
plot(LMT,GextH)
grid
xlabel('Vrijeme (min)')
ylabel('Sunčevo zračenje (W/m^2)')
ylim([100 1400]);
```



Slika 3.11:*Prikaz sumulacije ekstraterističkog sunčevog zračenja.*

Prema dobivenim rezultatima simulacije, također vidimo da je ekstraterističko sunčevo zračenje također oko vremena podneva najveće, prije podneva se povećava do svoje maksimalne vrijednosti koja za moj slučaj iznosi oko 1300 W/m^2 , dok se nakon te vrijednosti počinje smanjivati.

2.7 Matematički opis modeliranja sunčeva zračenja na horizontalnu površinu na zemlji

Globalno sunčevo zračenje koje pada na vodoravnu površinu na zemlji sastoji se od dvije komponente. Te dvije komponente sunčevog zračenja su:

- Direktno sunčevo zračenje,
- Difuzno sunčevo zračenje.

Direktno sunčevo zračenje nazvano još i prema engleskoj riječi *beam radiation* je zračenje koje se kreće ravno od sunca pa sve do površine zemlje. Međutim kada sunčeva zraka prolazi kroz zemljinu atmosferu nailazi na prepreke, odnosno dolazi do njezinog prigušenja zbog prašine, zagađenja zraka, vodene pare i slično. Kada je nebo čisto i sunce vrlo visoko na nebu, izravno zračenje je oko 70% a difuzno oko 30%. Najsunčanija mjesta imaju manje sezonske varijacije

između difuznih i izravnih zračenja. Prema modelu jasnog neba s kojim se nastoji modelirati prigušenje direktnog zračenja izravno sunčevo zračenje koje dolazi na zemljinu površinu može se prikazati izrazom:

$$G_{\mathrm{B,norm}} = Ae^{\frac{-K}{\sin\alpha}} \tag{3-18}$$

Gdje je:

- A vidljivi vanzenaljski tok,
- K je bezdimenzionalni faktor nazvan optička dubina.

Faktori A i K računaju se prema izrazima:

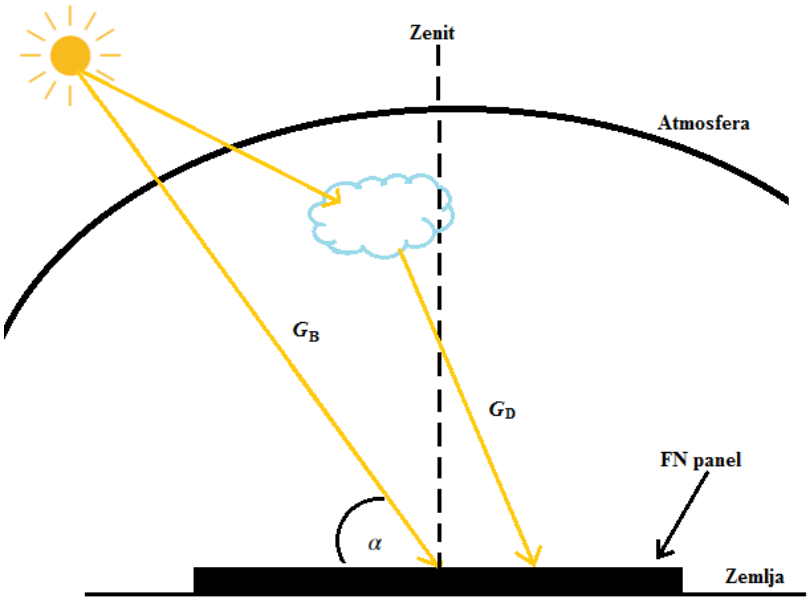
$$A = 1160 + 75\sin\left[\frac{360}{365}(N - 275)\right] \tag{3-19}$$

$$K = 0.174 + 0.035\sin\left[\frac{360}{365}(N - 100)\right] \tag{3-20}$$

Kada smo izračunali faktore A i K računamo $G_{\mathrm{B,norm}}$ a tek nakon toga računa se direktno sunčevo zračenje na vodoravnu površinu G_{B} prema izrazu:

$$G_{\mathrm{B}} = G_{\mathrm{B,norm}} \cdot \sin\alpha \tag{3-21}$$

Količina sunčeva zračenja koja se na putu kroz zemljinu atmosferu raspršizbog vodene pare, atmosferskih čestica, zbog prolaska kroz oblake naziva se **difuzno sunčevo zračenje.**Izračun difuznog zračenja koje pada na fotonaponski modul je teže nego kod izračuna direktnog zračenja. Kada difuznog zračenja nebi bilo, tamo gdje je sjena nekog objekta bio bi totalni mrak. Količina difuznog zračenja je tijekom zime veća, a po ljeti je manja.



Slika 3.12:*Slikoviti prikaz direktnog (G_B) i difuznog G_D zračenja na vodoravnu površinu (fotonaponski modul).*

Radi lakšeg proračuna, modeli difuznog zračenja pretpostavljaju da zračenje iz svi smjerova dolazi jednakim intezitetom. Povećavanjem onečišćenja zraka količina difuznog zračenja također se povećava. Kada su fotonaponski moduli postavljeni vodoravno, na njih dolazi puno veća količina difuznog zračenja nego kada su postavljeni pod kutom, tada se difuzno zračenje smanjuje a povećava se utjecaj direktnog sunčevog zračenja. Difuzno zračenje možemo aproksimirati izrazom:

$$G_{\mathrm{D}} = 0.095 + 0.04 \sin\left[\frac{360}{365}(N - 100)\right] G_{\mathrm{B,norm}} \tag{3-22}$$

Ukupna količina zračenja je zbroj obje komponente, direktno i difuzno.

$$G_{\mathrm{T}} = G_{\mathrm{B}} + G_{\mathrm{D}} \tag{3-23}$$

2.7.1 Simulacijski model prikaza inteziteta sunčeva zračenja na vodoravnu površinu zemlje

Prema prethodno opisanom direktnom i difuznom zračenju, te prema izrazima iz prethodnih simulacija, podatcima o zemljopisnoj dužini i širini i izrazima od (2-18) do izraza (2-23) u programskom paketu Matlab razvijen je kod koji će nam dati prikaz intenziteta sunčeva zračenja

na vodoravnu površinu na koju padaju sunčeve zrake. Ta vodoravna površina u našem slučaju je fotonaponski modul a također može biti i solarni kolektor za zagrijavanje vode.

Matlab kod korišten je iz literature: Tamer Khatib, Wilfried Elmenreich, Modeling of photovoltaic systems using MATLAB®, 2016 i ispravljen za podatke grada Osijeka.

