

UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Iva M. Babić

**MODELOVANJE UTICAJA VREMENSKOG
PROFILA SOLARNOG ZRAČENJA NA
EFEKTE RADA FOTONAPONSKIH SISTEMA
U ELEKTROENERGETSKOM SISTEMU**

doktorska disertacija

Beograd, 2016

UNIVERSITY OF BELGRADE
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Iva M. Babić

**MODELING THE INFLUENCE OF THE
SOLAR RADIATION TIME PROFILE ON THE
PHOTOVOLTAIC SYSTEMS OPERATION
EFFECTS IN A POWER SYSTEM**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2016

Podaci o mentoru i članovima komisije

Mentor:

Dr Željko Đurišić, docent, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet

Članovi komisije:

Dr Željko Đurišić, docent, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet

Dr Nikola Rajaković, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet

Dr Vladica Mijailović, redovni profesor, Univerzitet u Kragujevcu – Fakultet tehničkih nauka u Čačku

Dr Ivan Škokljev, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet

Dr Jovan Mikulović, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet

Datum usmene odbrane:

Najlepše se zahvaljujem svom mentoru, doc. dr Željku Đurišiću na predlogu teme i na nesebičnoj podršci prilikom izrade doktorske disertacije.

Posebno se zahvaljujem prof. dr Nikoli Rajakoviću na svesrdnoj pomoći i korisnim savetima.

Zahvaljujem se profesorima i asistentima sa Katedre za elektroenergetske sisteme na saradnji.

Beskrajnu zahvalnost dugujem svojim roditeljima na podršci, razumevanju i ljubavi.

Neizmernu zahvalnost dugujem svom suprugu.

MODELOVANJE UTICAJA VREMENSKOG PROFILA SOLARNOG ZRAČENJA NA EFEKTE RADA FOTONAPONSKIH SISTEMA U ELEKTROENERGETSKOM SISTEMU

Rezime

Predmet istraživanja ove doktorske disertacije je modelovanje i analiza uticaja fotonaponskih sistema na elektroenergetski sistem. Naučni doprinosi doktorske disertacije su:

- Razvijena je unapređena metodologija za valorizaciju električne energije proizvedene u fotonaponskim elektranama u uslovima slobodnog tržišta i na taj način je omogućena bolja procena ekonomičnosti rada fotonaponskih elektrana u uslovima slobodnog tržišta električne energije. Matematički model za procenu kvantifikatora za valorizaciju električne energije proizvedene u fotonaponskim panelima u uslovima slobodnog tržišta je dat kroz korelacionu analizu tipičnih dijagrama proizvodnje fotonaponskih sistema i dijagrama cene električne energije na tržištu električne energije.
- Razvijen je i unapređen stohastički model ekvivalenta mreže i na taj način je omogućeno sagledavanje uticaja disperzovanih fotonaponskih sistema na gubitke aktivne snage u distributivnoj mreži. Ova metodologija omogućava procenu efekata rada krovno integrisanih fotonaponskih sistema na smanjenje gubitaka aktivne snage u distributivnoj mreži.
- Razvijena je inovirana metodologija za optimizaciju prostorne orijentacije fotonaponskih panela u pogledu profita koji vlasnik fotonaponske elektrane stiče na slobodnom tržištu električne energije.

Ključne reči: Solarna energija, Fotonaponske elektrane, Dijagram proizvodnje, Tržište električne energije, Gubici električne energije

Naučna oblast: Tehničke nauke - Elektrotehnika

Uža naučna oblast: Elektroenergetski sistemi

UDK: 621.3

MODELING THE INFLUENCE OF THE SOLAR RADIATION TIME PROFILE ON THE PHOTOVOLTAIC SYSTEMS OPERATION EFFECTS IN A POWER SYSTEM

Abstract

The subject of investigation of this doctor dissertation is modeling and analysis of the influence of photovoltaic systems upon a power system. The scientific contributions of the doctoral dissertation are:

- An advanced methodology of the electrical energy valorization produced by photovoltaic plants under free market conditions has been developed thus obtaining a better estimate of the economy of operation of photovoltaic plants under free market conditions was enabled. Mathematical model for estimating the quantifiers of valorization of electrical energy produced by photovoltaic panels under free market conditions is presented through a correlation analysis of typical diagrams of photovoltaic plants production and diagrams of electrical energy prices at the electrical energy market.
- An advanced stochastic model of the network equivalent has been developed thereby it became possible to perceive the influence of dispersed photovoltaic systems upon active power losses in a distribution network. This methodology permits estimation of the effects of operation of the building integrated photovoltaic systems on reduction of active power losses in a distribution network.
- An innovative methodology for optimization of spatial orientation of photovoltaic panels with respect to the profit gained by the owner of a photovoltaic plant at the free market of electrical energy has been developed.

Keywords: Solar energy, Photovoltaic Power Plants, Production Time Diagram, Electrical Energy Market, Distribution Power Losses

Scientific field: Technical science – Electrical engineering

Specific scientific field: Power Systems

UDK: 621.3

„Ako koristimo fosilno gorivo za dobijanje energije, to znači da živimo na račun kapitala koji se jako brzo troši. Ovaj varvarski i rasipnički metod potrebno je što pre zaustaviti u interesu budućih generacija. Energija Sunčevih zraka predstavlja ogromnu količinu energije, daleko veću i od energije vode.”

Nikola Tesla, 9. septembar 1915.

SADRŽAJ:

1. UVOD	10
1.1. PREGLED TRENUTNOG STANJA U OBLASTI SOLARNE ENERGETIKE U EVROPI I SVETU I PERSPEKTIVE NJENOG RAZVOJA	15
2. TEORIJSKA ANALIZA ENERGIJE SUNCA I FOTONAPONSKE KONVERZIJE	21
2.1. FOTONAPONSKA KONVERZIJA ENERGIJE SUNCA	29
2.2. OSNOVNI TIPOVI FOTONAPONSKIH ČELIJA	33
2.3. EKVIVALENTNA ZAMENSKA ŠEMA FOTONAPONSKIH ČELIJA	34
2.4. FOTONAPONSKI MODULI I PANELI	40
3. OSNOVNI ELEMENTI PRORAČUNA ENERGETSKOG POTENCIJALA SUNČEVOG ZRAČENJA NA POVRŠINI FOTONAPONSKOG PANELA	42
3.1. TEORIJSKI ELEMENTI PRORAČUNA PUTANJE SUNCA U ODNOSU NA CILJNI OBJEKAT	42
3.2. MODEL ZA PRORAČUN UKUPNE IRADIJACIJE FOTONAPONSKOG PANELA PRI VEDROM DANU NA OSNOVU EKSTRATERESTRIČKE IRADIJACIJE (<i>CLEAR DAY MODEL</i>)	47
3.3. MODEL ZA PRORAČUN UKUPNE IRADIJACIJE FOTONAPONSKOG PANELA NA OSNOVU MERENJA HORIZONTALNE IRADIJACIJE NA MIKROLOKACIJI U REALNIM VREMENSKIM USLOVIMA	53
4. UTICAJ VREMENSKOG PROFILA PROIZVODNJE FOTONAPONSKIH PANELA NA EKONOMIČNOST FOTONAPONSKIH PANELA	57
4.1. MODEL ZA VALORIZACIJU ELEKTRIČNE ENERGIJE PROIZVEDENE U FOTONAPONSKIM ELEKTRANAMA U USLOVIMA SLOBODNOG TRŽIŠTA	61
4.2. PROCENA VREMENSKOG DIJAGRAMA PROIZVODNJE FOTONAPONSKE ELEKTRANE	63
4.3. VREMENSKI DIJAGRAMI CENA ELEKTRIČNE ENERGIJE NA TRŽIŠTU ELEKTRIČNE ENERGIJE	64
4.4. PRIMER PRORAČUNA INDEKSA KORELISANOSTI FOTONAPONSKE ELEKTRANE	66
5. OPTIMIZACIJA AZIMUTNOG I NAGIBNOG UGLA FOTONAPONSKIH PANELA UZ UVAŽAVANJE TRŽIŠNIH EFEKATA	70
5.1. PRIMER PRORAČUNA OPTIMALNOG AZIMUTNOG I NAGIBNOG UGLA FOTONAPONSKIH PANELA UZ UVAŽAVANJE TRŽIŠNIH EFEKATA	71
.....	79
6. PROCENA EFEKATA DISPERZOVANIH FOTONAPONSKIH SISTEMA NA GUBITKE U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI	80
6.1. STOHAŠTIČKI MODEL EKVIVALENTA DISTRIBUTIVNE MREŽE	84
6.1.1. <i>Metodologija za proračun reprezentativnih dijagrama potrošnje</i>	86
6.1.2. <i>Metodologija za određivanje statističkog parametra distributivne mreže</i>	87
6.1.3. <i>Uticaj disperzovanih fotonaponskih sistema na gubitke aktivne snage u distributivnoj mreži</i>	88
6.2. PRIMENA FUZZY LOGIKE	90
6.3. PRIMENA MONTE CARLO SIMULACIJE	93
6.4. TESTIRANJE MODELA	96
6.5. ANALIZA GUBITAKA U REALNOJ DISTRIBUTIVNOJ MREŽI	108
7. UTICAJ TEMPERATURE VAZDUHA I BRZINE VETRA NA EFIKASNOST FOTONAPONSKE ELEKTRANE	116
7.1. DAVID FAIMAN-OV MODEL TEMPERATURE FOTONAPONSKOG MODULA	119
7.2. <i>NOCT</i> MODEL TEMPERATURE FOTONAPONSKOG MODULA	120
7.3. MODEL NACIONALNE LABORATORIJE SANDIA ZA PREDVIĐANJE TEMPERATURE FOTONAPONSKOG MODULA	121
7.4. EKSPERIMENTALNA ANALIZA PROCENE TEMPERATURE FOTONAPONSKOG PANELA U REALNIM USLOVIMA EKSPLOATACIJE	122
7.5. EKSPERIMENTALNA ANALIZA PROCENE EFIKASNOSTI FOTONAPONSKOG PANELA U REALNIM USLOVIMA EKSPLOATACIJE	133
8. ZAKLJUČAK	140

9. LITERATURA.....	144
10. BIOGRAFIJA	157
IZJAVA O AUTORSTVU	159
IZJAVA O ISTOVETNOSTI ŠTAMPANE I ELEKTRONSKE VERZIJE DOKTORSKOG RADA	160
IZJAVA O KORIŠĆENJU	161

1. UVOD

Da bi neki izvor energije ispunjavao zahteve modernog elektroenergetskog sistema, mora da bude u skladu sa standardima savremenog društva, da ima odgovornost prema društvu i čoveku, ali i prema tehnološkom napretku civilizacije i podsticanju njenog daljeg razvoja. Kriterijumi po kojima se vrednuje savremenost nekog izvora energije su: obnovljivost primarnog energenta, potencijal njegovog korišćenja, ekološka prihvatljivost, dostupnost, pouzdanost, rasprostranjenost, vrsta tehnologije, estetika, modularnost, stabilnost, zahtevnost održavanja, način rada i konkurentnost u ceni [1]. Solarna energija i fotonaponske elektrane, se prema navedenim kriterijumima, mogu definisati kao najsavremeniji elektroenergetski izvori.

Danas se život zasniva na širokoj primeni svih oblika energije i ne može se zamisliti niti jedna delatnost koja ne koristi neku vrstu energije. Porast broja stanovnika na Zemlji, porast životnog standarda, kao i sve veća mobilnost ljudske populacije uzrokuju povećanu potrebu za električnom energijom, kao i povećanu potrošnju energije uopšte. Energija se danas najvećim delom proizvodi iz neobnovljivih izvora energije, kao što su nafta, uglj i prirodni gas, čije su zalihe ograničene, brzo se troše i koncentrisane su u svega nekoliko oblasti u svetu. Nafta, uglj i prirodni gas obezbeđuju do 86.5% primarne energije koja se danas koristi na Zemlji [2]. Pored velike ekonomske zavisnosti od fosilnih izvora energije, u svetu je stalno prisutan problem zaštite životne sredine od zagađenja. Sagorevanje fosilnih goriva, naročito onih baziranih na nafti i na uglju, predstavlja uzrok globalnog zagrevanja i dovodi do stvaranja efekata „*staklene bašte*” usled emisije ugljen-dioksida (CO₂), ugljen-monoksida (CO), metana (CH₄), vodene pare, kao i sumpornih i azotnih jedinjenja. Efekat „*staklene bašte*” predstavlja zagrevanje planete Zemlje, koje je nastalo poremećajem energetske ravnoteže između količine zračenja koje Zemljina površina prima od Sunca i koje zrači u svemir, odnosno to je rezultat povećanja količine zračenja koje Zemljina površina ne može da emituje u svemir već ga gasovi „*staklene bašte*” upiju i time dolazi do porasta temperature Zemljine atmosfere. Među najveće zagađivače životne sredine spadaju elektrane za proizvodnju električne energije, pa tako na primer elektrana *Niderausem* u Nemačkoj koja radi na uglj, važi za trećeg zagađivača u Evropi, po količini ugljen-dioksida (CO₂) proizvedenog po jednom kilovat-času (kWh) [2].

Promena klimatskih uslova predstavlja jednu od najvećih opasnosti za ekološki sistem planete Zemlje i zajedno sa problemima iscrpljenosti energetskih zaliha, dovode do rasta cena nafte, gasa i drugih energenata, kao i do globalne zabrinutosti za opstanak čovečanstva u postojećim uslovima proizvodnje i potrošnje energije. U tom kontekstu se u svetu danas govori o održivom razvoju u energetici.

Jedan od načina da se zadovolje ekološki i ekonomski opravdane potrebe za energijom je uključivanje obnovljivih izvora energije (OIE) u globalnu strategiju razvoja energetike. Njihovim korišćenjem bi se zadovoljile potrebe potrošača i omogućilo bi se nesmetano snabdevanje energijom, čime bi se sprečili rizici od energetskih kriza [1]. OIE predstavljaju energetske resurse koji se koriste za proizvodnju električne ili toplotne energije, čije se rezerve nalaze u prirodi i obnavljaju se u celosti ili delimično. Sam naziv obnovljivi je proistekao iz činjenice da se energija troši u iznosu koji ne premašuje brzinu kojom se primarni energent stvara u prirodi. U OIE spadaju: energija malih vodotokova, energija vetra i energija Sunca, biomase, geotermalna energija, biogoriva, deponijski gas, gas iz postrojenja za tretman kanalizacionih voda i otpadnih voda iz prehrambene i drvnoprerađivačke industrije koji ne sadrže opasne materije [3]. Proizvodne jedinice koje koriste OIE su relativno malih snaga pa se obično vezuju na niskonaponsku i srednjenaponsku distributivnu mrežu.

Korišćenje OIE je veoma visoko na listi prioriteta Evropske Unije, čime zauzima značajno mesto u Evropskoj strategiji o energetici i klimatskim promenama [11]. Evropski parlament je 2008. godine usvojio paket propisa o klimatskim promenama koji imaju za cilj smanjenje emisije gasova sa efektom „*staklene bašte*” od 20%, unapređenje energetske efikasnosti od 20% i učešće OIE od 20% u ukupnoj potrošnji energije u zemljama Evropske Unije do 2020. godine [5]. Ratifikacijom Ugovora o osnivanju Energetske zajednice, Republika Srbija je prihvatila obavezu da donese i realizuje plan primene direktive o promovisanju proizvodnje električne energije iz OIE [5] i direktive o promovisanju korišćenja biogoriva u sektoru saobraćaja [6]. Nezavisno od međunarodnih obaveza Republike Srbije, potreba za povećanim korišćenjem OIE je u saglasnosti sa praksom razvijenih zemalja i njihovom težnjom ka održivom razvoju i smanjenju emisije štetnih gasova i čestica. Cilj Srbije je da do 2020. godine obezbedi 27% energije iz OIE [7, 8].

Tehnički iskoristiv energetska potencijal OIE u Republici Srbiji je veoma značajan i procenjen je na preko 4.3 miliona tona ekvivalentne nafte (toe) godišnje, od čega se oko 0.6 miliona toe nalazi u iskorišćenju Sunčevog zračenja [9].

Sunce kao daleko najveći obnovljivi i za čoveka neograničen izvor energije, predstavlja potencijal kakav nema ni jedan drugi izvor energije. Pre gotovo sto godina, *Tomas Edison* je rekao, u razgovoru sa *Henrijem Fordom* i *Harvijem Fajerstonom*.,,Uložio bih novac u Sunce i solarnu energiju. Kakav je to izvor energije! Nadam se da nećemo morati da čekamo da se potpuno potroše nafta i uglj da bismo se upustili u taj posao," [2].