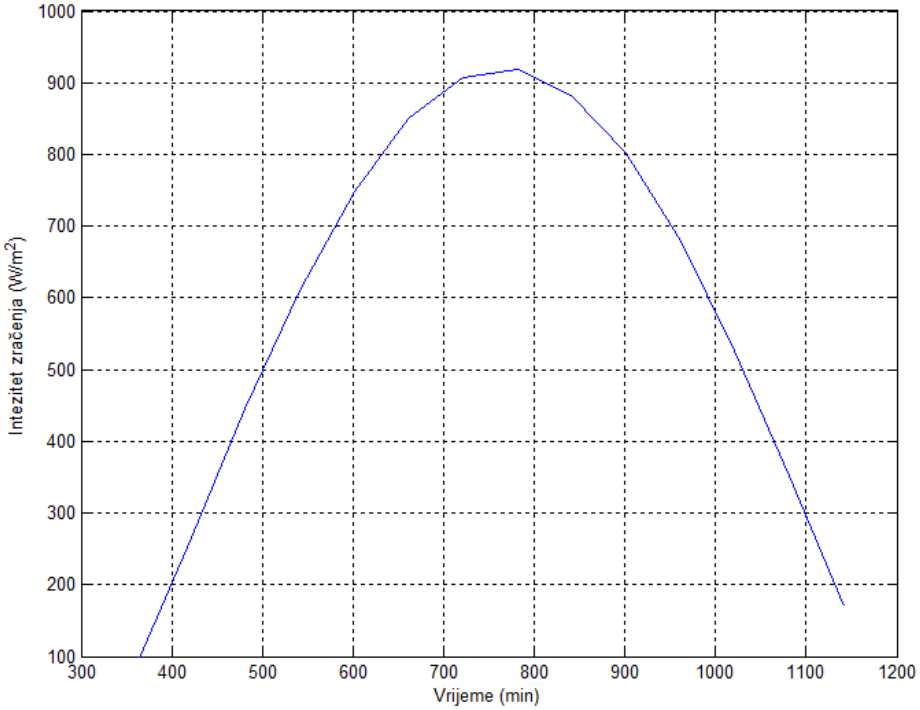
```
%-----------------------------------------------------
%Datum 15/06/2017 (N=166)
%Lokacija Hrvatska, Osijek, L =(45.5511111), LOD = (18.6938889)
%Trajanje sunčeva dana 07:09 to 19:27

L=45.5511111; %zemljopisna širina
LOD=18.6938889; %zemljopisna duljina
N=166; %Broj dana/ Sjecanj+veljaca+ozujak+travanj+svibanj+15
T_GMT=2; %GMT
Step=60; %vremenski korak
Ds=23.45*(sind((360*(N-81)/365))); % kut deklinacije
%=====================================================
B=(360*(N-81))/364; %Jednadžba vremena
EoT=(9.87*sin(2*B*pi/180))-(7.53*cos(B*pi/180))-
(1.5*sin(B*pi/180)); %Jednadžba vremena
Lzt=15*T_GMT; %LMST
if LOD>=0
Ts_correction=(-4*(Lzt-LOD))+EoT; %Ispravak trajanaja sunca
else
Ts_correction=(4*(Lzt-LOD))+EoT; %Ispravaka trajanja sunca
end
Wsr_ssi=-tan(Ds*pi/180)*tan(L*pi/180); %Satni kut izlaska sunca
Wsrsr_ss=acosd(Wsr_ssi); %Satni kut zalaska sunca
ASTsr=abs((((Wsrsr_ss/15)-12)*60)); %Sunrise solar time
ASTss=(((Wsrsr_ss/15)+12)*60); %Sunset solar time
Tsr=ASTsr+abs(Ts_correction) %Trenutni izlazak sunca
Tss=ASTss+abs(Ts_correction) %Trenutni zalazak sunca
sin_Alpha=[];
for LMT=Tsr:Step:Tss %petlja za izračun trajanja vremena sunca
Ts= LMT + Ts_correction;
Hs=(15 *(Ts - (12*60)))/60; %Stupanj satnog kuta
sin_Alpha_i=(sin(L*pi/180)*sin(Ds*pi/180))+(cos(L*pi/180)*cos(Ds
*pi/180)* cos(Hs*pi/180)); %kut visine
sin_Alpha=[sin_Alpha;sin_Alpha_i];
end
sin_Alpha
%============Proračun sunčeva zračenja==============
A=1160+(75*sind((360/365)*(N-275))); %Izvanzemaljski tok
energije
k= 0.174+(0.035*sind((360/365)*(N-100)));
C= 0.095+(0.04*sind((360/365)*(N-100)));
G_B_norm=A*exp(-k./sin_Alpha) % Dostupno direktno zračenje u
zraku
```

```
G_B=G_B_norm.*sin_Alpha; %Ukupno direktno zračenje u zraku koje
pada na vodoravnu površinu
G_D=C*G_B_norm; %Difuzno zračenje koje pada na vodoravnu
površinu
G_T= G_B+G_D

G_A=[000 0.1 0.2431 0.4422 0.5966 0.865 0.976 1.031 1.016 0.936
0.788 0.645 0.55 0.4 0.2 0.05];
LMT=Tsr:Step:Tss
plot(LMT,G_T)
hold on
plot(LMT,G_A*1e3, 'red')
grid
```

Kao rezultat dobije se:

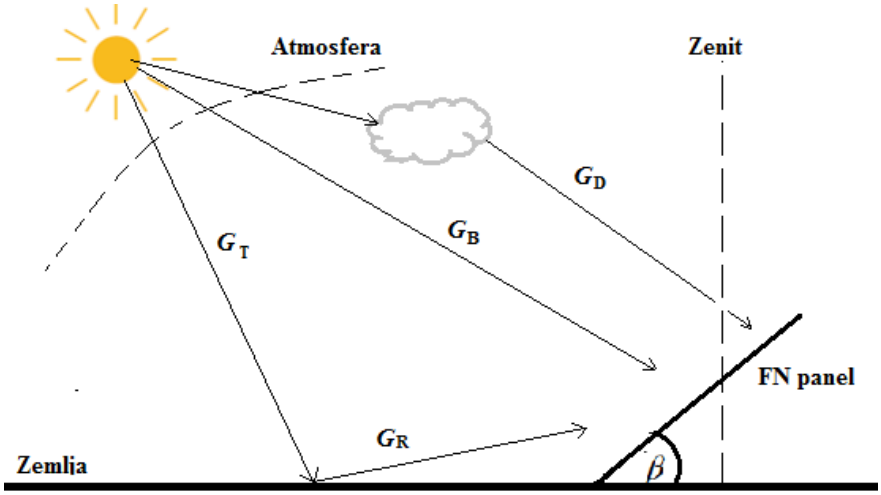


Slika 3.13:*Prikaz simulacije upada sunčevih zraka na vodoravnu površinu.*

Prema rezultatima simulacije vidimo da proračun intenziteta zračenja Sunca na vodoravnu površinu opet ima maksimalnu vrijednost oko podneva, pri vrijednosti od oko 800 minuta. Što je bilo i za očekivati, jer sunce je tada u svojoj najvišoj točki i ima najveći intenzitet zračenja. Nakon podneva intenzitet sunčeva zračenja se počinje smanjivati, što je i vidljivo iz simulacije.

2.8 Zračenje sunca na nagnutu površinu na zemlji

Prilikom iskorištavanja sunčeve energije i pretvorbe u električnu energiju putem fotonaponskih modula i sustava gledamo kako iskoristiti što veću količinu besplatne energije. Postavljanjem fotonaponskih modula na vodoravnu površinu, dakle bez nagiba prema suncu, tada njihov kapacitet nije dovoljno iskorišten. Pa se stoga oni postavljaju pod određenim kutem prema suncu, kako bi se što bolje iskoristila energija i intenzitet zračenja Sunca.



Slika 3.14:*Upad sunčevih zraka na nagnutu površinu (fotonaponski modul).*

Kod ovog modela imat ćemo novu komponentu a to je reflektirano zračenje. Sve kratice sa slike 3.14 bit će detaljnije pojašnjene u sljedećem potpoglavlju. Ovakav način postavljanja fotonaponskih modula je puno učinkovitiji od modula koji su postavljeni vodoravno. Ukupno zračenje na nagnutu plohu možemo opisati kao zbroj sve tri komponente sunčeva zračenja, direktne, difuzne, i reflektirane. Modeli koji služe za izračun sunčeva zračenje na nagnutu površinu jesu:

- Liu-Jordan, Klein - izotropni model,
- anizotropni model prve generacije - Hay, Reindl, Bugler,
- anizotropni model druge generacije - Gueymard, Perez, Munner.

U ovom radu koristit će se Liu-Jordan model.

2.9 Matematički opis modeliranja sunčeva zračenja na nagnutu površinu na zemlji

U slučaju kod nagnute plohe, postoje tri komponente zračenja sunca na nagnutu plohu. A one su:

- direktna $G_{B,\beta}$,
- difuzna $G_{D,\beta}$ i
- reflekirano G_R sunčevo zračenje.

Ove tri komponente stvaraju ukupno sunčevo zračenje na nagnutu plohu i može se zapisati pomoću izraza:

$$G_{T,\beta} = G_{B,\beta} + G_{D,\beta} + G_R \tag{3-24}$$

Prethodnu jednadžbu još možemo zapisati kao:

$$G_{T,\beta} = G_B R_B + G_D R_D + G_T \rho R_R \tag{3-25}$$

Koeficijent R_B je omjer između sunčeve energije na vodoravnu površinu i sunčeve energije na nagnutu površinu a računa se prema izrazu:

$$R_B = \frac{\cos(L-\beta)\cos\delta \sin\omega_{SS} + \omega_{SS}\sin(L-\beta)\sin\delta}{\cos L \cos\delta \sin\omega_{SS} + \omega_{SS}\sin L \sin\delta} \tag{3-26}$$

Koeficijent R_D je omjer između difuzne sunčeve energije na vodoravnu površinu i difuzne sunčeve energije na nagnutu površinu klasificiramo ga u izotropni model. Izotropni model temelji se na tome da izotropni modeli imaju isti intezitet bez obzira na smjer iz kojeg se mjeri. Takav model je već prije spomenuti Liu i Jordan model, a R_D računa se prema izrazu:

$$R_D = \frac{G_B}{G_T} R_B + \left(1 - \frac{G_B}{G_T}\right)\left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right)\left(1 + \sqrt{\frac{G_B}{G_T}}\sin^3\left(\frac{\beta}{2}\right)\right) \tag{3-27}$$

A koeficijent R_R je faktor reflektirane solarne energije na nagnutoj površini, a računa se prema izrazu:

$$R_R = \frac{1-\cos\beta}{2} \tag{3-28}$$

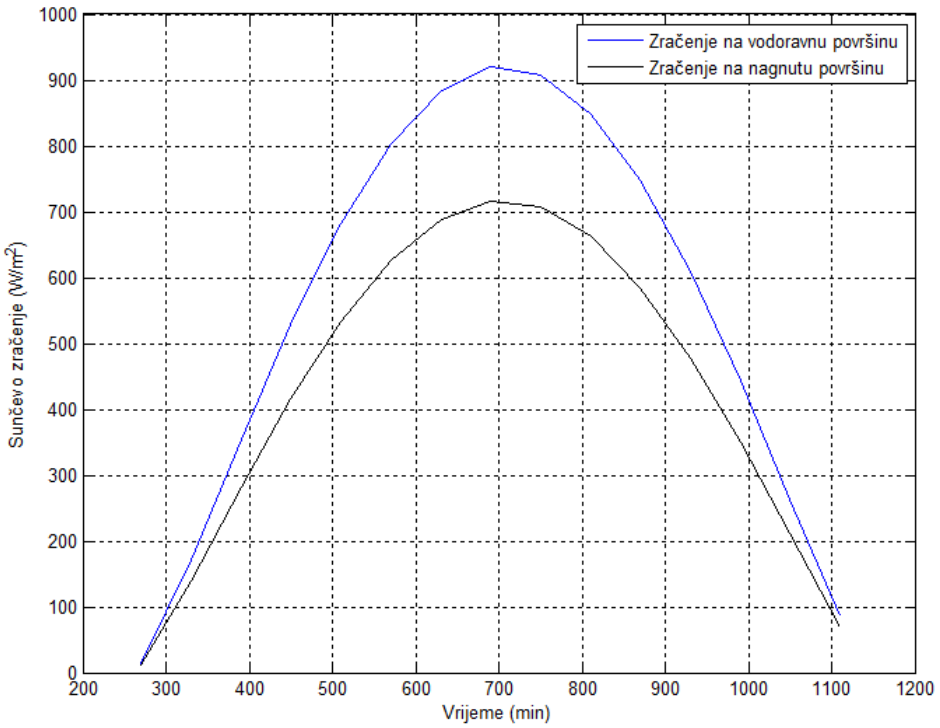
ρ je Albedo koji pokazuje količinu svjetlosti koja se reflektira s nekog tijela. Bijela tijela reflektirala bi svu svjetlost koja padne na njih, tada je vrijednost albeda jednaka 1. Za apsolutno crno tijelo koje bi apsorbiralo svu svjetlost, odnosno nebi reflektiralo ništa svjetlosti tada njegov albedo iznosi 0. Albedo se određuje u astronomiji za planete, satelite, te u meterologiji za različto tlo. Iznos albeda za tlo prekriveno snijegom je 80%, za tlo prekriveno travom 25%.

2.9.1 Simulacija modela inteziteta sunčeva zračenja na nagnutu površinu

Matlab kod korišten je iz literature: Tamer Khatib, Wilfried Elmenreich, Modeling of photovoltaic systems using MATLAB®, 2016 i ispravljen za podatke grada Osijeka.

```
%-----------------------------------------------------
%Datum 15/06/2017 (N=166)
%Lokacija Hrvatska, Osijek, L =(45.5511111), LOD = (18.6938889)
%Trajanje sunčeva dana 07:09 to 19:27
L=45.5511111; %zemljopisna širina
LOD=18.6938889; %zemljopisna duljina
N=166; %Broj dana/ Sjecanj+veljaca+ozujak+travanj+svibanj+15
T_GMT=1; %GMT
Step=60; %vremenski korak
Ds=23.45*(sind((360*(N-81)/365))); % kut deklinacije
B=(360*(N-81))/364; %jednadžba vremena
EoT=(9.87*sin(2*B*pi/180))- (7.53*cos(B*pi/180))- (1.5*sin(B*pi/180));
%jednadžba vremena
Lzt= 15* T_GMT; %LMST
if LOD>=0
  Ts_correction= (-4*(Lzt-LOD))+EoT; %Ispravak trajanaja sunca
else
Ts_correction= (4*(Lzt-LOD))+EoT; %Ispravak trajanaja sunca
end
Wsr_ssi=- tan(Ds*pi/180)*tan(L*pi/180); %Satni kut izlaska sunca
Wsrsr_ss=acosd(Wsr_ssi) %Satni kut zalaska sunca
ASTsr=abs(((Wsrsr_ss/15)-12)*60)); %Sunrise solar time
ASTss=(((Wsrsr_ss/15)+12)*60) %Sunset solar time
Tsr=ASTsr+abs(Ts_correction); %Trenutni izlazak sunca
Tss=ASTss+abs(Ts_correction); %Trenutni zalazak sunca
sin_Alpha=[];
for LMT=Tsr:Step:Tss-60
Ts= LMT + Ts_correction; % solar time
Hs=(15 *(Ts - (12*60)))/60; % Hour angle degree
sin_Alpha_i=(sin(L*pi/180)*sin(Ds*pi/180))+(cos(L*pi/180)*cos(Ds*pi/18
0)* cos(Hs*pi/180)); %altitude angle
sin_Alpha=[sin_Alpha;sin_Alpha_i];
end
sin_Alpha;
%=====================================================
A=1160+(75*sind((360/365)*(N-275))); %Izvanzemaljski tok energije
k= 0.174+ (0.035*sind((360/365)*(N-100)));
C= 0.095+ (0.04*sind((360/365)*(N-100)));
%-----proračun sunčeva zračenja na vodoravnu površinu
G_B_norm=A*exp(-k./sin_Alpha) % Dostupno direktno zračenje u zraku
```

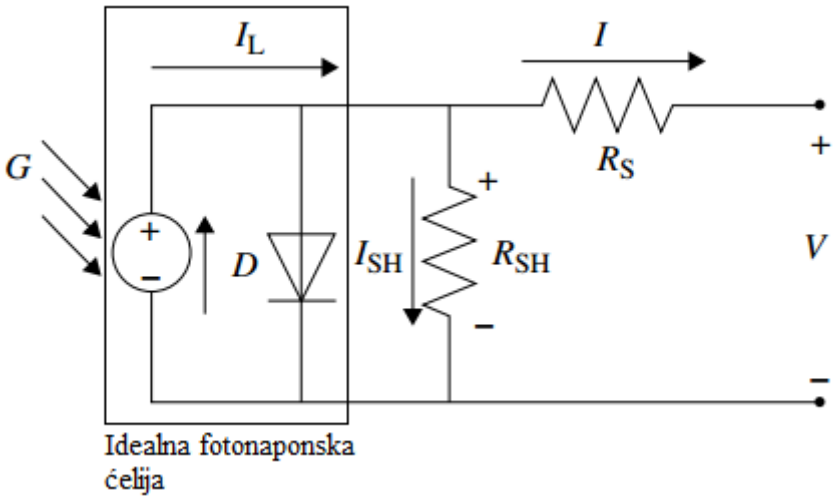
```
G_B=G_B_norm.*sin_Alpha; %Ukupno direktno zračenje u zraku koje pada
na vodoravnu površinu
G_D=C*G_B_norm; %Difuzno zračenje koje pada na vodoravnu površinu
G_T= G_B+G_D;
%-----Proračun sunčeva zračenja na nagnutu površinu---------------
Beta=L; %tilt angle
Rb=((cos((L-
Beta).*(pi/180)).*cos(Ds.*(pi/180)).*sin(Wsrsr_ss.*(pi/180))+(Wsrsr_ss
.*(pi/180)).*sin((L-
Beta).*(pi/180)).*sin(Ds.*(pi/180)))))./(((cos(L*(pi/180)).*cos(Ds.*(pi
/180)).*sin(Wsrsr_ss.*(pi/180)))+((Wsrsr_ss.*(pi/180)).*sin(L*(pi/180)
).*sin(Ds.*(pi/180)))));
Rd=(1+cos(Beta*(pi/180)))./2;
Rr= (0.3*(1-cos(Beta*(pi/180)))).*2;
G_B_Beta=(G_B.*Rb);
G_D_Beta=(G_D.*Rd);
G_R=(G_T.*Rr);
G_T_Beta=G_B_Beta+G_D_Beta+G_R;
LMT=Tsr:Step:Tss-60;
plot(LMT,G_T)
hold on
plot(LMT,G_T_Beta, 'k')
grid
xlabel ('Vrijeme (min)')
ylabel ('Sunčevo zračenje (W/m^2)')
legend('Zračenje na vodoravnu površinu','Zračenje na nagnutu
površinu')
```



Slika 3.15: *Simulacija sunčeva zračenja na vodoravnu i nagnutu površinu.*

3 FOTONAPONSKA ĆELIJA

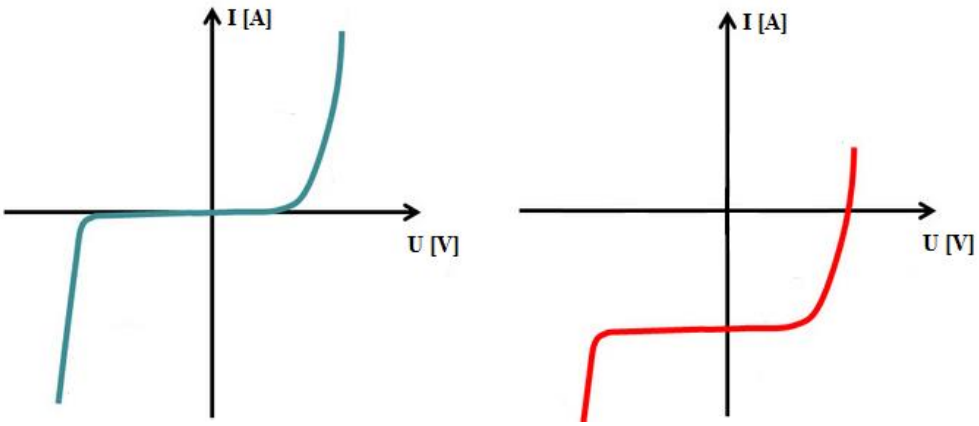
Fotonaponsku ćeliju možemo prikazati kao strujni izvor u paralelnom spoju s diodom. Energija svjetla koja obasjava fotonaponsku ćeliju stvara slobodne nosioce naboja. Struja koju daje strujni izvor takozvana fotoelektrična struja ovisi o intenzitetu sunčeva zračenja koje pada na ćeliju. Karakteristika fotonaponske ćelije tijekom mraka ponaša se kao dioda, nije aktivni uređaj to jest ne proizvodi struju i napon.