Predmet istraživanja ove doktorske disertacije je modelovanje i analiza uticaja fotonaponskih sistema na elektroenergetski sistem. Kao što je i prikazano u literaturi [74, 75, 115, 119], primetan je porast instalisanog kapaciteta fotonaponskih elektrana priključenih na elektroenergetski sistem širom sveta. Tako je krajem 2014. godine instalisani kapacitet fotonaponskih elektrana u celom svetu porastao za 28% i dosegao je snagu od 178 GW, što je dovoljno da se podmiri 1% ukupne svetske potrošnje električne energije [121]. Dakle, fotonaponski sistemi postaju jedan od značajnih izvora električne energije u globalnom elektroenergetskom sistemu, pa je tako od velikog praktičnog značaja analizirati efekte njihovog rada na performanse elektroenergetskog sistema, kako bi se na što efikasniji način integrisali u njega.

Fotonaponske elektrane su specifičan izvor električne energije, tako da su i efekti njihovog rada na sam sistem jako specifični. U ovoj doktorskoj disertaciji je urađena detaljna analiza uticaja vremenskog profila solarnog zračenja na efekte rada fotonaponskih sistema u elektroenergetskom sistemu. Vremenski profil solarnog zračenja definiše vremenski dijagram snage koju proizvodi fotonaponska elektrana. Procena vremenskog dijagrama snage fotonaponskog panela je vršena na osnovu poznatog dijagrama solarne iradijacije, ambijentalne temperature i prostorne orijentacije panela. Vremenski profil solarnog zračenja je bitan za sagledavanje uslova plasmana električne energije iz fotonaponskih elektrana na slobodnom tržištu električne energije. Proizvodnja električne energije iz konvencionalnih elektrana je uglavnom planska i može se prilagođavati zahtevima tržišta, pa se na taj način ostvaruje najbolja cena za proizvedeni kWh.

Proizvodnja električne energije u fotonaponskim elektranama je u velikoj meri predvidiva, ali se ne može planirati jer nju direktno diktira vremenski dijagram insolacije. U cilju sagledavanja ekonomičnosti fotonaponske elektrane, pored procene prosečne godišnje proizvodnje, potrebno je izvršiti ekonomsku valorizaciju proizvedene energije. Ključni pokazatelj u pogledu valorizacije električne energije proizvedene u fotonaponskim elektranama je korelisanost vremenskih profila cene električne energije na tržištu električne energije i vremenskog profila proizvodnje fotonaponske elektrane. U doktorskoj disertaciji je izvršena korelaciona analiza između tipičnih dnevnih i sezonskih profila snage proizvodnje fotonaponske elektrane i profila cene na tržištu električne energije i definisani odgovarajući kvantifikatori. Ključni rezultati i verifikacija rezultata ove analize predstavljeni su u literaturi [54-56]. Pored pomenutog, analiziran je i efekat prostorne orijentacije fotonaponskih panela u pogledu profita koji vlasnik fotonaponske elektrane stiče na slobodnom tržištu električne energije. Izvršena je optimizacija nagibnog i azimutnog ugla fotonaponskog panela uz uvažavanje tržišnih efekata.

Pored tržišnih efekata, analiza vremenskog profila solarnog zračenja je značajna i za sagledavanje uticaja fotonaponskih elektrana na gubitke aktivne snage u elektroenergetskoj mreži. Kako su gubici energije u elektroenergetskim mrežama nelinearna funkcija tokova snaga, za čiji proračun treba poznavati profile potrošnje i proizvodnje i parametre mreže, egzaktan proračun uticaja fotonaponskih elektrana na gubitke električne energije je teško izvodljiv. Fotonaponski sistemi su po pravilu male disperzovane jedinice, koje se dominantno izgrađuju na krovovima stambenih i drugih objekata. Distributivna mreža je razučena sa promenljivim tokovima snaga i naponskim prilikama. U doktorskoj disertaciji je razvijen i unapređen stohastički model ekvivalenta mreže za procenu uticaja disperzovanih fotonaponskih sistema na gubitke aktivne snage u distributivnom sistemu. Praktični značaj ovog istraživanja je kvantitativno sagledavanje u kojoj meri fotonaponski sistemi mogu smanjiti gubitke aktivne snage u distributivnom sistemu, koji predstavljaju veliki problem kako u našem, tako i u distributivnim sistemima širom sveta. Ključni rezultati ove analize nalaze se u radovima [100, 104]. U cilju verifikacije matematičkog modela, u disertaciji je izvršena analiza uticaja fotonaponskih sistema na gubitke aktivne snage na primeru srednjenaponske i niskonaponske distributivne mreže realne konfiguracije, koja uključuje vodove realnih preseka i dužina, i realne merne podatke o solarnoj iradijaciji.

Na osnovu dostupne literature, u doktorskoj disertaciji je prikazan najčešće korišćeni matematički model za procenu dijagrama proizvodnje fotonaponskih panela za proizvoljno orijentisanu površ krova na koju su instalirani. Model obuhvata proračun incidentnog ugla direktnog zračenja, kao i procenu difuzione i reflektovane komponente solarnog zračenja na proizvoljno orijentisanu površ fotonaponskog panela. U doktorskoj disertaciji je analiziran i uticaj temperature vazduha i brzine vetra na efikasnost fotonaponske elektrane. Izvršena je eksperimentalna analiza procene temperature fotonaponskog panela u realnim uslovima eksploatacije, kao i eksperimentalna analiza efikasnosti fotonaponskog panela u realnim uslovima eksploatacije. Eksperimentalne analize su upoređene sa analizama koje se dobijaju na osnovu različitih matematičkih modela koji su poznati u literaturi i inženjerskoj praksi.

Polazne hipoteze ove doktorske disertacije su:

- Procena vremenskog dijagrama snage fotonaponskog panela koja se vrši na osnovu poznatog dijagrama solarne iradijacije, ambijentalne temperature i prostorne orijentacije fotonaponskog panela.
- Vremenski profil solarnog zračenja ima efekte u pogledu ekonomičnosti fotonaponskih elektrana. Polazna pretpostavka je da su korelisanost vremenskih profila cene električne energije na tržištu električne energije i vremenskog profila proizvodnje fotonaponske elektrane ključni pokazatelji u pogledu valorizacije električne energije proizvedene u fotonaponskim elektranama.
- Efekti rada fotonaponske elektrane na elektroenergetski sistem su dominantno određeni sučeljavanjem vremenskih dijagrama potrošnje i dijagrama proizvodnje fotonaponskih elektrana. Ova sučeljavanja određuju tokove snaga kroz elemente distributivnog sistema koji definišu gubitke aktivne snage u distributivnoj mreži.
- U cilju sagledavanja efekata fotonaponskih elektrana na gubitke aktivne snage u distributivnoj mreži polazna pretpostavka je da će perspektivni elektroenergetski sistem imati prostorno homogenu disperzovane fotonaponske sisteme integrisane u krovove zgrada.

1.1. Pregled trenutnog stanja u oblasti solarne energetike u Evropi i svetu i perspektive njenog razvoja

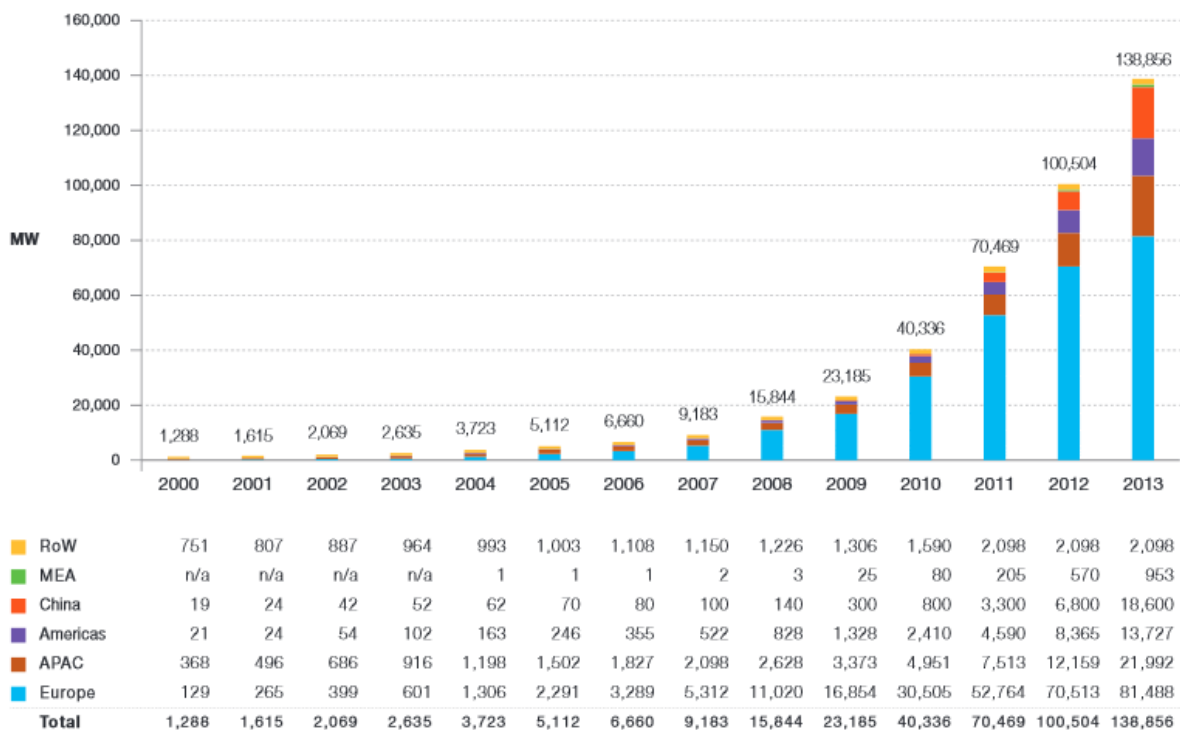
U poslednjih deset godina došlo je do naglog i brzog razvoja ove grane energetike. To ukazuje na ogroman potencijal fotonaponskih sistema, kao i na realnost pretpostavki da će fotonaponski sistemi postati jedan od glavnih izvora električne energije u relativno bliskoj budućnosti [11, 26, 66].

Eksplozivan napredak industrije i tehnologije proizvodnje fotonaponskih ćelija, rezultirao je višestrukim padom cena komponenti fotonaponskih sistema na tržištu [71-73], a takođe i velikim instalisanim kapacitetima koji su priključeni na elektroenergetski sistem [74, 75].

Napredak dalje tehnologije razvoja fotonaponskih sistema je usmeren ka razvoju energetski efikasnijih i jeftinijih fotonaponskih ćelija, na primer tehnologije tankih filmova, organskih fotonaponskih ćelija i *Perovskite* mineralne tehnologije fotonaponskih ćelija [116-118], kao i ka razvoju pretvaračkih sistema za njihovo povezivanje na elektroenergetski sistem.

Istorijski gledano, vodeća zemlja po broju instalisanih kapaciteta fotonaponskih sistema su do 1996. godine bile Sjedinjene Države, posle kojih je vođstvo preuzeo Japan sve do 2005. godine kada je značajan kapacitet fotonaponskih sistema instalisan u Nemačkoj. Samo je u toku 2009. godine u Nemačkoj instalisano 3.8 GW fotonaponskih sistema [129].

Na slici 1.1. je prikazana evolucija globalnog instalisanog kapaciteta fotonaponskih sistema u periodu od 2000. do 2013. godine [139].

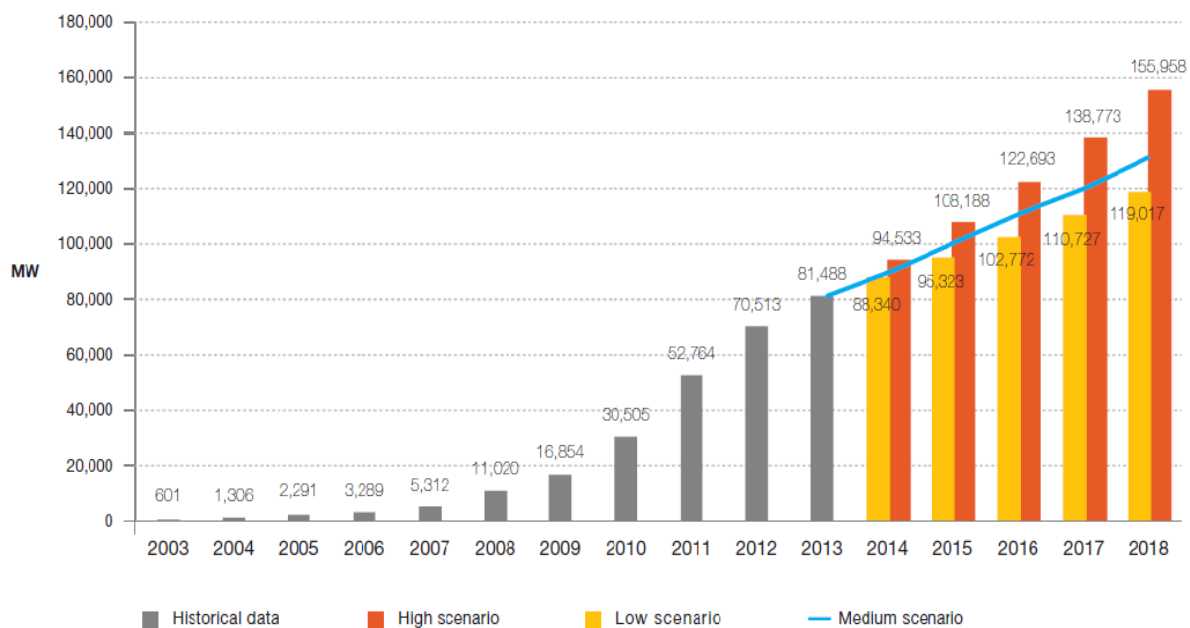


Slika 1.1. Porast globalnog instalisanog kapaciteta fotonaponskih elektrana u periodu od 2000. do 2013. godine [139]

Sa slike 1.1. se može uočiti porast nivoa instalisanog kapaciteta fotonaponskih sistema u svetu od 2000. godine, kada je taj nivo bio jako nizak, do 2013. godine, kada je on postao preko 100 puta veći.

Izuzetno značajan porast broja instalisanih fotonaponskih sistema se primećuje u zemljama članicama Evropske Unije od 2005. godine, što je navedeno u literaturi [25-28].

Prema podacima Evropske asocijacije fotonaponske industrije (*European Photovoltaic Industry Association - EPIA*) prikazan je porast instalisanog kapaciteta fotonaponskih elektrana u zemljama Evropske Unije na slici 1.2. [119].



Slika 1.2. Trend porasta instaliranih kapaciteta fotonaponskih sistema u zemljama Evropske Unije [119]

U tabeli 1.1. navedene su zemlje koje u svetu prednjače po broju ukupnog instaliranog kapaciteta fotonaponskih sistema u toku 2013. i 2014. godine [120].

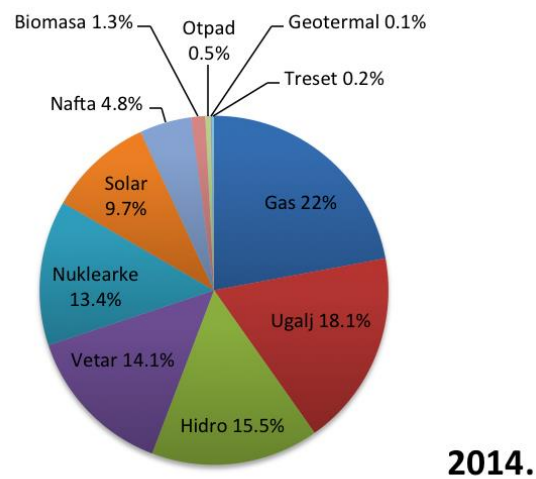
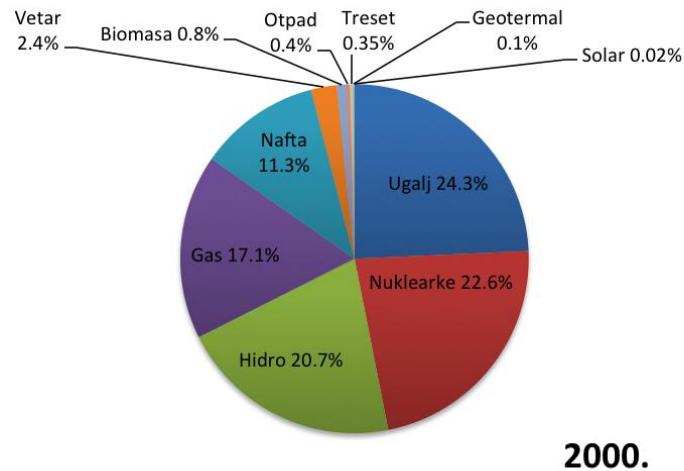
Tabela 1.1. Zemlje sa najvećim instaliranim kapacitetom fotonaponskih sistema u svetu u toku 2013. i 2014. godine [120]

Zemlja	Instalirani kapacitet u toku 2013. godine (GW)	Zemlja	Instalirani kapacitet u toku 2014. godine (GW)
Kina	8.6	Kina	12
Japan	6.3	Japan	7.2
Sjedinjene Države	5.5	Sjedinjene Države	6.5
Nemačka	3.8	Nemačka	3.7
Italija	1.7	Velika Britanija	1.7

Na kraju 2010. godine učešće fotonaponskih elektrana u ukupnoj instalisanoj snazi svih proizvodnih kapaciteta električne energije u zemljama Evropske Unije iznosilo je svega 0.02%, da bi na kraju 2014. godine učešće fotonaponskih elektrana u ukupnoj instalisanoj snazi svih proizvodnih kapaciteta električne energije u zemljama Evropske Unije iznosilo 9.7%.

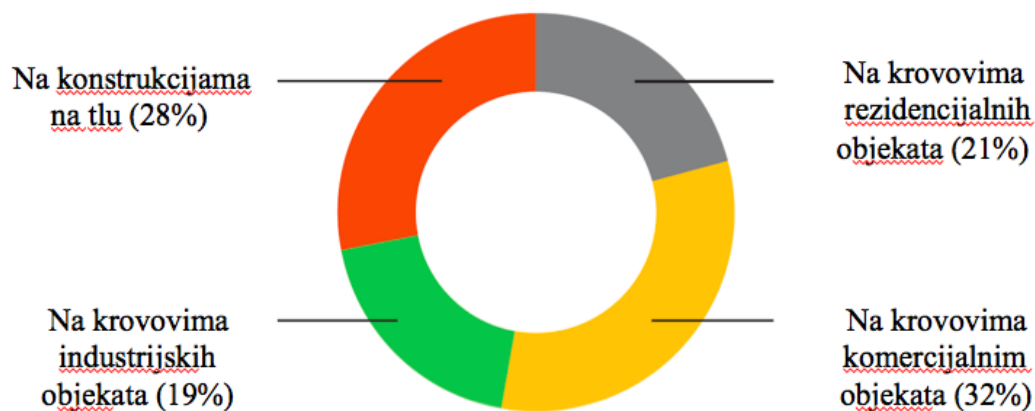
Prema predviđanjima Svetske agencije za energetiku (*International Energy Agency - IEA*) [120, 121], do 2019. godine će se 2% ukupne svetske potrošnje električne energije podmirivati iz fotonaponskih sistema, a do 2050. godine taj udeo će porasti na 16%, što bi značilo da bi globalni instalisani kapacitet fotonaponskih sistema porastao na preko 4600 GW.

Na slici 1.3. je ilustrovan odnos instalisanih snaga svih proizvodnih kapaciteta električne energije u zemljama Evropske Unije u 2000. i 2014.. godini [119].



Slika 1.3. Struktura proizvodnih kapaciteta električne energije u zemljama Evropske Unije u 2000. i 2014. godini

Fotonaponski sistemi se pretežno izgrađuju na krovovima stambenih i drugih objekata, jer na taj način ne zauzimaju korisne površine, već samo pasivne. Fotonaponski sistemi mogu biti izgrađeni i kao stakleni zidovi čime na neki način oni imaju arhitektonsku i građevinsku ulogu. Struktura izgrađenih fotonaponskih sistema u zemljama Evropske Unije je prikazana na slici 1.4.



Slika 1.4. Struktura izgrađenih fotonaponskih sistema u zemljama Evropske Unije

Može se uočiti da se fotonaponski sistemi pretežno instaliraju na krovove komercijalnih objekata, ali i na stambenim i industrijskim objektima. S obzirom na raspoložive krovne površine, snaga krovno integrisanih fotonaponskih sistema je od nekoliko kW do nekoliko stotina kW. Dakle, perspektiva korišćenja fotonaponskih sistema je distribuirana proizvodnja koja će biti disperzovana do krajnjih čvorišta distributivnog sistema. Iz tog razloga efekti njihovog rada u elektroenergetskom sistemu se moraju posmatrati agregirano, za razliku od uobičajene pojedinačne analize koja se primenjuje kod konvencionalnih elektrana velike snage.

2. TEORIJSKA ANALIZA ENERGIJE SUNCA I FOTONAPONSKE KONVERZIJE

Sunce je najveći izvor energije na Zemlji. Energiju Sunca, njegovu svetlost i toplotu, ljudi koriste od davnina na različite načine i uz pomoć različitih tehnologija. Potencijal energije Sunca nekoliko hiljada puta prevazilazi potrebe čovečanstva za energijom, ali se samo mali deo Sunčeve energije koja dospe do Zemlje upotrebljava.

Energija Sunčevog zračenja koja dolazi do površine Zemlje iznosi $1.9 \cdot 10^8$ TWh godišnje, što je 170 puta veće od energije ukupnih poznatih rezervi uglja u svetu [102, 103]. Godišnja proizvodnja električne energije u svetu iznosi $16 \cdot 10^{15}$ Wh/godini. Ako bi se ova energija generisala fotonaponskim sistemima pretpostavljene godišnje izlazne snage od 160 kWh/m^2 , neophodna bi bila površina pod panelima od 100000 km^2 [10].

Poreklo Sunčeve energije je 1938. godine. otkrio i objasnio nemačko-američki fizičar jevrejskog porekla *Hans Albrecht Bethe*. On je pokazao da se na Suncu energija stvara u termonuklearnom procesu fuzije vodonika u helijum koji se odvija u jezgru Sunca. Sunce kao fuzijski reaktor svake de pretvori oko 600 miliona tona vodonika u helijum, pri čemu se oslobađa ogromna količina energije koja se šalje u svemir u vidu svetlosnog, toplotnog, rendgenskog i drugih vidova zračenja. Za održavanje ovog procesa potrebna je velika količina vodonika u jezgru Sunca, uz jako visok pritisak reda 10^{15} Pa i temperaturu reda $10^7 \text{ }^\circ\text{C}$ [10, 12, 13]. Astronomski i energetske podaci o Suncu su dati u tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Astronomski i energetske podaci o Suncu [10]

Masa	$M_s = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
Prečnik	$D_s = 1.39 \cdot 10^6 \text{ km}$
Površinska temperatura	$T_p = 5700 \text{ }^\circ\text{C}$
Gustina snage zračenja sa površine	$S_I = 64 \text{ MW/m}^2$
Udaljenost od Zemlje	$d_{(S,Z)} = (147 \div 152) \cdot 10^6 \text{ km}$
Luminoznost	$L = 3.83 \cdot 10^{26} \text{ W}$

Sunce predstavlja energetski izvor sa ogromnim energetskim potencijalom. Snaga Sunčevog zračenja, odnosno luminoznost iznosi [10, 14]:

$$P(S) = L = 3.83 \cdot 10^{26} \text{ W} = 3.83 \cdot 10^{14} \text{ TW}. \quad (2.1)$$

Sunce oslobodi godišnje u okolni prostor toplotu i svetlost u sledećem iznosu:

$$E_N(S/\text{god}) = 3.36 \cdot 10^{30} \text{ Wh/god} = 3.36 \cdot 10^{18} \text{ TWh/god} \quad (2.2).$$

Prosečna snaga Sunčevog zračenja na površini Zemljine atmosfere iznosi:

$$P(S \rightarrow AZ) = 1.74 \cdot 10^{17} \text{ W} = 1.74 \cdot 10^5 \text{ TW} \quad (2.3)$$

dok godišnja energija Sunčevog zračenja koju prihvata Zemlja sa atmosferom iznosi:

$$E(S \rightarrow AZ, Z) = 10^{21} \text{ Wh/god} \quad (2.4).$$

Oko 30% primljene energije se reflektuje od Zemljine atmosfere nazad u svemir, oko 47% apsorbuje Zemljina površina, oko 23% odlazi na proces kruženja vode u prirodi, 0.2% na energiju vetra i talasa, dok se 0.02% koristi u procesu fotosinteze.

Sunčeva energija stiže do površine Zemlje u vidu elektromagnetnih talasa, koja se prema teoriji korpuskularno-talasnog dualizma može posmatrati kao energija čestica-fotona [14, 15]. Prema kvantnoj teoriji energija jednog fotona je jednaka:

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{1,239}{\lambda} \text{ [eV]} \quad (2.5)$$

gde su: $E[\text{eV}]$ - energija jednog fotona, $h = 6.624 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ - *Plank*-ova konstanta, $f[\text{Hz}]$ - frekvencija fotona, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ - brzina svetlosti, $\lambda[\mu\text{m}]$ - talasna dužina zračenja.

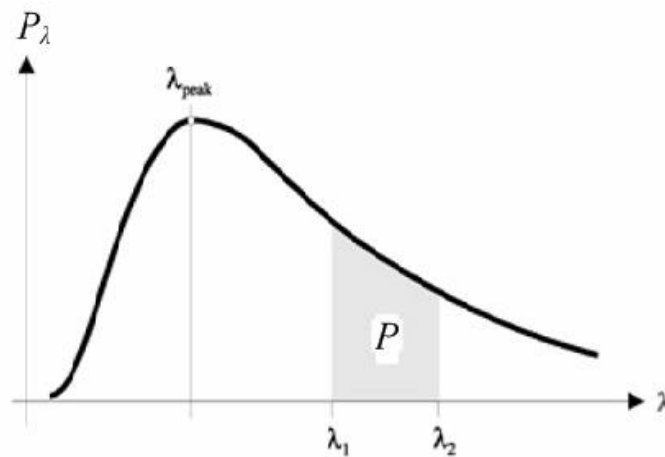
Svako telo na temperaturi većoj od apsolutne nule emituje neku energiju zračenjem, pri čemu se ta energija izračunava tako što se posmatrano telo upoređi sa apstrahovanim crnim telom. Pod crnim telom se podrazumeva idealizovano telo koje emituje više energije sa neke površine na nekoj temperaturi nego bilo koje drugo telo sa iste površine i na istoj temperaturi. Crno telo apsorbuje svu energiju koja stigne na njegovu površinu, tako da pored toga što je savršeni emiter, crno telo je i savršeni apsorber [4, 14, 15].

Plank-ov zakon definiše snagu zračenja sa jedinice površine po jedinici talasne dužine crnog tela na nekoj temperaturi. *Plank-ov zakon* je definisan izrazom:

$$E_{\lambda} = \frac{3.74 \cdot 10^8}{\lambda^5 \left[e^{\frac{14400}{\lambda T}} - 1 \right]} \quad (2.6)$$

gde su: $E_{\lambda} [\text{W}/\text{m}^2 \mu\text{m}]$ - snaga zračenja sa jedinice površine po jedinici talasne dužine, $\lambda [\mu\text{m}]$ - talasna dužina zračenja, $T [\text{K}]$ - apsolutna temperatura crnog tela.

Spektar zračenja crnog tela na nekoj temperaturi je prikazan na slici 2.1.



Slika 2.1. Spektar zračenja crnog tela [12]

Snaga zračenja crnog tela između neke dve talasne dužine je jednaka površini ispod krive spektra zračenja između te dve talasne dužine, tako da bi ukupna snaga zračenja crnog tela na svim talasnim dužinama bila jednaka ukupnoj površini ispod krive spektra zračenja [15]. Ukupna snaga zračenja se izračunava korišćenjem *Stefan-Boltzmann-ovog* zakona:

$$E = A \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.7)$$

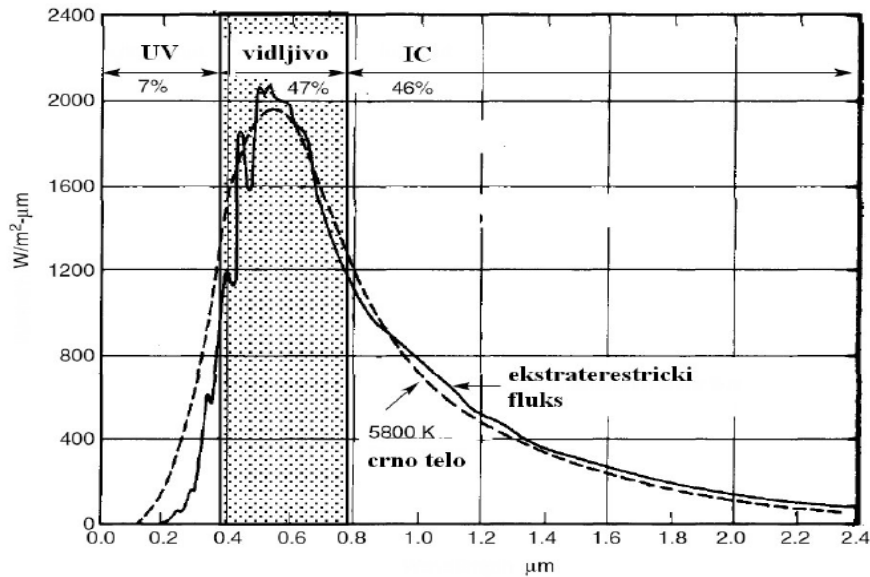
gde su: $E [\text{W}]$ - ukupna snaga zračenja crnog tela, $A [\text{m}^2]$ - površina crnog tela, $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}^4$ - *Stefan-Boltzmann-ova* konstanta, $T [\text{K}]$ - apsolutna temperatura crnog tela.

Pomoću *Wien*-ovog zakona pomeraja može se izračunati talasna dužina maksimalne snage zračenja [4, 15]:

$$\lambda_m = \frac{2898}{T} \quad (2.8)$$

gde su: λ_m [μm] - talasna dužina maksimalne snage zračenja, T [K] - apsolutna temperatura crnog tela.

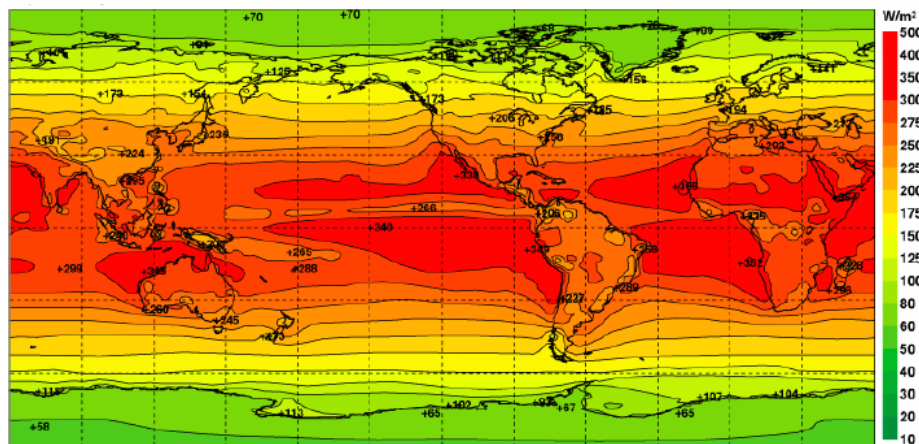
Može se smatrati da Sunce predstavlja crno telo na temperaturi od 5800 K. Na osnovu izraza *Wien*-ovog zakona može se odrediti talasna dužina maksimalne snage zračenja Sunca, koja iznosi 0.5 μm. Spektar Sunčevog zračenja se nalazi između talasnih dužina 0.1 i 10¹³ μm i deli se na ultraljubičasti deo spektra (7%), vidljivi deo spektra (47%) i infracrveni deo spektra (46%). Vidljivi deo spektra je između talasnih dužina 0.38 i 0.78 μm. Na slici 2.2. je prikazan spektar zračenja Sunca na površini Zemljine atmosfere upoređen sa spektrom zračenja crnog tela temperature 5800 K [105,106].