Slika 4.1: *Ekvivalentni krug fotonaponske ćelije.*

Idealna fotonaponska ćelija može se modelirati pomoću strujnog izvora i diode, ali to je samo u teoriji, u praksi ne postoji idealna fotonaponska ćelija tako da se modelu idealne dodaju otpor u seriju (R_S) i paralelu (R_{SH}). Fotonaponsku ćeliju možemo promatrati kao diodu, jer su im karakteristike slične.

a) b)

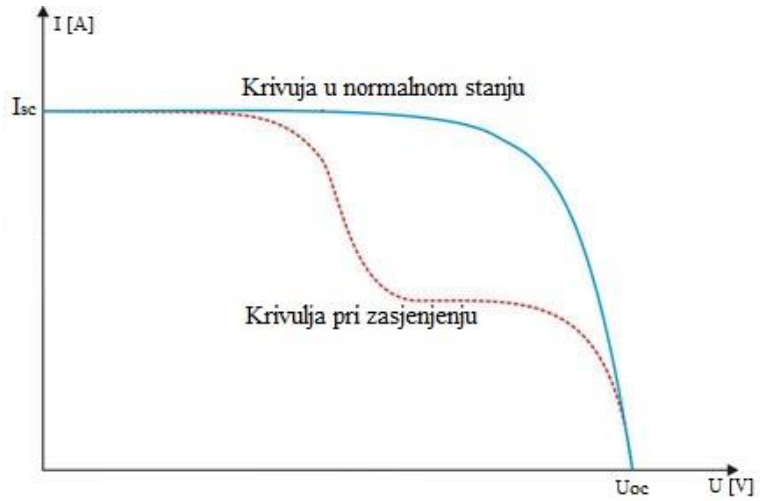


Slika 4.2: *a) fotonaponska ćelija u mraku, b) obasjana fotonaponska ćelija.*

Na slici 4.2a vidimo karakteristiku fotonaposke ćelije koja se nalazi u mraku, a također je to karakteristika poluvodičke diode. Kada svjetlost obasja fotonaponsku ćeliju karakteristika se pomiče prema u četvrti kvadrant (slika 4.2b). Kako je fotonaponska ćelija izvor pozitivne struje, te radi lakšeg shvaćanja i prikaza karakteristiku iz četvrtog kvadranta crtamo u prvom kvadrantu.

3.1 Utjecaj zasjenjenja fotonaponske ćelije

Jedna fotonaponska ćelija ima napon od oko 0.6 V dok struja ide i do nekoliko ampera ovisno o veličini ćelije te intenzitetu sunčeva zračenja. Ovakav mali napon nije nam od koristi, da bi postigli veći napon fotonaponske ćelije spajamo u seriju. Obično se spaja oko 36 ćelija u seriju kako bi postigli napon dovoljan za punjenje 12V baterija. Takvim spajanjem ćelija dobivamo fotonaponski modul, spajanjem više fotonaponskih modula dobivamo fotonaponski niz. Tako napravljene module i fotonaponske sustave moramo prilikom postavljanja na određena mjesta i objekte što je moguće bolje zaštit od zasjenjenja. Zasjenjenje mogu izazvati drveća, lišće, kuće i drugi objekti. Fotonaponske ćelije i moduli vrlo su osjetljivi na zasjenjenje, jer prilikom zasjenjenja samo jedne ćelije dolazi do velikog smanjenja proizvodnje električne energije iz fotonaponskog modula ili fotonaponskog niza, što se može vidjeti iz I-V karakteristike.

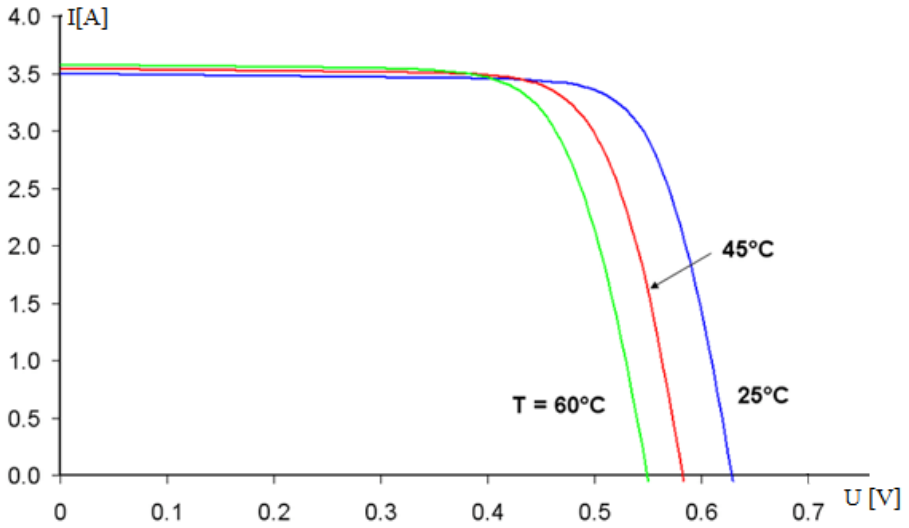


Slika 4.3: *Karakteristika pri zasjenjenju fotonaponske ćelije.*

Tijekom zasjenjenja jedne ćelije ona će proizvoditi manje struje od ostalih ćelija te će biti prepreka za prolaz struje iz ostalih ćelija, a to prikazuje isprekidana krivulja na slici 4.3. Kada se dogodi potpuno zasjenjenje jedne ćelije, ta ćelija više ne proizvodi struju nego postaje obična poluvodička dioda. Sada imamo reverzni napon koji dolazi na diodu koji je dovoljan da dođe do proboja diode te zagrijavanja i taljenja i uništenja fotonaponske ćelije. Da se to nebi događalo koriste se premosne diode koje se dodaju paraleleno s ćelijom ili modulom.

3.2 Utjecaj temperature

Fotonaponski moduli direktno su izloženi utjecajima okoline, pa tako i utjecaju temperature. Temperatura ima utjecaj na električne karakteristike fotonaponske ćelije i modula.



Slika 4.4: *Utjecaj temperature na karakteristiku fotonaponske ćelije.[13]*

Prema slici 4.4 vidimo kako se prilikom prilikom promjene temperature mjenja karakteristika fotonaponske ćelije. Za povećanje temperature ćelije napon se smanjuje, a za smanjenje temperature napon ćelije se povećava. Struja se bitno ne mjenja tijekom promjene temerature. Serijskim povezivanjem modula povećava im se napon, pa je stoga bitno provjeriti povećanje napona pri najhladnijim uvijetima, kako nebi došlo do prevelikog napona koji bi oštetio uređaje koji su spojeni na module.