Slika 2.2. Spektar zračenja Sunca na površini Zemljine atmosfere i spektar zračenja crnog tela temperature 5800 K [4]

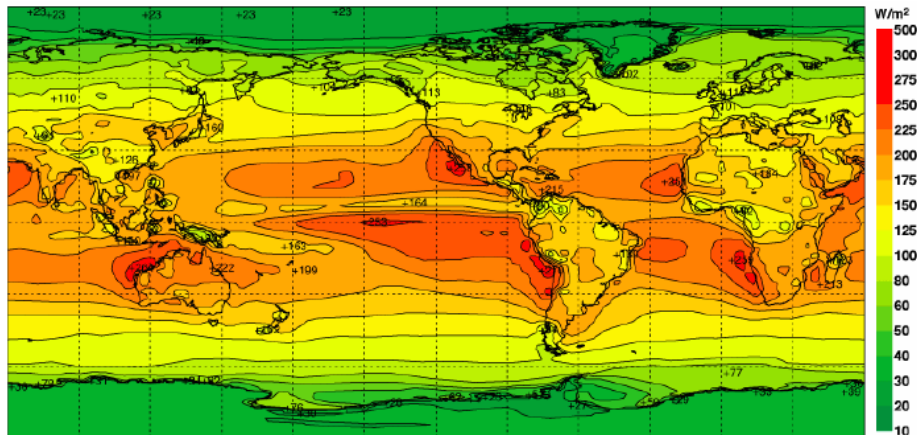
Iradijacija se izražava u kW/m^2 i ona se definiše kao snaga Sunčevog zračenja po jedinici površine, dok insolacija predstavlja količinu Sunčeve energije apsorbovane na određenoj površini u toku određenog vremena i izražava se u kWh/m^2 .

Iradijacija Sunca na ulazu u Zemljinu atmosferu naziva se ekstraterestrička iradijacija (slika 2.3.). Zbog eliptične putanje Zemlje oko Sunca, vrednost ekstraterestričke iradijacije se menja u toku godine. Prosečna godišnja vrednost ekstraterestričke iradijacije po jedinici površine Zemljine atmosfere upravne na Sunčevo zračenje iznosi $SC = 1367 \text{ W/m}^2$ i naziva se solarna konstanta [4, 16, 17].



Slika 2.3. Mapa ekstraterestričke iradijacije Sunca [111]

Iradijacija Sunca koja nakon prolaska kroz Zemljinu atmosferu dospeva na površinu Zemlje naziva se terestrička iradijacija (slika 2.4.). Kada je Sunce u zenitu, pri čistoj atmosferi i vedrom danu, maksimalna vrednost terestričke iradijacije na horizontalnoj površini Zemlje iznosi 1000 W/m^2 i ta vrednost se naziva jedno Sunce [4, 16, 17].



Slika 2.4. Mapa terestričke iradijacije Sunca [111]

Intenzitet terestričkog Sunčevog zračenja nije ravnomerno raspoređen na površini Zemlje zbog loptastog oblika Zemlje, kao i zbog njene relativno složene rotacije. Raspodela Sunčeve energije zavisi od geografske širine, godišnjeg doba, doba dana, orografskih uslova i oblačnosti, pa je tako prosečna vrednost Sunčeve iradijacije u gornjim slojevima atmosfere 342 W/m^2 , što je oko 0.25 vrednosti solarne konstante. Pri prolasku kroz Zemljinu atmosferu intenzitet Sunčevih zraka slabi usled apsorpcije i raspršivanja elektromagnetnih talasa na molekule vazduha i druge čestice u atmosferi, s toga je direktno Sunčevo zračenje veoma oslabljeno. Prosečna vrednost Sunčeve iradijacije na površini Zemlje je 230 W/m^2 .

Pre ulaska u Zemljinu atmosferu Sunčevo zračenje se sastoji od snopa elektromagnetnih talasa. Jedan deo Sunčevog zračenja po ulasku u atmosferu apsorbuju ozon (O_3) ugljen-monoksid (CO), ugljen-dioksid (CO_2) i vodena para, dok se jedan deo gubi rasejanjem. Stepem apsorpcije zavisi od debljine atmosfere kroz koju prolaze Sunčevi zraci na putu do Zemlje, kao i od talasne dužine Sunčevog zračenja.

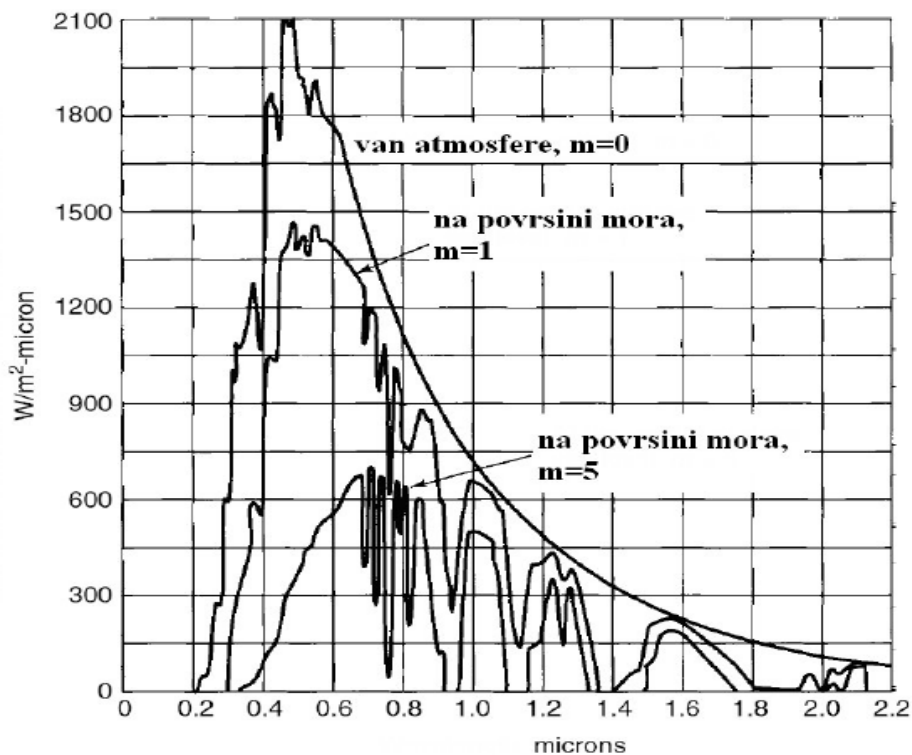
Pokazatelj debljine atmosfere je koeficijent vazdušne mase i on zavisi od doba dana, doba godine, kao i od geografske dužine i širine posmatrane lokacije.

Koeficijent vazdušne mase se određuje prema sledećem izrazu [4, 105]:

$$m = \frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{\sin\beta} \quad (2.9)$$

gde su: m - koeficijent vazdušne mase, h_1 - dužina puta kroz atmosferu kada je Sunce u zenitu, h_2 - dužina puta kroz atmosferu do površine Zemlje, β - altitudni ugao Sunca.

Prema konvenciji je usvojeno da koeficijent vazdušne mase van atmosfere iznosi 0, a kada je Sunce u zenitu ovaj koeficijent ima vrednost 1. Prosečna vrednost koeficijenta vazdušne mase je 1.5. Na slici 2.5. su prikazani spektri ekstraterestričkog i terestričkog zračenja [4].



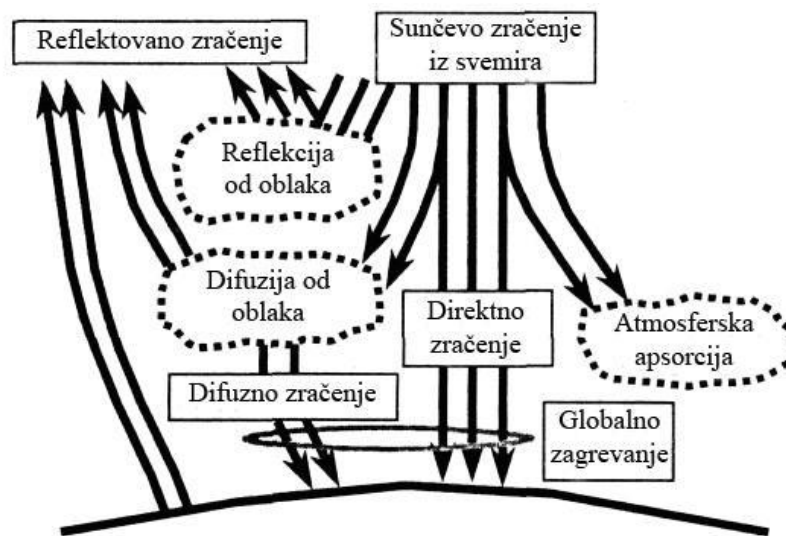
Slika 2.5. Spektri ekstraterestričkog i terestričkog zračenja [4]

Energija zračenja koja doseže do Zemljine površine zavisi od trajanja sijanja Sunca od njegovog izlaska do zalaska, odnosno zavisi od trajanja insolacije i nagiba površine na koju to Sunčevo zračenje dospeva.

Trajanje insolacije zavisi od geografske širine i godišnjeg doba. Dotok energije Sunčevog zračenja nije proporcionalan trajanju insolacije. Deo energije se gubi prolaženjem kroz atmosferu usled apsorpcije kiseonika (O_2), ozona (O_3) i ugljen-dioksida (CO_2).

Energija zračenja se prolaskom kroz atmosferu raspršuje, a najveći gubitak je neposredno nakon zalaska Sunca, kada je vazдушna masa najveća. Deo raspršene energije ipak dođe do Zemljine površine.

Ukupno zračenje koja stigne do Zemljine površine se naziva globalno zračenje i ono predstavlja zbir direktnog, difuzionog i reflektovanog zračenja (slika 2.6.). Zračenje koje nije reflektovano ili rasejano, a doseže Zemljinu površinu direktno u liniji sa Suncem, je direktno zračenje, dok je difuziono zračenje rasejano zračenje koja pada na površinu Zemlje. Čestice u atmosferi i oblaci su glavni uzročnici difuzije Sunčevih zraka. Jedan deo zračenja može da stigne na prijemnik usled refleksije od površinu Zemlje i taj deo zračenja se naziva albedo.



Slika 2.6. Bilans snaga Sunčevog zračenja [14, 105]

Udeo direktnog zračenja je 70%, difuzionog 20%, dok se ostali deo zračenja (10%) apsorbuje ili reflektuje. Refleksija svetlosti se povećava u zimskom periodu kada ima snega na tlu, dok u toku letnjeg perioda kada je tlo prekriveno zemljom ili travom opada [10, 14].

Podaci o iradijaciji i srednjoj energiji fotona Sunčeve svetlosti za karakteristične slučajeve položaja Sunca na nebu i atmosferskih uslova su predstavljeni u tabeli 2.2. [18].

Tabela 2.2. Podaci o iradijaciji i srednjoj energiji fotona Sunčeve svetlosti za karakteristične slučajeve [18]

	Iradijacija I (W/m ²)	Srednja energija fotona (eV)
Van atmosfere	1367	1.48
Na površini mora - Sunce u zenitu	1060	1.32
Na površini mora - Sunce 20° iznad horizonta	750	1.20
Na površini mora - Sunce 20° iznad horizonta, vazduh vlažan	600	1.18
Na površini mora - Oblačno	100	1.44

2.1. Fotonaponska konverzija energije Sunca

Fotovoltaika se bavi proučavanjem pretvaranja energije Sunčevog zračenja u električnu energiju, a sama reč fotovoltaika potiče od grčke reči „*phos*”, što znači svetlost i reči „*volt*”. Fotonaponska konverzija energije Sunca podrazumeva direktno pretvaranje energije Sunčevog zračenja u električnu energiju i naziva se fotonaponski efekat. Ovaj efekat prvi je, pre skoro dva veka, uočio francuski naučnik *Edmond Becquerel*. Razvojem kvantne teorije početkom 20-tog veka fotonaponski efekat je objašnjen, čime je omogućena izrada fotonaponskih uređaja. Fotonaponska konverzija Sunčevog zračenja se vrši u fotonaponskim ćelijama koje su izrađene od poluprovodničkih materijala čiji rad zadovoljava najviše ekološke standarde [103]. Prva fotonaponska ćelija je izrađena u *Bell* laboratorijama 1954. godine. Fotonaponske ćelije izrađene od poluprovodnog silicijuma su jako brzo, sa razvojem istraživanja svemira, postale osnovni izvori električne energije na satelitima, svemirskim brodovima i stanicama zbog svoje pouzdanosti.

Značaj njihove upotrebe na Zemlji je postao aktuelan u toku svetske energetske krize 70-ih godina prošlog veka, kada je počeo rad na poboljšanju njihovih radnih karakteristika, povećanju njihove efikasnosti i pouzdanosti, kao i rad na nižoj proizvodnoj ceni.

Danas fotonaponska konverzija podrazumeva visoku tehnologiju proizvodnje električne energije iz energije Sunca.

Fotovoltaik, tj. fotonaponski materijal je materijal koji ima sposobnost da pretvara energiju sadržanu u fotonima svetlosti u električnu energiju. Kada foton dovoljno male talasne dužine, tj. dovoljno velike energije, padne na površinu fotonaponskog materijala, može prouzrokovati da se elektron u tom materijalu odvoji od atoma za koji je bio vezan. Slobodni elektroni, ukoliko se nađu u električnom polju, počinju da se kreću i da stvaraju električnu struju.

Kao fotonaponski materijali koriste se poluprovodnički materijali, od kojih je najzastupljeniji silicijum (Si) koji ima 4 elektrona na poslednjem energetsom nivou (valentni energetski nivo), tj. 4 valentna elektrona. Kada se valentnim elektronima dovede dovoljna količina energije oni će preći iz valentne zone u provodnu zonu i na taj način postati nosioci naelektrisanja. Kod poluprovodnika, za razliku od provodnika, se sem elektrona kao nosioci naelektrisanja javljaju i pozitivno naelektrisane šupljine. Šupljine ostaju vezane za atom kada ga elektron napusti. Razlika između provodnika, poluprovodnika i izolatora je upravo u količini energije koju je potrebno dovesti da bi elektroni prešli u provodnu zonu, tj. da bi postali slobodni elektroni i kao takvi nosioci naelektrisanja, a ta razlika energije između valentne i provodne zone se naziva energetska barijera [15,19, 106].

Da bi fotonaponska ćelija bila efikasna, neophodno je da energetska barijera poluprovodničkog materijala od koga je izrađena, odgovara određenom delu energetske spektra Sunčeve svetlosti.

U tabeli 2.3. prikazane su vrednosti energetske barijere poluprovodnika koji se koriste za proizvodnju fotonaponskih ćelija i talasne dužine fotona koji imaju energiju jednaku energiji te barijere [105, 106].

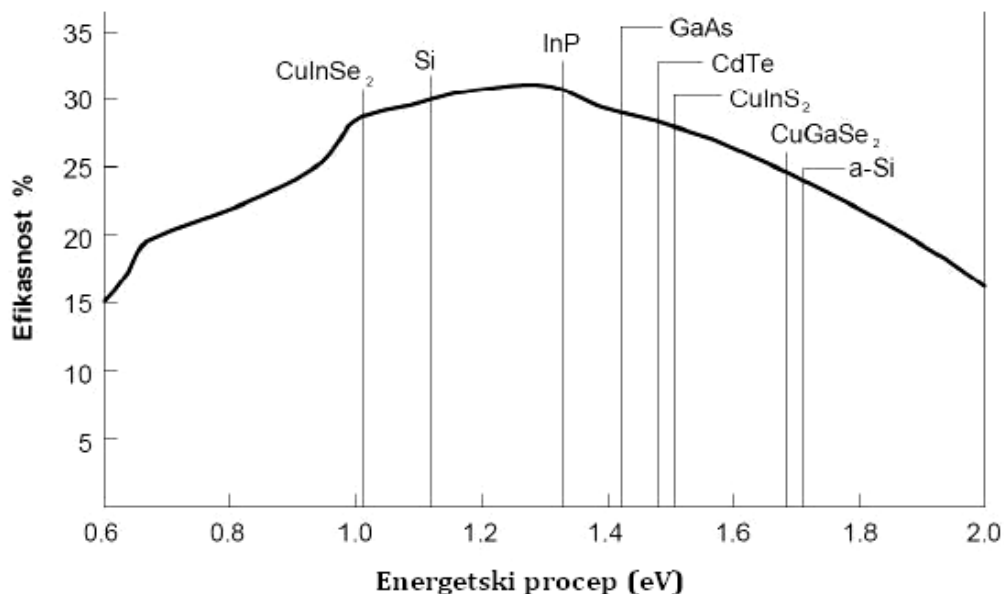
Tabela 2.3. Energetske barijere poluprovodnika i odgovarajuće talasne dužine fotona

Poluprovodnik	Talasna dužina fotona (μm)	Energetska barijera (eV)
Si	1.11	1.12
GaAs	0.87	1.42
CdTe	0.83	1.5
InP	0.92	1.35

Vrednost optimalne energetske barijere za Sunčevu svetlost se kreće u opsegu od 1.4 do 1.6 eV. Energetska barijera silicijuma (Si) je manja od optimalne, ali pošto je u prirodi prisutan u velikim količinama, silicijum predstavlja trenutno najzastupljeniji materijal od koga se izrađuju fotonaponske ćelije. Fotonaponske ćelije izrađene od galijum-arsenida (GaAs), kao i od kadmijum-telurida (CdTe) imaju skoro optimalnu vrednost energetske barijere, odnosno fotoni Sunčevog zračenja imaju energiju blisku energetske barijeri ovih materijala.

Za materijal date energetske barijere, struja koju proizvodi fotonaponska ćelija zavisi od broja parova elektrona i šupljina proizvedenih u jedinici vremena, koja sa druge strane zavisi od broja fotona koji padaju na fotonaponsku ćeliju. Drugim rečima, intenzitet svetlosti i površina ćelije određuju struju, dok energetska barijera materijala određuje napon. Ako je energetska barijera mala, više fotona će stvarati nosioce naelektrisanja, ali će napon biti mali, dok za slučaj velike energetske barijere, manje fotona će imati dovoljnu energiju da stvori nosioce naelektrisanja, odnosno struju, ali će napon biti veći [105, 106].

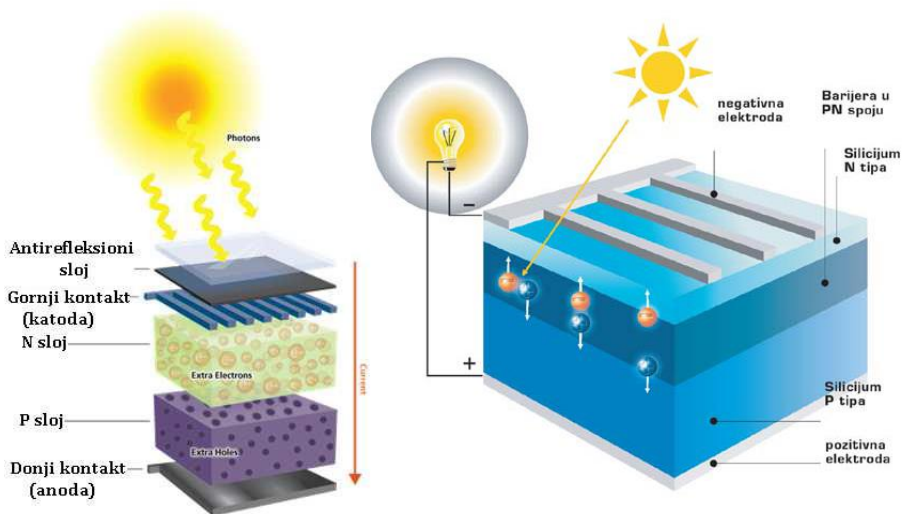
Fotoni koji imaju manju energiju od potrebne neće pobuditi elektron, dok će oni koji imaju veću energiju zagrevati materijal i tako gubiti svoju energiju. Ova disipacija toplote predstavlja mehanizam glavnog gubitka energije u fotonaponskim ćelijama i time ograničava njihovu efikasnost. Fotonaponske ćelije izrađene od galijum-arsenida (GaAs) imaju vrednost energetske barijere pri kojoj je efikasnost najveća. Na slici 2.7. su prikazane krive efikasnosti konverzije Sunčeve svetlosti u zavisnosti od energetske barijere materijala koji se koristi za izradu fotonaponske ćelije [19, 20].



Slika 2.7. Zavisnost efikasnosti fotonaponske konverzije od veličine energetske barijere poluprovodnika [12]

Ukoliko je fotonaponski materijal čist poluprovodnik, može se desiti da dođe do rekombinacije elektrona i šupljina, što dovodi do nestanka nosioca naelektrisanja. Da bi se ovaj slučaj izbegao, potrebno je da se poluprovodnik dopira elementima iz treće grupe periodnog sistema sa 3 valentna elektrona ili sa elementima iz pete grupe periodnog sistema sa 5 valentnih elektrona. Trovalentni atomi, odnosno akceptori, prihvataju jedan elektron iz četvorovalentnog atoma poluprovodnika i stvaraju višak šupljina, dok petovalentni atomi tzv. donori, daju jedan elektron i time stvaraju višak elektrona. Poluprovodnik dopiran akceptorima se naziva poluprovodnik *p*-tipa, dok je poluprovodnik dopiran donorima poluprovodnik *n*-tipa i na taj način se formira *p-n* spoj. Na samom spoju dolazi do rekombinacije elektrona i šupljina i nastaje oblast prostornog tovara unutar kog postoji unutrašnje električno polje koje sprečava dalju rekombinaciju parova elektron šupljina i drži elektrone na *n*-strani, a šupljine na *p*-strani. Upravo je to polje potrebno za proticanje električne struje nakon fotonaponske konverzije [99, 101, 106].

Fotonaponska ćelija je sastavljena od poluprovodnog sloja n -tipa, koji je tanak i providan, tako da Sunčevi zraci prodiru kroz njega i padaju na kontaktni spoj i od poluprovodnog sloja p -tipa, koji je deblji. Na strani n -tipa se nalaze metalni kontakti koji imaju oblik uskih razdvojenih traka, kao i tanak sloj antirefleksionog materijala koji sprečava refleksiju Sunčevih zraka. Kada zraci Sunca prodru kroz tanak sloj n -tipa do p - n spoja, energija fotona formira nosioce naelektrisanja, koji se pod dejstvom električnog polja prostornog tovara kreću prema metalnim kontaktima ćelije. Kroz spoljašnje električno kolo kreću se elektroni i rekombinuju se sa šupljinama. Ilustracija principa fotonaponske konverzije i izgled fotonaponske ćelije pokazani su na slici 2.8. [19,20].



Slika 2.8. Princip fotonaponske konverzije i silicijumska fotonaponska ćelija [114]

2.2. Osnovni tipovi fotonaponskih ćelija

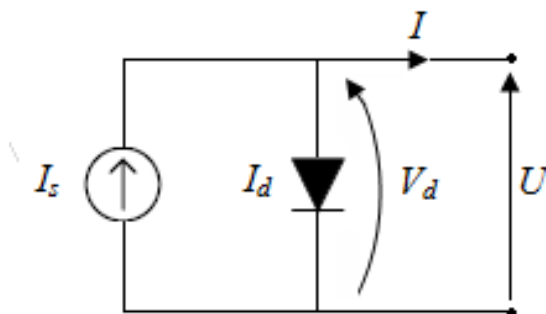
Jedan od kriterijuma prema kojem se mogu razvrstati fotonaponske ćelije je debljina poluprovodnika. Standardne silicijumske fotonaponske ćelije su debljine reda 200-500 μm . Drugi tip su fotonaponske ćelije napravljene od tankoslojnog materija, filmova, debljine od svega nekoliko mikrona reda 1-10 μm . Ovakve ćelije zahtevaju manje poluprovodnog materijala i jednostavnije su za proizvodnju. Za njihovu izradu najčešće se koriste amorfni silicijum, polikristalni materijali, kadmijum-telurid (CdTe) i drugi [19, 99].

Na osnovu tipa silicijumskog materijala, odnosno na osnovu načina na koji su atomi povezani u individualnim kristalima fotonaponske ćelije se mogu podeliti na: monokristalne (napravljene od jednog kristala; dominantne su silicijumske (Si)), multikristalne (napravljene su od većeg broja velikih kristala), polikristalne (napravljene su od velikog broja malih kristalnih zrna; izrađuju se od kadmijum-telurid (CdTe) i tankoslojnog silicijuma (Si)), mikrokristalne (napravljene su od veoma sitnih kristalnih zrna) i amorfne (u njima ne postoje kristalne strukture; dominantne su silicijumske (Si)) [20, 21].

Fotonaponske ćelije se mogu podeliti i na osnovu toga da li su p -tip i n -tip poluprovodnika izrađeni od istog materijala ili od različitog, odnosno da li su homogene ili heterogene. Tako postoje ćelije gde je n -tip poluprovodnika izrađen od kadmijum-sulfida (CdS), dok je p -tip izrađen od bakar-indijumdiselenida (CIS).

2.3. Ekvivalentna zamenska šema fotonaponskih ćelija

Fotonaponska ćelija se može predstaviti zamenskom šemom prikazanom na slici 2.9. koja se sastoji od jedne diode i idealnog strujnog izvora [4, 20, 21, 105].



Slika 2.9. Ekvivalentna zamenska šema fotonaponske ćelije [13]

Na osnovu poznatog izraza za struju diode:

$$I_d = I_o \cdot \left(e^{\frac{qV_d}{kT}} - 1 \right) \quad (2.10)$$

može se napisati izraz za struju fotonaponske ćelije:

$$I = I_s - I_o \cdot \left(e^{\frac{qV_d}{kT}} - 1 \right) \quad (2.11)$$

gde su: I_d [A] - struja diode, I_s [A] - struja zasićenja, V_d [V] - napon diode, $q = 1.602 \cdot 10^{-19}$ C - naelektrisanje elektrona, $k = 1.381 \cdot 10^{-23}$ J/K – *Boltzmann*-ova konstanta, T [K] - apsolutna temperatura diode, I_s [A] - maksimalna struja fotonaponske ćelije (struja kratkog spoja).

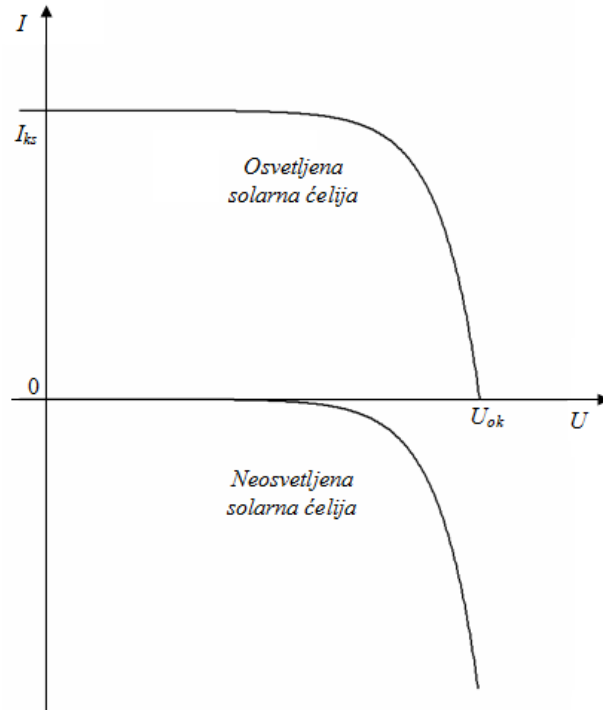
Na osnovu poznate U - I karakteristike diode, dolazi se do U - I karakteristike fotonaponske ćelije koja je prikazana na slici 2.10. Postoje dva radna režima koja su značajna za određivanje karakteristike fotonaponske ćelije, a to su kad je ćelija u kratkom spoju i kad je strujno kolo ćelije otvoreno.

Na slici 2.10. je prikazana karakteristika osvetljene i neosvetljene fotonaponske ćelije. Struja I_{ks} je struja kratkog spoja, a napon V_{ok} je napon otvorenog kola.

Napon otvorenog kola se dobija iz izraza (2.11) za struju $I = 0$:

$$0 = I_s - I_o \cdot \left(e^{\frac{qV_{oc}}{kT}} - 1 \right) \quad (2.12)$$

$$V_{ok} = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_s}{I_o} + 1\right) \quad (2.13).$$

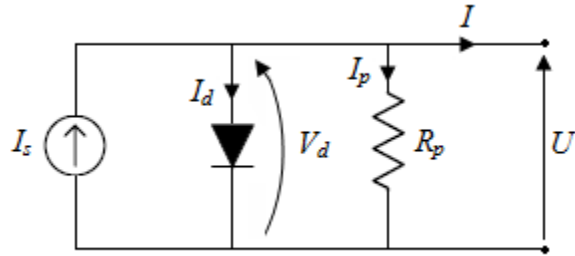


Slika 2.10. U - I karakteristika fotonaponske ćelije [13]

Za slučajeve kada je više ćelija vezanih na red potrebno je koristiti složeniju zamensku šemu. Ako dođe do zasenčenja jedne od ćelija, struja neće moći da protiče kroz rednu vezu ćelija, odnosno nijedna ćelija neće proizvoditi električnu energiju. U ovakvim slučajevima, važno je staviti bajpas, tj. obilaznu diodu kroz koju će teći struja, pri čemu će fotonaponska ćelija ostati neoštećena [122].

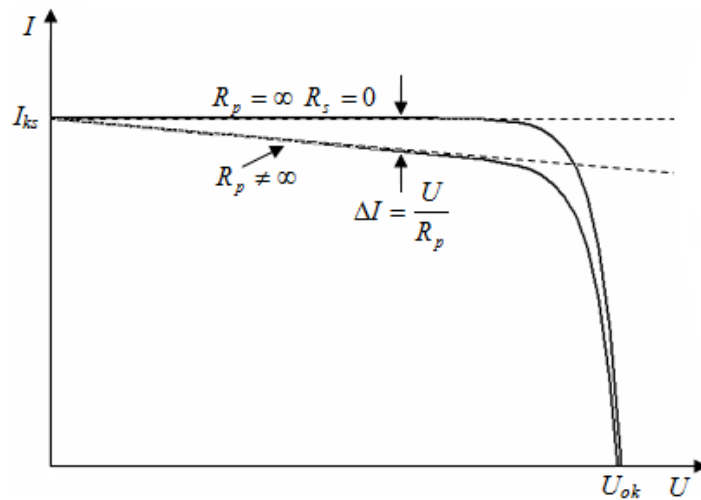
U slučaju zasenčenja potrebno je koristiti složeniju zamensku šemu, kod koje se u ekvivalentnu zamensku šemu dodaje otpornik R_p paralelno u kolo sa diodom (slika 2.11.). Na osnovu zamenske šeme sa slike 2.11. može se izvesti novi izraz sa struju fotonaponske ćelije:

$$I = I_s - I_o \cdot \left(e^{\frac{qV_d}{kT}} - 1 \right) - \frac{U}{R_p} \quad (2.14).$$



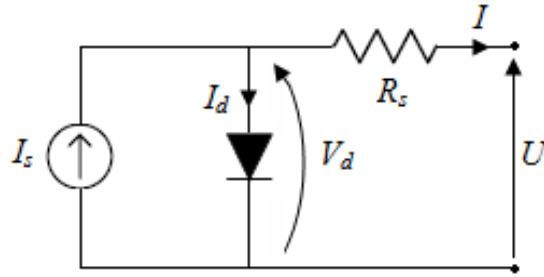
Slika 2.11. Usložnjena zamenska šema fotonaponske ćelije sa paralelnim otpornikom [13]

Posmatrajući izraz (2.14.) izvodi se zaključak da dolazi do smanjenja struje fotonaponske ćelije usled dodavanja paralelne otpornosti što je i prikazano slici 2.12.



Slika 2.12. Uticaj paralelne otpornosti na U - I karakteristiku fotonaponske ćelije [13]

Ukoliko se u ekvivalentnu zamensku šemu doda redni otpornik R_s dobija se zamenska šema na slici 2.13.



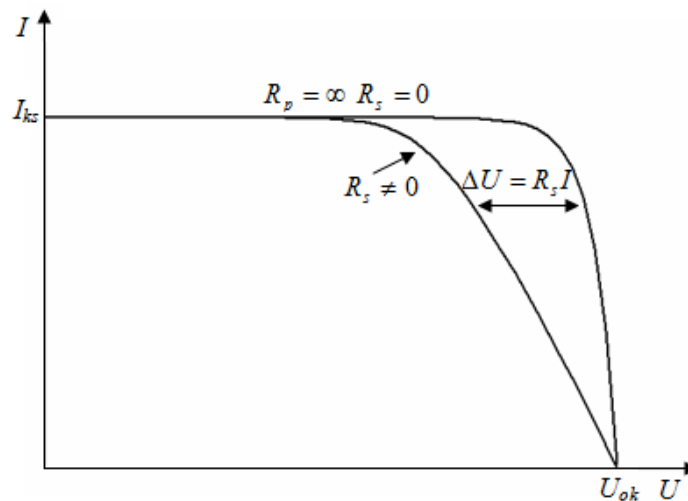
Slika 2.13. Usložnjena zamenska šema fotonaponske ćelije sa rednim otpornikom [13]

Na osnovu zamenske šeme sa slike 2.13. izvodi se novi izraz za struju fotonaponske ćelije:

$$I = I_s - I_o \cdot \left(e^{\frac{qV_d}{kT}} - 1 \right)$$

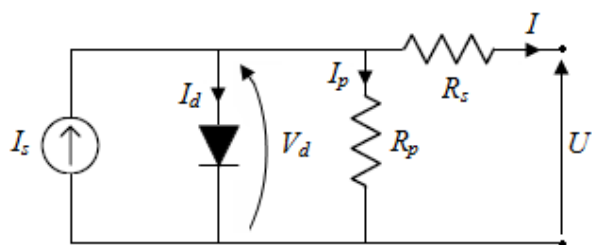
$$V_d = U + I \cdot R_s \quad (2.15).$$

Posmatrajući ovaj izraz, izvodi se zaključak da dolazi do smanjenja napona fotonaponske ćelije usled dodavanja redne otpornosti što je i prikazano slici 2.14.