3.3 Matematički model fotonaponske ćelije

U idealnoj fotonaponskoj ćeliji pretpostavlja se da je R_S=0, a R_{SH} beskonačan. Ukupna struja fotonaponske ćelije je razlika imeđu fotostruje i normalne struje diode, a računa se prema izrazu:

$$I = I_L - I_o\left(e^{\frac{q(U+IR_S)}{nKT}} - 1\right) - \frac{U+IR_S}{R_p} \tag{4-1}$$

fotostruja I_L ovisna je o temperaturama T_1 i T_2 te se računa prema izrazu:

$$I_L = I_L(T_1) + K_o(T - T_1) \tag{4-2}$$

gdje je:

$$I_L(T_1) = I_{sc_{T1,nom}}\left(\frac{G}{G_{nom}}\right) \tag{4-3}$$

$$K_o = \frac{I_{SC_{T2}} - I_{SC_{T1}}}{T_2 - T_1} \tag{4-4}$$

gdje je:

- G – trenutni intenzitet sunčeva zračenja,
- G_{nom} – intenzitet zračenja pri testiranju.

I_o – struja zasićenja diode računa se prema izrazu:

$$I_o = I_{o_{T1}} \left(\frac{T}{T_1} \right)^{\frac{3}{n}} e^{\frac{qV_{qT1}}{nk\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1}\right)}} \tag{4-5}$$

$$I_{o_{T1}} = \frac{I_{SC_{T1}}}{\left(e^{\frac{qV_{oc_{T1}}}{nkT_1}} - 1 \right)} \tag{4-6}$$

Serijski otpor fotonaponske ćelije računa se prema izrazu:

$$R_s = -\frac{dV}{dI_{V_{oc}}} - \frac{1}{X_V} \tag{4-7}$$

$$X_V = I_{o_{T1}} \frac{q}{nkT_1} e^{\frac{qV_{oc_{T1}}}{nkT_1}} \tag{4-8}$$

Napon otvorenog kruga računa se prema izrazu:

$$U_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_o} \right) = U_t \ln\left(\frac{I_L}{I_o} \right) \tag{4-9}$$

$$U_t = mkT_c / q \tag{4-10}$$

- U_t – termalni napon,
- T – Apsolutna temperatura ćelije.

Točka maksimalne snage računa se prema izrazu:

$$P_{\max} = U_{\max} \cdot I_{\max} \tag{4-11}$$

Maksimalna korisnost fotonaponske ćelije ili modula je omjer između maksimalne snage i ulazne snage a računa se prema izrazu:

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{in}}} = \frac{I_{\max} \cdot U_{\max}}{A \cdot G_{\text{a}}} \tag{4-12}$$

gdje je:

- A – površina fotonaponske ćelije ili modula,
- G_{a} – intenzitet sunčeva zračenja.

Faktor ispune stvarna mjera I-U karakteristike, za učinkovitu fotonaponsku ćeliju ili modul mora biti veća od 0.7. Povećava se kako se temperatura ćelije smanjuje i obrnuto, a računa se prema izrazu:

$$FF = \frac{I_{sc} U_{oc}}{I_{\max} U_{\max}} \tag{4-13}$$

gdje je:

- I_{sc} – struja kratkog spoja,
- U_{oc} – napon praznog hoda,
- $I_{\max}$ – maksimalna struja,
- $U_{\max}$ – maksimalni napon.

3.4 Simulacija fotonaponskog modula i usporedba s mjerenjima u laboratoriju

U programskom paketu Matlab razviti ćemo kod pomoću kojeg ćemo dobiti I-U i P-U karakteristike. U našem Laboratoriju za obnovljive izvore energije odabrali smo tri fotonaponska modula te prema njima napravili simulaciju u programskom paketu Matlab, te napravili stvarna mjerenja koja su uspoređena s rezulatatima simulacije. Odabrani fotonaponski moduli su:

- Bisol BMO – 250
- Bisol BMU – 250
- MASDAR MPV100-S

Matlab kod korišten je iz literature: Tamer Khatib, Wilfried Elmenreich, Modeling of photovoltaic systems using MATLAB®, 2016 i ispravljen za podatke fotonaponskih modula it Laboratorija za obnovljive izvore energije fakluteta.

```
function Ia = PV_model(Va,Suns,TaC)