Slika 2.14. Uticaj redne otpornosti na U - I karakteristiku fotonaponske ćelije [13]

Uvažavajući i paralelnu i rednu otpornost može se predstaviti sledeća najčešće korišćena zamenska šema koja je prikazana na slici 2.15.

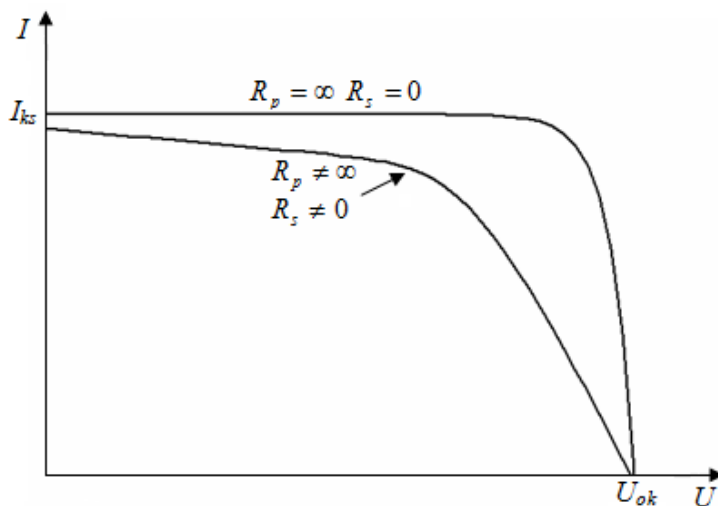


Slika 2.15. Najčešće korišćena zamenska šema fotonaponske [13]

Može se izvesti sledeći izraz za struju fotonaponske ćelije sa paralelnim i rednim otpornikom:

$$I = I_s - I_o \cdot \left(e^{\frac{q(U+I \cdot R_s)}{kT}} - 1 \right) - \frac{U+I \cdot R_s}{R_p} \quad (2.16).$$

Uticaj paralelnog i rednog otpornika na U - I karakteristiku fotonaponske ćelije je prikazan na slici 2.16.

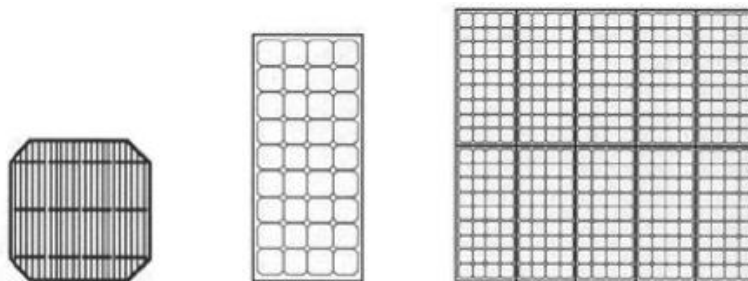


Slika 2.16. Uticaj paralelnog i rednog otpornika na U - I karakteristiku fotonaponske ćelije [13]

2.4. Fotonaponski moduli i paneli

Jedna fotonaponska ćelija proizvodi napon od svega 0.6 V. S obzirom na činjenicu da je snaga koju proizvodi jedna fotonaponska ćelija relativno mala, u praksi se više ćelija redno-paralelno povezuje i spaja u blokove koji se nazivaju fotonaponski moduli. Na ovaj način se postižu struja, napon i snaga većeg intenziteta. Tipičan fotonaponski modul ima 36 redno vezanih ćelija i daje napon od 12 V. Postoje i moduli od 72 ćelije koji daju napon od 24 V. Kada se fotonaponske ćelije u modulu vežu redno, one u tom slučaju proizvode istu struju, a naponi im se sabiraju.

Da bi se povećao napon više modula se vezuje na red, a da bi se povećala struja više modula se vezuje u paralelu. Imajući u vidu da je snaga proizvod napona i struje, važno je pronaći optimalnu spregu redno-paralelnih veza modula u cilju dobijanja željenih vrednosti napona i struja na priključcima. Takva veza fotonaponskih modula se naziva fotonaponski panel. Na slici 2.17. su prikazani fotonaponska ćelija, modul i panel.



Slika 2.17. Fotonaponska ćelija, modul i panel

Fotonaponski moduli se konstruišu tako da omogućavaju dugotrajan rad bez potrebe za servisiranjem preko 30 godina u realnim uslovima eksploatacije. U tipičnom fotonaponskom modulu ćelije su uronjene u laminat čiji je prednji sloj od temperovanog stakla, a zadnja strana je zatvorena sa fleksibilnim slojem.

Fotonaponske ćelije su laminirane između temperovanog stakla sa niskim sadržajem gvožđa, voodopornim međuslojem od etilen vinil acetata, kao i polimernim potpornim materijalom sa zadnje strane modula. Zbog ćvrstoće celog sklopa, kao i radi lakše montaže, modul se često postavlja u aluminijumski ram. Pozitivni i negativni kontakti se nalaze unutar razvodne kutije, koja se nalazi sa zadnje strane modula [105].

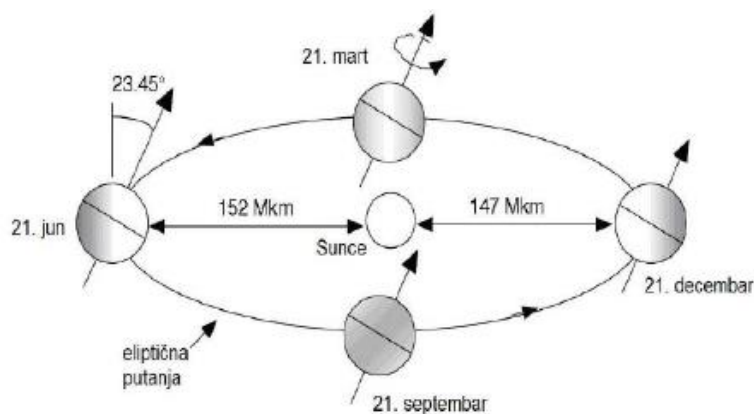
Ukoliko se moduli redno povežu, panel koji se dobija njihovim vezivanjem imaće struju jednaku struji modula, dok će napon biti jednak zbiru napona pojedinih modula za tu struju. Paneli koji su sačinjeni od paralelno vezanih modula imaju isti napon na svim modulima, dok je struja jednaka zbiru struja pojedinih modula. Redno-paralelna veza se može ostvariti na dva načina. Prvi način je da se prvo moduli povežu u paralelu, a zatim se takve konstrukcije vezuju na red, a drugi način je da se prvo moduli povežu na red, a onda se tako redno vezani moduli, povežu paralelno. Prednost drugog načina povezivanja je ta što u slučaju da se ceo jedan red iskljući, panel i dalje može da nastavi da radi sa istim naponom i smanjenom strujom [4, 105].

3. OSNOVNI ELEMENTI PRORAČUNA ENERGETSKOG POTENCIJALA SUNČEVOG ZRAČENJA NA POVRŠINI FOTONAPONSKOG PANELA

Vremenski profil snage koju generiše fotonaponski panel je dominantno uslovljen intenzitetom Sunčevog zračenja na površini fotonaponskog panela. Intenzitet zračenja na površini fotonaponskog panela je uslovljen rotacijom Zemlje oko svoje ose (dnevne promene zračenja), kao i rotacijom Zemlje oko Sunca (sezonske promene). Pored toga, intenzitet Sunčevog zračenja zavisi i od oblačnosti i prisustva difuzione i reflektovane komponente zračenja. Svi ovi uticaji čine dosta složenim model za procenu realnog intenziteta Sunčevog zračenja na površini fotonaponskog panela.

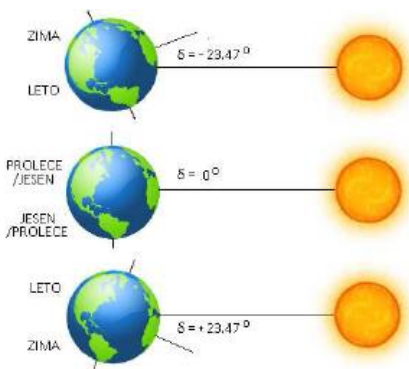
3.1. Teorijski elementi proračuna putanje Sunca u odnosu na ciljni objekat

Zemlja se okreće oko Sunca po eliptičnoj orbiti, koja je prikazana na slici 3.1. Dok se okreće oko Sunca, Zemlja se istovremeno okreće i oko svoje ose koja je postavljena pod uglom od 23.45° u odnosu na normalu ravni orbite.



Slika 3.1. Zemljina orbita oko Sunca [4]

Da bi se odredili potrebni uglovi pod kojima se Sunce nalazi u odnosu na neki objekat na Zemlji treba posmatrati sliku 3.2. na kojoj je Zemlja fiksirana i rotira oko vertikalne ose i Sunce koje se na nekom rastojanju od Zemlje pomera gore-dole kako se menjaju godišnja doba.



Slika 3.2. Predstava odnosa položaja Zemlje i Sunca [105]

Ugao koji obrazuju duž koja spaja centar Sunca sa centrom Zemlje i projekcija te duži na ravan Ekvatora se naziva ugao deklinacije i obeležava se sa δ . Ovaj ugao varira između vrednosti $\pm 23.45^\circ$. Izraz kojim se može odrediti ugao deklinacije bilo kog dana u godini je [4, 105]:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin \left[\frac{360}{365} \cdot (n - 81) \right] \quad (3.1)$$

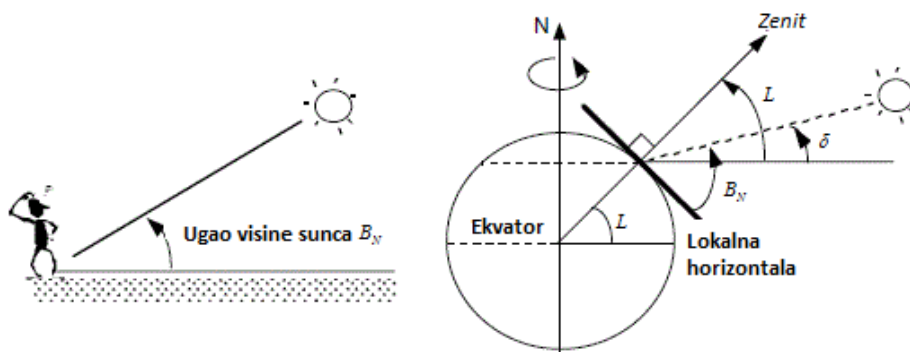
gde su: δ - ugao deklinacije, n - redni broj dana u godini. Vrednosti n za svaki prvi u mesecu su prikazane u tabeli 3.1

Tabela 3.1. Vrednosti broja n

Januar	$n = 1$	Jul	$n = 182$
Februar	$n = 32$	Avgust	$n = 213$
Mart	$n = 60$	Septembar	$n = 244$
April	$n = 91$	Oktobar	$n = 274$
Maj	$n = 121$	Novembar	$n = 305$
Jun	$n = 152$	Decembar	$n = 335$

Da bi iradijacija na površini fotonaponskog panela bila najveća, potrebno je da površ panela bude normalna na upadno Sunčevo zračenje. U tom pogledu, najbolji nagibni ugao fotonaponskog panela je nagibni ugao jednak uglu geografske širine mesta na kome se nalazi taj panel (latitudni ugao L) pri čemu se ostvaruje najveća prosečna iradijacija. Za stanovnike Severne hemisfere to znači usmeravanje fotonaponskog panela prema jugu, odnosno prema Ekvatoru, dok za stanovnike Južne hemisfere panele treba okrenuti ka severu. Radi povećanja efikasnosti fotonaponskog panela potrebno je da zimi bude postavljen pod većim, a leti pod manjim nagibnim uglom od latitudnog [4, 105].

Ugao između duži koja spaja objekat na Zemlji i Sunce i projekcije te duži na horizontalnu površinu se naziva altitudni ugao Sunca u solarno podne β_N . Taj ugao pokazuje pod kojim uglom posmatrač na zemlji vidi Sunce i slikovito je objašnjen na slici 3.3.



Slika 3.3. Pojašnjenje pojma altitudnog ugla [4]

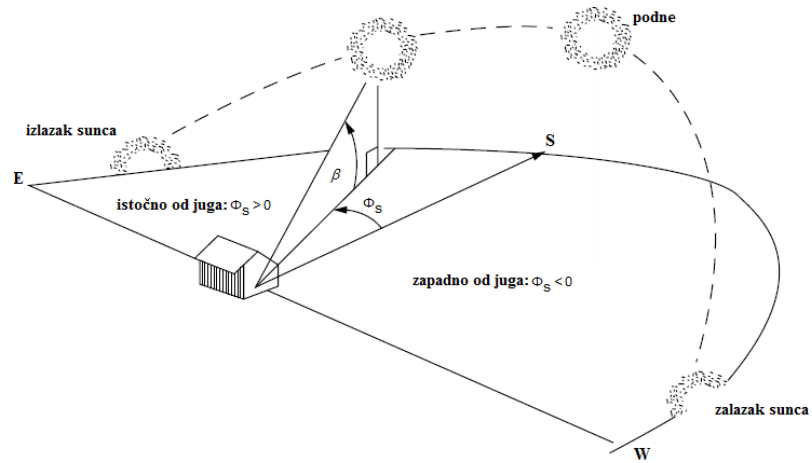
Sa slike 3.3. se uočava sledeća veza između altitudnog ugla Sunca u solarno podne β_N , ugla deklinacije δ i latitudnog ugla L :

$$\beta_N = 90^\circ - L + \delta \quad (3.2).$$

Trenutak kada se Sunce nalazi tačno na jugu (na severnoj hemisferi preko $L=23.45^\circ$), tačno na severu (na južnoj hemisferi ispod $L=-23.45^\circ$) ili na severu, jugu ili tačno iznad posmatrača (između $\pm 23.45^\circ$) se naziva solarno podne.

Solarno podne ne mora da se poklapa sa vremenskim podnevom, jer je Zemljina površina podeljena na 24 vremenske zone koje se razlikuju za po jedan sat. Da bi se ova dva podneva poklapala, potrebno je kontinualno podešavati vreme po geografskim dužinama, čime bi dve tačke koje se nalaze na istom pravcu sever-jug imale različito vreme na časovniku.

Položaj Sunca u odnosu na neki objekat na zemlji je određen njegovim altitudnim uglom β i njegovim azimutnim uglom Φ_S , kao što je prikazano na slici 3.4. Na Severnoj hemisferi azimutni ugao se određuje u odnosu na jug i po konvenciji je usvojeno da je pozitivan jugo-istočno, a negativan jugo-zapadno. Na južnoj hemisferi se ovaj ugao meri u odnosu na sever.



Slika 3.4. Položaj Sunca na nebu, altitudni ugao β i azimutni ugao Sunca Φ_S [4]

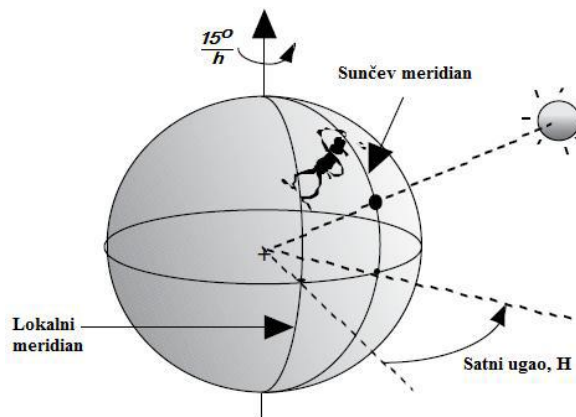
Azimutni i altitudni ugao zavise od geografske širine posmatranog mesta, dana u godini, kao i doba dana. Sledeće dve jednačine se koriste za izračunavanje altitudnog i azimutnog ugla Sunca [4]:

$$\sin \beta = \cos L \cdot \cos \delta \cdot \cos H + \sin L \cdot \sin \delta \quad (3.3)$$

$$\sin \varphi_S = \frac{\cos \delta \cdot \sin H}{\cos \beta} \quad (3.4).$$

U jednačinama (3.3) i (3.4) vreme, odnosno doba dana, je izraženo preko veličine koja se naziva satni ugao H . Satni ugao predstavlja broj stepeni za koji Zemlja mora da zarotira pre nego što se Sunce nađe direktno iznad lokalne geografske širine.

Kao što je prikazano na slici 3.5, Sunce je u svakom trenutku direktno iznad određene linije geografske dužine, koja se naziva Sunčev meridian.



Slika 3.5. Satni ugao, lokalni i Sunčev meridian [4]

Razlika između lokalnog meridijana i Sunčevog meridijana je satni ugao, koji ima pozitivne vrednosti ujutru, a pre nego što Sunce prođe lokalni meridian satni ugao se može izraziti na sledeći način:

$$H = \frac{15^\circ}{h} \cdot \text{broj sati do solarnog podneva} \quad (3.5)$$

gde h predstavlja vreme izraženo u satima.

U toku leta i proleća, u ranim jutarnjim i kasnim večernjim satima, azimutni ugao može biti veći od 90° u odnosu na jug. U nekim slučajevima se pomoću izraza (3.4) ne može odrediti azimutni ugao, jer je u tom izrazu predstavljen kao sinusna funkcija.

Iz tog razloga se često koristi direktni kriterijum za proveru da li je azimutni ugao veći ili manji od 90° koji glasi [4]:

$$\cos H \geq \frac{\tan \delta}{\tan L} \Rightarrow |\phi_S| \leq 90^\circ ; \cos H < \frac{\tan \delta}{\tan L} \Rightarrow |\phi_S| > 90^\circ \quad (3.6)$$

3.2. Model za proračun ukupne iradijacije fotonaponskog panela pri vedrom danu na osnovu ekstraterestričke iradijacije (*Clear day model*)

Jedan deo ekstraterestričkog zračenja se pri prolasku kroz atmosferu apsorbuje i raseje, stoga u toku godine do površine Zemlje stigne u proseku oko 50% ovog zračenja, a pri vedrom danu čak do 70%.

Usled promene rastojanja Zemlje od Sunca u toku godine, intenzitet ekstraterestričke iradijacije se menja. Ekstraterestrička iradijacija se može predstaviti sledećim izrazom [4, 105]:

$$I_0 \left[\frac{W}{m^2} \right] = SC \cdot \left[1 + 0.034 \cdot \cos \left(\frac{360 \cdot n}{365} \right) \right] \quad (3.7)$$

gde su: I_0 - ekstraterestrička iradijacija, $SC = 1367 \text{ W/m}^2$ - solarna konstanta, n - redni broj dana u godini.

Bouguer – Lambert – ov zakon je model kojim se predstavlja direktno zračenje na površini Zemlje:

$$I_B = A \cdot e^{-k \cdot m} \quad (3.8)$$

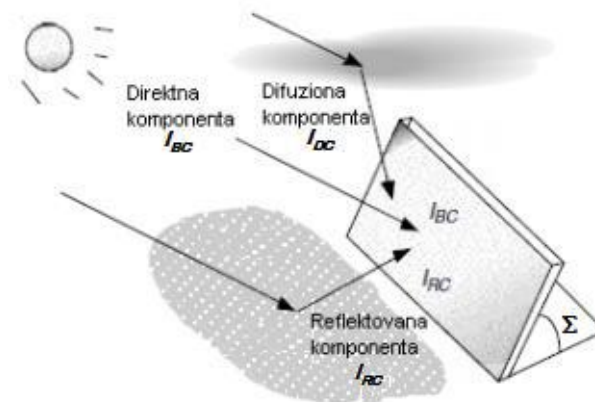
gde su: I_B - direktno zračenje, A - ekstraterestrički fluks, k - optička gustina, m - koeficijent vazdušne mase.

Vrednosti ekstraterestričkog fluksa i optičke gustine se najčešće zadaju tablično, a mogu se i proceniti pomoću jednačina [4]:

$$A \left[\frac{W}{m^2} \right] = 1160 + 75 \cdot \sin \left[\frac{360}{365} \cdot (n - 275) \right] \quad (3.9)$$

$$k = 0.174 + 0.035 \cdot \sin \left[\frac{360}{365} \cdot (n - 100) \right] \quad (3.10).$$

Ukupan fluks Sunčevog zračenja koje dolazi do fotonaponskog panela je zbir direktne komponente solarnog zračenja koja pravolinijski kroz atmosferu dolazi do panela, difuzione komponente zračenja koja se rasipa o molekule u atmosferi i reflektovane komponente zračenja koja se odbija o zemlju ili neku drugu površinu ispred panela [29]. Ova konstatacija je prikazana na slici 3.6.

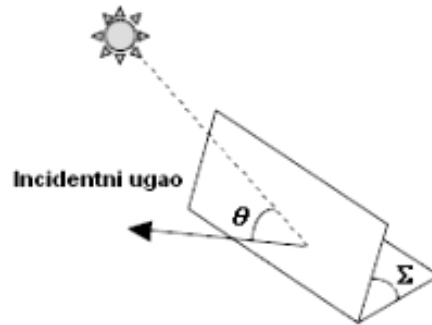


Slika 3.6. Direktna, difuziona i reflektovana komponenta Sunčevog zračenja na površini fotonaponskog panela [4]

Odnos između ukupnog direktnog zračenja I_B i direktnog zračenja koje padne na fotonaponski panel I_{BC} je prikazan na slici 3.7, a može se izraziti sledećom jednačinom:

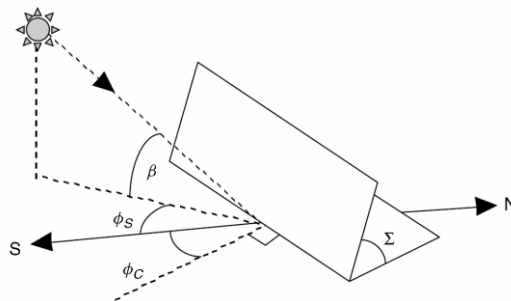
$$I_{BC} = I_B \cdot \cos \theta \quad (3.11)$$

gde je θ - incidentni ugao upadne svetlosti, odnosno ugao između normale na ravan fotonaponskog panela i upadnih zraka.



Slika 3.7. Veza između ukupnog direktnog zračenja i direktnog zračenja na fotonaponskom panelu [4]

Incidentni ugao θ zavisi od orijentacije panela i altitudnog i azimutnog ugla Sunca u svakom trenutku. Fotonaponski panel je nagnut pod uglom Σ i okrenut je u pravcu koji je opisan njegovim azimutnim uglom Φ_C , koji se meri u odnosu na jug, sa pozitivnim vrednostima u pravcu jugoistoka i negativnim vrednostima u pravcu jugozapada (slika 3.8.).



Slika 3.8. Međusobni položaj Sunca i fotonaponskog panela [4]

Prema tome incidentni ugao se može predstaviti sledećom relacijom:

$$\cos \theta = \cos \beta \cdot \cos(\Phi_S - \Phi_C) \cdot \sin \Sigma + \sin \beta \cdot \cos \Sigma \quad (3.12).$$

Veza između direktnog zračenja koje dospeva na horizontalnu površinu I_{BH} i ukupne direktne komponente zračenja I_B je data sledećom relacijom:

$$I_{BH} = I_B \cdot \sin \beta \quad (3.13)$$

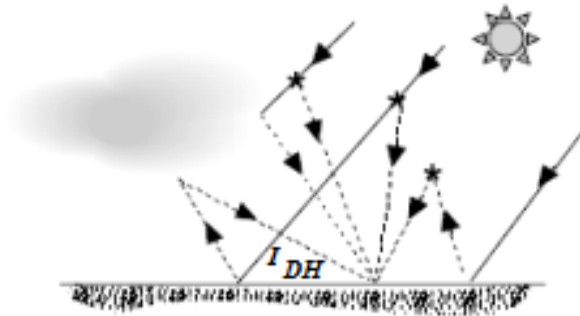
pri čemu je $\Sigma = 0$; $\beta + \theta = 90^\circ$,

dok direktna komponenta zračenja za panel orijentisan prema jugu iznosi:

$$I_{BC} = I_B \cdot \sin(\beta + \Sigma) \quad (3.14)$$

pri čemu je $\Phi_S = \Phi_C$; $\beta + \theta + \Sigma = 90^\circ$.

Za razliku od direktnog zračenja, intenzitet difuzionog zračenja na površini fotonaponskog panela je teže precizno odrediti. Na slici 3.9. su prikazane komponente koje čine difuziono zračenje.



Slika 3.9. Komponente difuzionog zračenja [4]

Difuziono zračenje se rasejava o atmosferske čestice i vlagu, a može biti i reflektovano od oblake. Jedan deo zračenja se reflektuje od površine zemlje ka nebu, zatim se ponovo rasejava i tako dolazi do zemlje.

Prema modelu koji su razvili *Threlkeld* i *Jordan* usvaja se da difuziona komponenta solarnog zračenja ima isti intenzitet iz svih pravaca, tako da se maksimum difuzione komponente zračenja dobija kada bi panel bio postavljen u horizontalnoj ravni.

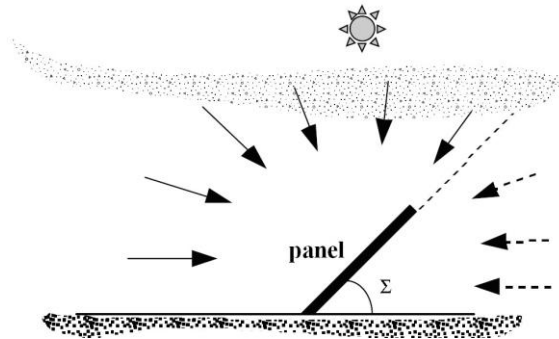
Shodno ovom modelu maksimalna komponenta zračenja I_{DH} je proporcionalna direktnoj komponenti zračenja I_B , ne uzimajući u obzir položaj Sunca na nebu u tom trenutku [4]:

$$I_{DH} = C \cdot I_B, \quad (3.15)$$

gde je C difuziona konstanta koja se izračunava prema sledećem izrazu:

$$C = 0.095 + 0.04 \cdot \sin \left[\frac{360}{365} \cdot (n - 100) \right] \quad (3.16)$$

pri čemu je n - redni broj dana u godini.



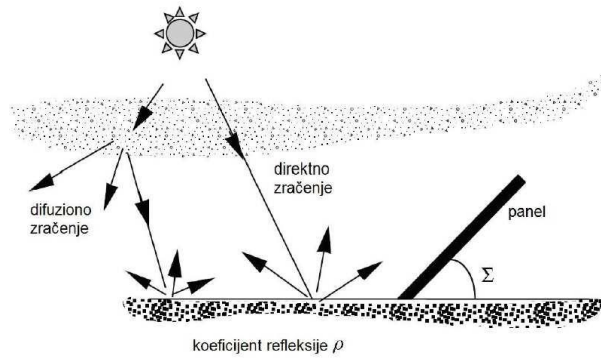
Slika 3.10. Difuziono zračenje na površini fotonaponskog panela [4]

Difuziona komponenta zračenja na fotonaponski panel I_{DC} koji je postavljen u prostoru pod nagibnim uglom Σ u odnosu na horizontalnu ravan i pod azimutnim uglom Φ_C , uz navedenu pretpostavku da difuziono zračenje ima isti intenzitet u svim pravcima kao što je prikazano na slici 3.10, definisana je sledećim izrazom [4]:

$$I_{DC} = I_{DH} \cdot \frac{1 + \cos \Sigma}{2} = C \cdot I_B \cdot \frac{1 + \cos \Sigma}{2} . \quad (3.17).$$

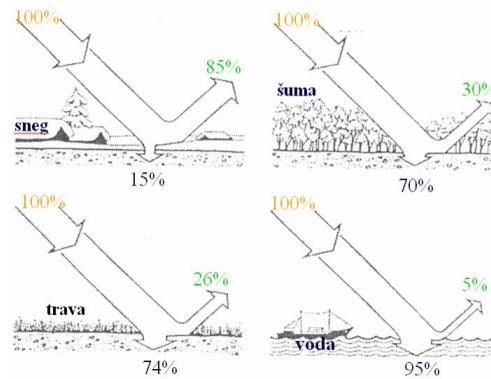
Treća komponenta solarnog zračenja koja dolazi do fotonaponskog panela je posledica zračenja koje se reflektuje od podloge u okolini panela ili od okolne objekte.

Radi određivanja udela reflektovanog zračenja u ukupnom zračenju koje stiže do površine panela potrebno je koristiti model koji uvažava pretpostavku da se od podloge reflektuje direktno i difuziono horizontalno zračenje u svim pravcima (slika 3.11.) [4].



Slika 3.11. Model reflektovanog zračenja [4]

Koeficijent refleksije ρ predstavlja deo ukupnog upadnog zračenja koji se reflektuje od podloge. Na slici 3.12. su prikazane refleksione karakteristike za različite vrste podloge. Tipičan koeficijent refleksije za sneg iznosi 0.8, a za travu 0.2.



Slika 3.12. Refleksione karakteristike za različite vrste podloge

Na osnovu modela prikazanog na slici 3.11. intenzitet reflektovanog zračenja koje stigne na površinu panela se može odrediti sledećim izrazom:

$$I_{RC} = \rho \cdot I_H \cdot \left(\frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right) = \rho \cdot (I_{BH} + I_{DH}) \quad (3.18)$$

odnosno

$$I_{RC} = \rho \cdot I_B \cdot (\sin \beta + C) \cdot \left(\frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right) \quad (3.19).$$

Na osnovu izraza (3.14), (3.17) i (3.19) može se napisati izraz za ukupnu iradijaciju na površini fotonaponskog panela pri vedrom danu:

$$I_C = I_{BC} + I_{DC} + I_{RC}$$
$$I_C = A \cdot e^{-km} \cdot \left[\cos \beta \cdot \cos(\Phi_S - \Phi_C) \cdot \sin \Sigma + \sin \beta \cdot \cos \Sigma + C \cdot \left(\frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right) + \rho \cdot (\sin \beta + C) \cdot \left(\frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right) \right] \quad (3.20).$$

3.3. Model za proračun ukupne iradijacije fotonaponskog panela na osnovu merenja horizontalne iradijacije na mikrolokaciji u realnim vremenskim uslovima

U poglavlju 3.2. opisan je postupak proračuna ukupne iradijacije fotonaponskog panela pri vedrom danu na osnovu ekstraterestričke iradijacije. U realnim uslovima zbog oblačnosti, lokalne zagađenosti atmosfere i drugih sličnih uticaja neophodno je vršiti merenje iradijacije kako bi se korektno odredio solarni potencijal, odnosno potrebno je vršiti merenje horizontalne iradijacije za duži period, od najmanje godinu dana i to na mestu na kome će biti postavljen panel.

Postoje dva principijelna senzora za merenje solarne iradijacije, a to su piranometar i pirheliometar. Piranometar meri ukupnu iradijaciju koja dospeva na njegovu aktivnu površinu uključujući direktnu i difuzionu komponentu. Pirheliometar meri samo direktnu komponentu zračenja.

Najvažniji deo oba merna uređaja je senzor koji reaguje na zračenje Sunca. U solarnoj energetici se za merenje iradijacije više koriste piranometri.

Postoji više tipova piranometra, a najčešće se upotrebljavaju dva tipa piranometra. To su: *Thermopile* crno-beli piranometar i *Li-Cor* piranometar.

Najprecizniji senzori su oni koji koriste *Thermopile* (termopar) crno-beli piranometar za merenje razlike temperature crnih segmenata, koji upijaju zračenje i belih segmenata, koji reflektuju zračenje.

Za razliku od crno-belog piranometra, koji meri ceo spektar zračenja, *Li-Cor* piranometar ima različitu osetljivost za različite talasne dužine [4, 105]. Na piranometar se može postaviti zaklon koji sprečava direktno zračenje, pa se na taj način može izmeriti samo difuziona komponenta zračenja. Piranometri se obično postavljaju u horizontalnu ravan, tako da mere ukupno horizontalno zračenje.

Kako bi se merni rezultati o ukupnom srednjem horizontalnom zračenju, tj. ukupnoj srednjoj horizontalnoj insolaciji $\overline{I_H}$, koji su prikupljeni za određeni period, ekstrapolirali za proizvoljno orijentisan fotonaponski panel potrebno je dekomprovati ukupno srednje horizontalno zračenje koje je izmereno piranometrom, na odgovarajuću direktnu komponentu insolacije $\overline{I_{BH}}$ i difuzionu komponentu insolacije $\overline{I_{DH}}$. Ukupna srednja horizontalna insolacija je [4, 105]:

$$\overline{I_H} = \overline{I_{DH}} + \overline{I_{BH}} \quad (3.21).$$

Za proračun komponenti ukupne horizontalne iradijacije neophodno je prvo proračunati faktor vedrine (faktor čistoće atmosfere) K_T koji se definiše kao odnos prosečne ukupne horizontalne insolacije na površini Zemlje i odgovarajuće insolacije ekstraterestričkog zračenja na površini atmosfere na geografskoj širini i dužini koja odgovara mestu merenja:

$$K_T = \frac{\overline{I_H}}{\overline{I_0}} \quad (3.22).$$

Ako je faktor vedrine veliki, to znači da je nebo vedro i da će većina ukupnog zračenja biti direktno zračenje. U slučaju da je faktor vedrine mali, to znači da je nebo oblačno i da će značajan deo zračenja biti difuziono zračenje.