% G = intenzitet zračenja (1 Sun = 1000 W/m?2)
% T = Temperatura u stupnjevima celzijevim
k=1.38e-23; % Boltzmanova konstanta
q=1.60e-19; % naboj elektrona
TaC=25;
Suns=0.99
Va=0:1:39;
A = 2; % A je factor, =2 za kristalne, <2 amorfne
Vg = 1.12; % Napon praga, 1.12eV za silicijske, 1.75 za amorfne
silicijske.
Ns = 60; % broj ćelija spojen u seriju
T1 = 273 + 25;
Voc_T1 = 37.9 /Ns; % Napon otvorenog kruga po ćeliji na temp. T1
Isc_T1 = 8.80; % Struja KS po ćeliji na temp T1
T2 = 273 + 75;
Voc_T2 = 34.6 /Ns; % Napon otvorenog kruga po ćeliji na temp. T2
Isc_T2 =7.12; % Struja KS po ćeliji na temp T2
TaK = 273 + TaC; % temperatura niza
TrK = 273 + 25; % referentna temperatura
%
Iph_T1 = Isc_T1 * Suns;
a = (Isc_T2 - Isc_T1)/Isc_T1 * 1/(T2 - T1);
Iph = Iph_T1 * (1 + a*(TaK - T1));
Vt_T1 = k * T1 / q; % = A * kT/q
Ir_T1 = Isc_T1 / (exp(Voc_T1/(A*Vt_T1))-1);
```

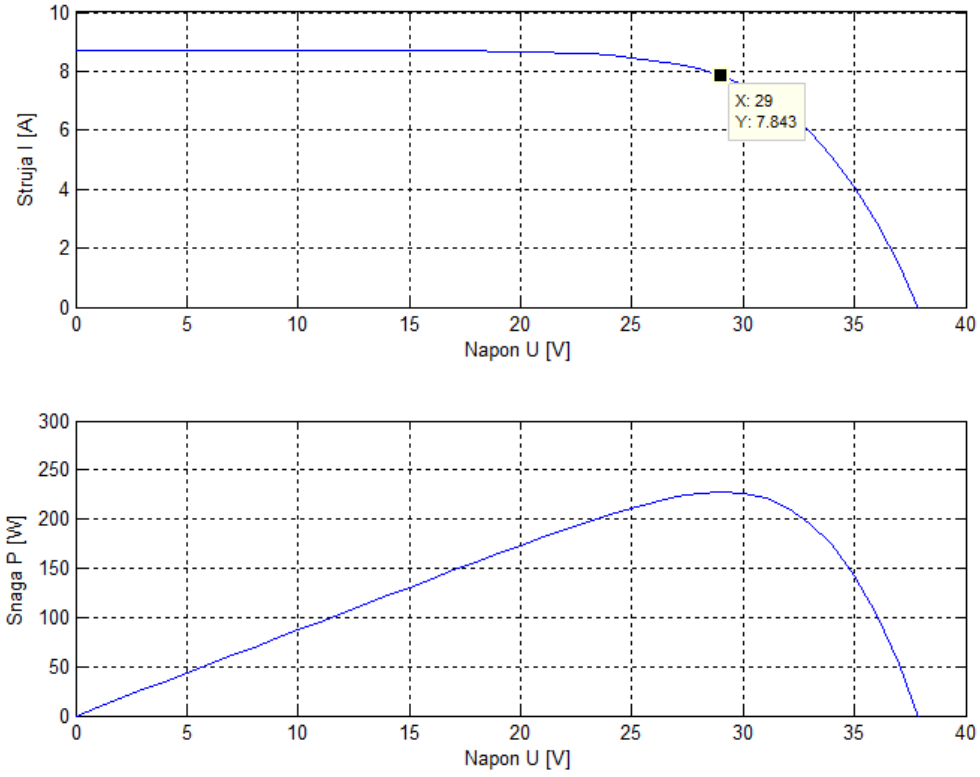
```
Ir_T2 = Isc_T2 / (exp(Voc_T2/(A*Vt_T1))-1);
b = Vg * q/(A*k);
Ir = Ir_T1 * (TaK/T1).^(3/A) .* exp(-b.*(1./TaK - 1/T1));
X2v = Ir_T1/(A*Vt_T1) * exp(Voc_T1/(A*Vt_T1));
dVdI_Voc = - 1.15/Ns / 2;

Rs = - dVdI_Voc - 1/X2v; % serijski otpor po ćeliji
% Ia = 0:0.01:Iph;
Vt_Ta = A * 1.38e-23 * TaK / 1.60e-19; % = A * kT/q
% Ia1 = Iph - Ir.*( exp((Vc+Ia.*Rs)./Vt_Ta) -1);
% solve for Ia: f(Ia) = Iph - Ia - Ir.*( exp((Vc+Ia.*Rs)./Vt_Ta)
-1) = 0;
% Newtonova metoda: Ia2 = Ia1 ? f(Ia1)/f'(Ia1)Vc = Va/Ns;
Vc = Va/Ns;
Ia = zeros(size(Vc));
% Iav = Ia;
for j=1:5;
Ia = Ia -(Iph - Ia - Ir.*( exp((Vc+Ia.*Rs)./Vt_Ta) -1))./ (-1 -
(Ir.*( exp((Vc+Ia.*Rs)./Vt_Ta) -1)).*Rs./Vt_Ta);
% Iav = [Iav;Ia];
end
Suns=1;
TaC=25;
Va=0:1:39;
P=Va.*Ia;
subplot(2,1,1)
plot(Va,Ia)
xlabel('Napon U [V]')
ylabel('Struja I [A]')
ylim([0 10])
grid
subplot(2,1,2)
plot (Va,P)
xlabel('Napon U [V]')
ylabel('Snaga P [W]')
ylim([0 300])
grid
```

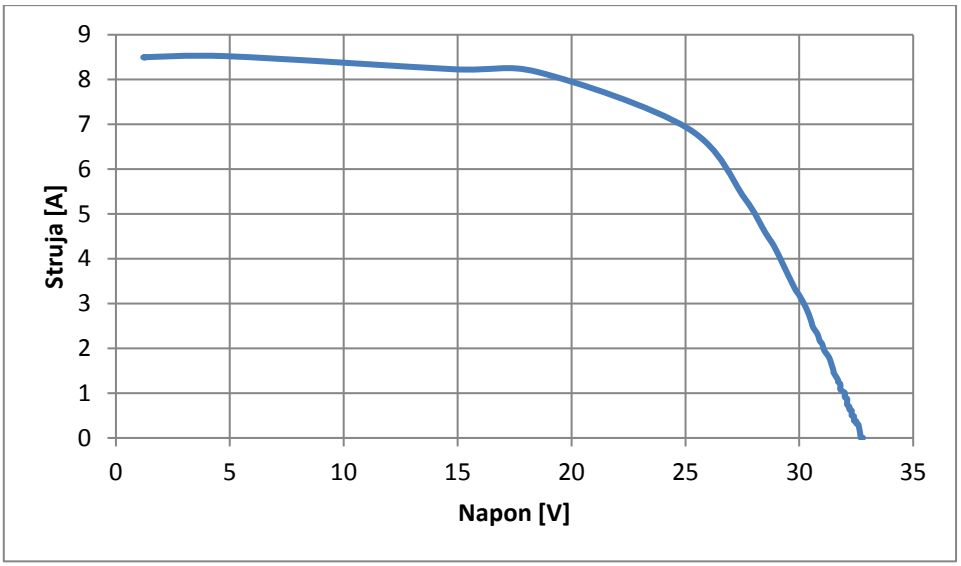
3.4.1 Simulacija i mjerenja za modul BISOL BMO-250

Tablica 4.1: *Potrebni podaci za modul BISOL BMO-250.*

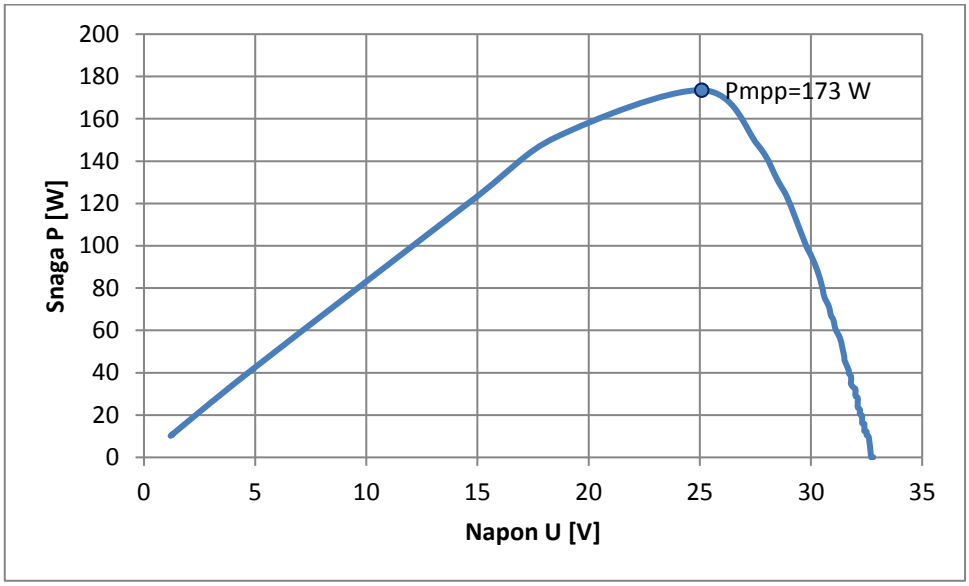
Standardni testni uvijeti:		NOCT	
AM 1.5, 1000W/m², 25°C		**AM 1.5, 800W/m², temperatura ćelije 44°C**	
Modul BISOL BMO-250			
Vršna snaga P_{mpp}	250 W	Vršna snaga P_{mpp}	185 W
Struja kratkog spoja I_{sc}	8.80 A	Struja kratkog spoja I_{sc}	7.12 A
Napon otvorenog kruga V_{oc}	37.9 V	Napon otvorenog kruga V_{oc}	34.6 V
Korisnost	15.3 %		



Slika 4.5: *I-U i P-U karakteristika za modul BISOL BMO-250 dobivena simulacijom.*



Slika 4.6: *I-U karakteristika za modul BISOL BMO – 250 dobivena mjerenjem.*



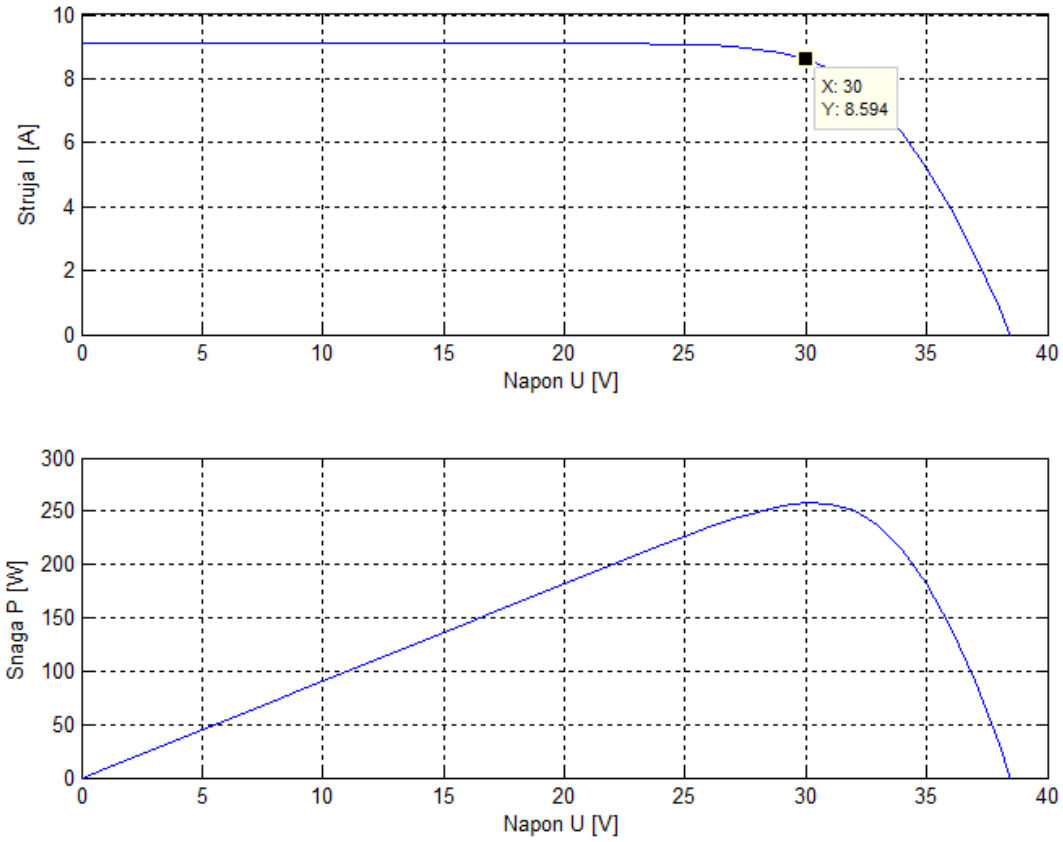
Slika 4.7: *P-U karakteristika za modul BISOL BMO-250 dobivena mjerenjem.*

Za prethodni modul intenzitet sunčeva zračenja za mjerenja u laboratoriju bio je 990 W/m^2 taj isti uzet je i pri simulaciji u matlabu. Prema simulaciji u matlabu i mjerenjima u laboratoriju vidimo kako pri stvarnom mjerenju dolazi do odstupanja od simulacije. Točka maksimalne snage pri simulaciji iznosi 227 W a maksimalna snaga pri mjerenjima u laboratoriju iznosi 173 W. Dolazi i do smanjenja napona na ćeliji iz zrazloga što je temperatura ćelije veća neko pri testnim uvijetima.

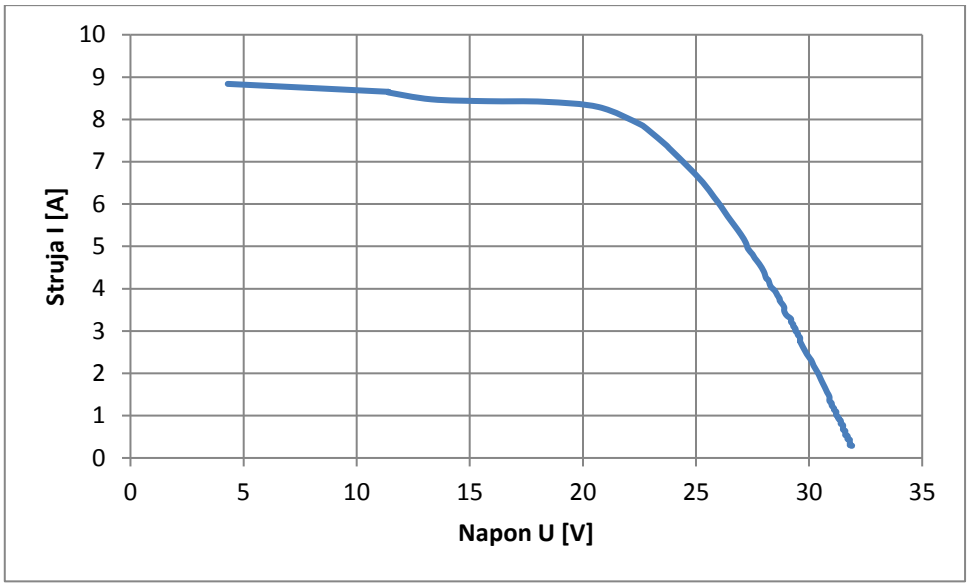
3.4.2 Simulacija i mjerenja za modul BISOL BMU-250

Tablica 4.2: *Potrebni podaci za modul BISOL BMU-250.*

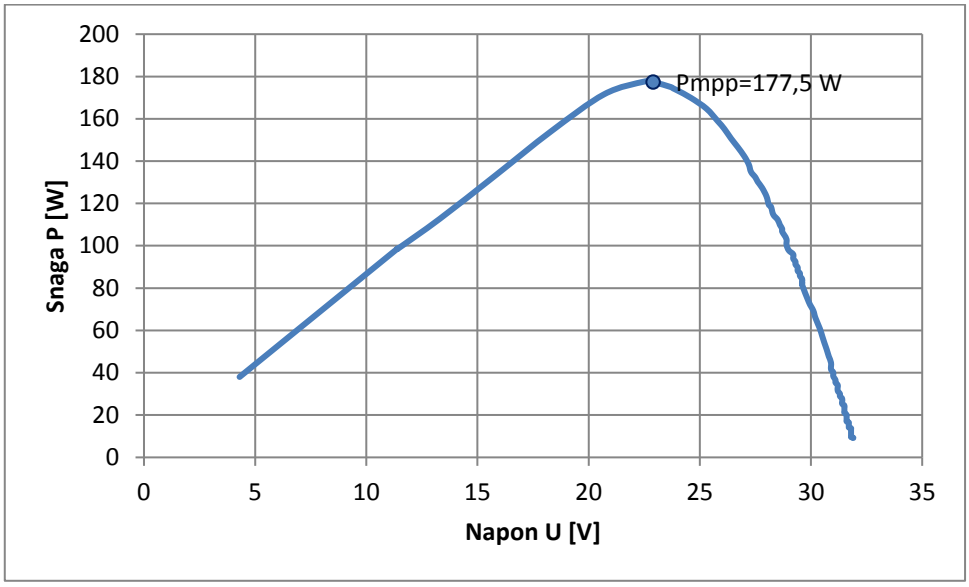
Standardni testni uvijeti:		NOCT	
AM 1.5, 1000W/m², 25°C		**AM 1.5, 800W/m², temperatura ćelije 44°C**	
Modul BISOL BMU-250			
Vršna snaga P_{mpp}	250 W	Vršna snaga P_{mpp}	185 W
Struja kratkog spoja I_{sc}	8.75 A	Struja kratkog spoja I_{sc}	7.08 A
Napon otvorenog kruga V_{oc}	38.4 V	Napon otvorenog kruga V_{oc}	35.1 V
Korisnost	15.3 %		



Slika 4.8: *I-U i P-U karakteristika za modul BISOL BMU-250 dobivena simulacijom.*



Slika 4.9: *I-U karakteristika za modul BISOL BMU – 250 dobivena mjerenjem.*



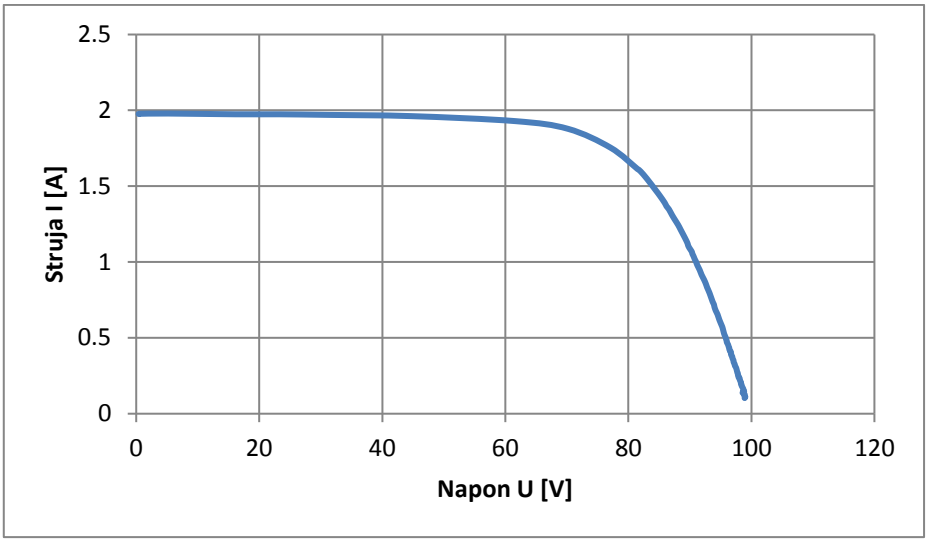
Slika 4.10: *P-U karakteristika za modul BISOL BMO-250 dobivena mjerenjem.*

Za modul BISOL BMU-250 prema mjerenjima u Laboratoriju za obnovljive izvore energije intenzitet sunčeva zračenja bio je 1040 W/m^2 pa se iz simulacije u Matlab-u vidi da je snaga modula u idealnim uvijetima čak i već od propisane umnoškom maksimalne struje i napona dobijemo točku maksimalne snage za slučaj simulacije koja iznosi 257 W, ali prema stvarnim mjerenjima u laboratoriju vidimo da je to nemoguće postići jer točka maksimalne snage prema mjerenjima iznosi 177.5 W. A možemo zaključiti da je porasla i temperatura ćelije zbog koje je napon pao na oko 32 V.

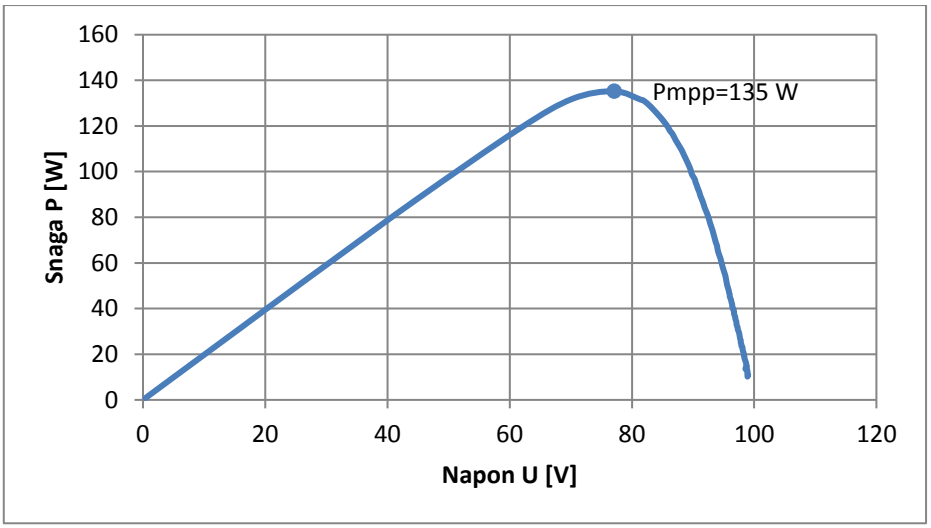
3.4.3 Mjerenja za modul MASDAR MPV100-S

Tablica 4.3: *Potrebni podaci za modul MASDAR MPV100-S.*

Intenzitet zračenja	Snaga	Napon U_{oc}	Struja I_{sc}	Napon U_{mpp}	Struja I_{mpp}
1030 W/m^2	100 W	96	1.58	75	1.34



Slika 4.11: *I-U karakteristika za modul MASDAR MPV100-S dobivena mjerenjem.*



Slika 4.12: *P-U karakteristika za modul MASDAR MPV100-S dobivena mjerenjem.*

Prema rezultatima mjerenja za intenzitet sunčeva zračenja od 1030 W/m^2 vidimo da maksimalna snaga koju modul daje iznosi 135 W, a prema tehničkim podatcima snaga modula iznosi 100 W.

4 ZAKLJUČAK

U radu opisano je općenito o fotonaponskim modulima i sustavima, njihovim tehnologijama izrade. Pa možemo zaključiti da prema tehnologiji izrade pojedinih modula ovisi učinkovitost modula. Također dolazi do sve veće instalacije fotonaponskih sustava zbog raznih poticaja.

Za proizvodnju električne energije iz fotonaponskih modula i sustava, bitan parametar nam je intenzitet sunčeva zračenja i gibanje sunca tijekom dana kao i njegova udaljenost od zemlje tijekom zime i ljeta. Stoga smo matematičkim izrazima opisali Sunce da bismo saznali podatke bitne za projektiranje i postavljanje fotonaponskih modula. Iz dobivenih podataka zaključujem da je za područje grada Osijeka te istočni dio Hrvatske fotonaponske module bolje postaviti sa što manjim kutem koji iznosi od oko 10-13° ili zato što se Sunce nalazi skoro točno iznad nas za ovo doba godine.

Iznos napona jedne fotonaponske ćelije je oko 0.5 V, taj napon je premali stoga se fotonaponske ćelije spajaju serijski kako bi postigli veći napon, obično ih se spaja 36 u seriju. Tako napravljeni su i moduli odabrani za simulaciju u Matlabu i na kojima su napravljena stvarna mjerenja. Prema razvijenom kodu u Matlabu dobivamo za dva različita fotonaponska modula I – U i P – U karakteristiku, a takvu karakteristiku dobivamo i putem izvršenih mjerenja. Iz toga vidim kako karakteristike dobivene putem mjerenja u laboratoriju daju manje iznose napona i struje odnosno maksimalne snage u odnosu na simulaciju. Pa možemo zaključiti da na to imaju utjecaj čimbenici iz okoline koji su temperatura okoline koja zagrijava fotonaponsku ćeliju, zaprljanost fotonaponski modula, nesavršenost mjernih instrumenata.

Sveukupno možemo zaključiti kako je uvijek bitno napraviti simulaciju ukoliko smo u mogućosti. Simulacijom dolazimo do spoznaje različitih stanja i uvijeta koje inače ne možemo saznati na drugačiji način, te također uvid u isplativost projekta i moguće greške koje bi mogli napraviti pri samoj izvedbi projekta bez simulacije.

LITERATURA

[1] A. Han, Efficiency Of Solar PV, Then, Now And Future

- https://sites.lafayette.edu/egrs352-sp14-pv/technology/history-of-pv-technology/

[2] V. Aggarwal, What are the most efficient solar panels on the market

- http://news.energysage.com/what-are-the-most-efficient-solar-panels-on-the-market/

[3] Solvis, podaci za fotonaponski modul SV60-260

- http://www.solvis.hr/wp-content/uploads/2016/06/LQSOLVIS-DS-HR-SV60_3BB-20160503.pdf

[4] Snapshot of Global Photovoltaic Markets 2017, International Energy Agency. 19 April 2017. Retrieved 11 July 2017.
Snapshot of Global Photovoltaic Markets , International Energy Agency. 22 April 2016. Retrieved 24 May 2016.

[5] Renewables 2016, Global status report
- http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_Full_Report.pdf

[6] E. Wesoff , Global Installed PV Capacity Leaps to 303 Gigawatts.
- https://www.greentechmedia.com/articles/read/iea-global-installed-pv-capacity-leaps-to-303-gw

[7] Podaci s Wikipedije, 2014.

- https://hr.wikipedia.org/wiki/Zemljina_putanja

[8] Z. Knez, Jesenska gužva oko marsa, 2014.

[9] http://wiki.naturalfrequency.com/wiki/Solar_position

[10] G. Tomac, D. Špoljarić, Katedra za satelitsku geodeziju, Pravo i srednje sunčevo vrijeme, jednadžba vremena, 2015.

[11] Slika preuzeta s web stranice: Green Rhino Energy

- www.greenrhinoenergy.com/solar/radiation/spectra.php

[12] Slika preuzeta s web stranice: Wikipedija

- https://sh.wikipedia.org/wiki/Sun%C4%8Deva_svjetlost

[13] Slika preuzeta iz članka: R. Crossley, 5 Factors that Affect Solar Panel Efficiency

- https://www.revolvesolar.com/5-factors-that-affect-solar-panel-efficiency/

[14] Tamer Khatib, Wilfried Elmenreich, Modeling of photovoltaic systems using MATLAB®, 2016.

SAŽETAK

Naslov: Modeliranje fotonaponskih modula

Ključne riječi: fotonaponski modul, Sunce, pozicija Sunca, fotonaponska ćelija, intenzitet sunčeva zračenja, mjerenje, laboratorij, simulacija.

U ovom radu opisano je općenito o fotonaponskim modulima, od čega su napravljeni, te učinkovitost pojedinog modula koja ovisi o njegovoj izvedbi. U sljedećim poglavljima opisano gibanje Sunca tijekom dana čije je poznavanje potrebno kako bi modelirali i simulirali intenzitet njegova zračenja prema promatranoj površini. Sunčevo zračenje na površinu promatranog objekta u našem slučaju fotonaponskog modula dolazi u raspršenom, direktnom i difuznom obliku. Nakon modeliranja pozicije i gibanja sunca dolazimo do modeliranja fotonaponske ćelije i samog fotonaponskog modula. Prema simulacijama u programskom paketu Matlab za dva različita modula napravljena su mjerenja u Laboratoriju za obnovljive izvore energije fakulteta te su rezultati simulacija i mjerenja uspoređeni.

SUMMARY

Title: Modeling of photovoltaic modules

Keywords: Photovoltaic modules, Sun, position of Sun, photovoltaic cell, intensity of the sun's radiation, measuring, laboratory, simulation.

This paper describes in general about the photovoltaic modules, of which they are made, and the efficiency of a particular module that depends on its performance. The following chapters describe the motion of the sun during the day of its knowledge necessary to model and simulate the intensity of its radiation towards the observed surface. Solar radiation on the surface of the observed object in our case of the photovoltaic module comes in scattered, direct and diffuse form. After modeling the position and the motion of the sun, we come to modeling the photovoltaic cell and the photovoltaic module itself. According to the simulations in the Matlab program package for two different modules, measurements were made in the Faculty of Laboratory of Renewable Energy Sources and the results of simulations and measurements were compared.

ŽIVOTOPIS

Ivan Čurčić rođen 25.05.1992. godine u Slavonskom Brodu, Hrvatska. Osnovnu školu Antun Mihanović pohađa i završava u Novoj Kapeli s vrlo dobrim uspjehom. Godine 2007 upisuje srednju Tehničku školu u Slavonskom Brodu. Tijekom srednje škole odrađuje stručnu praksu u elektroinstalacijskoj tvrtki Saturn, Nova Kapela. Godine 2011 završava srednju Tehničku školu za smjer Elektrotehničar, te iste godine upisuje Elektrotehnički fakultet u Osijeku, Preddiplomski stručni studij Elektrotehnike, smjer Elektroenergetika. Stručni studij završava 2014. godine te odmah po završetku upisuje Razlikovne obveze na istom fakultetu za upis na Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnike, smjer Elektroenergetika. Nakon uspješno završene Razlikovne obveze, 2015 godine upisuje Diplomski studij, smjer Održiva elektroenergetika te ga završava 2017. godine.

_____

Potpis studenta

PRILOZI

Na CD-u se nalaze:

- svi kodovi koji su korišteni za simulaciju u diplomskom radu, kodovi su u obliku m.file.
- excel datoteka s mjerenjima izvršenim u Laboratoriju za obnovljive izvore energije.