Srednja dnevna insolacija ekstraterestričkog zračenja na horizontalnu površinu se može izračunati integraljenjem ukupnog ekstraterestričkog zračenja od izlaska do zalaska Sunca i njegovom projekcijom na horizontalnu površinu. Kao rezultat se dobija sledeća relacija:

$$\bar{I}_0 = \left(\frac{24}{\pi}\right) SC \left[1 + 0.034 \cdot \cos\left(\frac{360n}{365}\right)\right] (\cos L \cos \delta \sin H_{SR} + H_{SR} \sin L \sin \delta) \quad (3.23)$$

gde su: $SC = 1367 \text{ W/m}^2$ - solarna konstanta, L - geografska širina, δ - ugao deklinacije, H_{SR} - satni ugao izlazećeg Sunca.

Satni ugao izlazećeg Sunca se određuje prema izrazu:

$$H_{SR} = \cos^{-1}(-\tan L \cdot \tan \delta) \quad (3.24).$$

Srednji mesečni faktor vedrine K_T se dobija tako što se izračuna za svaki dan u posmatranom mesecu pa se dobijene vrednosti usrednje ili se \bar{I}_0 izračuna za centralni dan u mesecu i uzima se kao referentni dan za ceo mesec, pa se prema njemu proračunava srednji mesečni faktor K_T . Za slučaj da se računa srednji mesečni faktor vedrine K_T , može se primeniti *Liu-Jourdan*-ova formula za dekompoziciju ukupne horizontalne komponente insolacije na direktnu i difuzionu horizontalnu komponentu insolacije:

$$\frac{\overline{I_{DH}}}{\overline{I_H}} = 1.390 - 4.027K_T + 5.51K_T^2 - 3.108K_T^3 \quad (3.25).$$

Na osnovu poznate difuzione horizontalne insolacije, može se odrediti direktna horizontalna insolacija prema sledećem izrazu:

$$\overline{I_{BH}} = \overline{I_H} - \overline{I_{DH}} \quad (3.26).$$

Ukupna difuziona i reflektovana insolacija koja padne na fotonaponski panel koji je postavljen pod nagibnim uglom Σ u odnosu na horizontalnu površinu, može se izračunati prema sledećim izrazima:

$$\begin{aligned} \overline{I_{DC}} &= \overline{I_{DH}} \left(\frac{1+\cos\Sigma}{2}\right) \\ \overline{I_{RC}} &= \overline{I_{DH}} \left(\frac{1-\cos\Sigma}{2}\right) \end{aligned} \quad (3.27).$$

Direktna komponenta zračenja koja pada na panel zavisi od incidentnog ugla θ upadnog zračenja na panel koji pored orijentacije panela Φ_C i nagiba panela Σ , zavisi i od altitudnog ugla Sunca β i azimutnog ugla Sunca Φ_S .

Kombinovanjem izraza za direktnu horizontalnu komponentu iradijacije (3.13) i izraza za direktnu komponentu iradijacije koja pada na panel (3.11) dobija se veza između horizontalne komponente direktne iradijacije i direktne komponente iradijacije na površini panela:

$$I_{BC} = I_{BH} \cdot \left(\frac{\cos \theta}{\sin \beta} \right) = I_{BH} \cdot R_B \quad (3.28).$$

Koeficijent R_B se naziva faktor kosine. U slučaju da postoji samo informacija o srednjoj mesečnoj ili dnevnoj vrednosti horizontalne iradijacije, onda je potrebno izračunati srednju vrednost faktora kosine. Prema *Liu-Jourdan*-ovoj metodi za južno orijentisani panel srednji faktor kosine se može odrediti pomoću sledećeg izraza:

$$\overline{R_B} = \frac{\cos(L-\Sigma) \cos \delta \sin H_{SRC} + H_{SRC} \sin(L-\Sigma) \sin \delta}{\cos L \cos \delta \sin H_{SR} + H_{SR} \sin L \sin \delta} \quad (3.29)$$

gde su: L - geografska širina na kojoj je panel postavljen, δ - srednji ugao deklinacije za posmatrani mesec, Σ - nagibni ugao panela H_{SR} - satni ugao izlazećeg Sunca.

Satni ugao pri prvom obasjavanju panela u slučaju da je $\theta = 90^\circ$, može se izračunati pomoću izraza:

$$H_{SRC} = \min\{\cos^{-1}(-\tan L \cdot \tan \delta), \cos^{-1}(-\tan(L - \Sigma) \cdot \tan \delta)\} \quad (3.30).$$

Sada je ukupna srednja insolacija na površini fotonaponskog panela:

$$\overline{I_C} = \overline{I_H} \left(1 - \frac{\overline{I_{DH}}}{\overline{I_H}} \right) \cdot \overline{R_B} + \overline{I_{DH}} \left(\frac{1+\cos \Sigma}{2} \right) + \rho \overline{I_H} \left(\frac{1-\cos \Sigma}{2} \right) \quad (3.31).$$

4. UTICAJ VREMENSKOG PROFILA PROIZVODNJE FOTONAPONSKIH PANELA NA EKONOMIČNOST FOTONAPONSKIH PANELA

Danas je tehnologija OIE prepoznata kao tehnologija koja može značajno da doprinese rešavanju problema energetike 21.veka, kao i smanjenju emisije CO₂ iz fosilnih goriva [32]. Evropska Unija je kroz niz pravila i propisa postavila za cilj učešće energije iz OIE od 20% u ukupnoj potrošnji energije do 2020. godine [5]. U okviru različitih tehnologija OIE, fotonaponski sistemi danas privlače veliku pažnju zbog svog potencijala da doprinesu što većem udelu OIE u budućnosti [11], pa je tako u zemljama Evropske Unije instalacija fotonaponskih sistema je značajno porasla od 2005. godine, kao što je i prikazano u literaturi [25].

Pri postojećim tržišnim uslovima troškovi proizvodnje električne energije u fotonaponskim sistemima su i dalje značajno veći od troškova proizvodnje u konvencionalnim elektranama, pogotovu, što troškovi proizvodnje električne energije još uvek ne obuhvataju eksterne troškove [33]. Eksterni troškovi će značajno opteretiti pre svega troškove proizvodnje električne energije u konvencionalnim elektranama, čime će se steći uslovi da OIE postanu konkurentni na slobodnom tržištu električne energije.

U cilju podsticanja i motivisanja proizvodnje električne energije iz fotonaponskih sistema, kao i razvoja samog sektora fotonaponskih sistema [25, 34] danas je politika OIE implementirana kroz različite mehanizme podrške. Neki od mehanizama podrške, su predstavljeni u literaturi [28, 35, 36, 37].

Sredstva za stimulaciju se mogu dobiti na više različitih načina, a neki od njih su: dobijanje sredstava za stimulaciju direktnom podrškom (novčanom ili kroz poreske olakšice), dobijanje sredstava putem premija koje moraju da plaćaju proizvođači neobnovljive energije kao vrstu odštete zbog zagađivanja i dobijanje sredstava preko povraćaja cene električne energije čime se troškovi stimulanja prebacuju na krajnje potrošače [38]. U zemljama Evropske Unije postoji više modela preko kojih se mehanizmi podrške realizuju, pri čemu je *Feed-in Tariff* (FIT) sistem koji je najrasprostranjeniji i najčešće primenjivan podsticajni program [39].

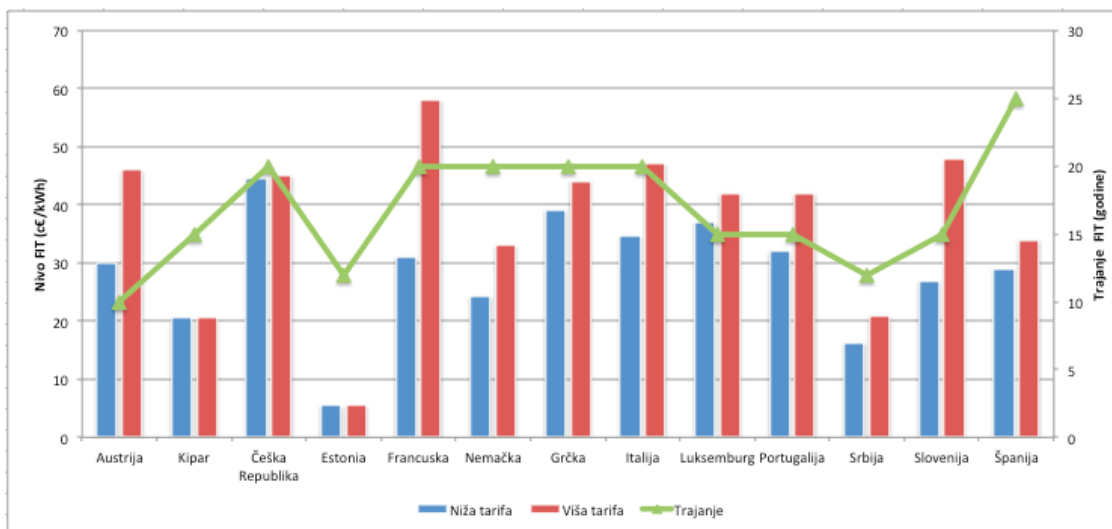
FIT je pravno-ekonomski mehanizam, koji je konstruisan da promoviše integraciju OIE u elektroenergetski sistem. Osnovne garancije koje ovaj mehanizam podrške pruža investitorima su [1, 7, 56]:

1. garantovano povezivanje na elektroenergetsku mrežu,
2. dugoročni ugovori za garantovani otkup proizvedene energije,
3. garantovane, tj. fiksne cene određene na osnovu realnih troškova.

Na ovaj način vrednost izlazne energije zavisi od garantovane cene i proizvedene energije, a ne od tržišta i tržišnih cena, pri čemu je svaka elektroprivreda u obavezi da otkupi proizvedenu električnu energiju iz OIE po fiksnoj ceni. Dosadašnja praksa u zemljama Evropske Unije je pokazala da mehanizam FIT predstavlja najuspešniji okvir za razvoj OIE, pa su tako Vlade Republike Nemačke i Kraljevine Španije uspešnom primenom FIT inicirale značajan razvoj i porast instalisanih fotonaponskih sistema [40, 41, 42].

U zemljama Evropske Unije uvedene su različite tarife za različite vrste OIE. FIT program se trenutno, kao glavna podsticajna mera za proizvodnju električne energije iz OIE, primenjuje u 20 od 27 zemalja članica Evropske Unije. Na slici 4.1. prikazan je primer nivoa subvencionisanih cena električne energije proizvedene u fotonaponskim sistemima i primer dužine trajanja FIT programa za fotonaponske sisteme u nekoliko evropskih zemalja [25, 35, 37, 43], uključujući i Republiku Srbiju u periodu od 2009. do 2012. godine.

U nekim zemljama nivo podrške nije fiksna, već se menja. Nizak nivo podrške za fotonaponske sisteme se sa slike 4.1. može uočiti u severnim zemljama, a razlog tome je vrlo nizak nivo Sunčeve insolacije u tim zemljama, pa je tako u Estoniji FIT samo 5.42 € Cent / kWh. U Italiji je visoki nivo podrške koji se kreće od 34.6 do 47.0 € Cent/kWh i u kombinaciji sa povoljnom insolacijom obezbeđuje izvanredne uslove za primenu fotonaponske tehnologije [43]. Često se koriste različiti tarifni nivoi podrške za fotonaponske sisteme instalisane na objektima, integrisane u fasade zgrade i instalisane na zemlji. Takođe se uočava da neke zemlje, poput Austrije, Nemačke, Italije, Luksemburga, Portugalije, Slovenije i Španije imaju različite tarifne nivoe podrške u zavisnosti od instalisanog kapaciteta fotonaponskog sistema. U Grčkoj se tarifni nivo razlikuju na kopnu i autonomnim ostrvima [43].



Slika 4.1. Primer nivoa i trajanja FIT za fotonaponske sisteme u nekoliko evropskih zemalja

Fiksni period u kome se, prema sistemu FIT, garantuje cena i plasman proizvedene električne energije u fotonaponskim elektranama za većinu zemalja iz Evropske Unije je od 10 do 25 godina [43]. Ovaj period je znatno kraći od vremena trajanja životnog veka fotonaponskog sistema, koji je obično projektovan na 25 do 35 godina. Može se zaključiti da će nakon isteka perioda garantovanih cena, u ovom slučaju prema sistemu FIT, fotonaponski sistemi će plasirati proizvedenu električnu energiju na slobodnom tržištu, gde se cene električne energije formiraju svakog sata zavisno od ponude i potražnje, prema principu ponude za dan unapred. Slobodno tržište električne energije funkcioniše isto kao i sva druga slobodna tržišta, tako da su sezonske i dnevne varijacije cena na tržištu praktično diktirane dijagramom potrošnje električne energije, odnosno njenom potražnjom. Cene električne energije na slobodnom tržištu uglavnom prate dijagram potrošnje i one mogu da variraju u roku od jednog dana u poređenju sa odgovarajućom prosečnom dnevnom cenom [42, 44].

Profil proizvodnje električne energije iz fotonaponskih sistema je u velikoj meri predvidiv, ali se ne može u potpunosti planirati jer nju diktira smena dana i noći, kao i postojanje oblačnosti.

Pored promene solarne iradijacije, proizvodnja fotonaponskih panela zavisi i od temperature, pa je i ovaj efekat bitan za procenu proizvodnje tog panela.

U cilju procenjivanja prosečne godišnje proizvodnje fotonaponskog sistema potrebno je analizirati tipičan dnevni vremenski dijagram očekivane snage fotonaponskog sistema za ciljani region, odnosno lokaciju.

Procena indeksa korelisanosti se može primeniti kod svih intermitentnih izvora energije. U cilju procene ekonomičnosti proizvodnje fotonaponskog sistema u uslovima slobodnog tržišta, neophodno je proceniti indeks korelisanosti između prosečnog vremenskog dijagrama proizvodnje fotonaponskog sistema i prosečnog dijagrama cene električne energije na slobodnom tržištu. Ovaj indeks može poslužiti u evaluaciji ekonomskih pokazatelja projekta fotonaponske elektrane, koja će u toku svog životnog veka raditi jedan deo vremena u uslovima slobodnog tržišta.

Za procenu ekonomičnosti projekta fotonaponskog sistema, jedan od ključnih elemenata je procena bruto prihoda u toku njegovog projektovanog životnog veka. Da bi se procenio bruto prihod neophodno je poznavati očekivanu godišnju proizvodnju (*Annual Electricity Production - AEP*) za prosečnu godinu u toku životnog veka i cenu električne energije po proizvedenom MWh.

Pretpostavlja se da u toku projektovanog životnog veka od N_{LT} godina fotonaponska elektrana radi N_{FIT} godina sa subvencijama po modelu FIT i $N_{OM} = N_{LT} - N_{FIT}$ godina na slobodnom tržištu bez subvencija. Ukupan bruto prihod u toku projektovanog životnog veka fotonaponskog sistema je [45, 56]:

$$W_{LT} = W_{FIT} + W_{OM} \quad (4.1)$$

gde su: W_{FIT} - ukupni bruto prihod u toku garantovanog perioda FIT (N_{FIT}) i W_{OM} - ukupni bruto prihod u toku perioda bez subvencija (N_{OM}).

4.1. Model za valorizaciju električne energije proizvedene u fotonaponskim elektranama u uslovima slobodnog tržišta

U ovom poglavlju je predstavljen matematički model za procenu kvantifikatora za valorizaciju električne energije proizvedene u fotonaponskim elektranama u uslovima slobodnog tržišta i to kroz korelacionu analizu tipičnih dijagrama proizvodnje fotonaponskih elektrana i dijagrama cene električne energije na berzi.

Veoma važan element pri proceni ekonomskih parametara projekta fotonaponske elektrane je procena bruto prihoda tokom projektovanog životnog veka fotonaponske elektrane. U skladu sa tim, prosečni godišnji bruto prihod fotonaponske elektrane u uslovima slobodnog tržišta se može definisati sledećom relacijom:

$$W = \mu \cdot P_{OMavg} \cdot AEP \cdot C_{PVPM} \quad (4.2)$$

gde su: $W \left(\frac{\text{Euro}}{\text{god}} \right)$ - procenjen prosečni godišnji bruto prihod fotonaponske elektrane, $P_{OMavg} \left(\frac{\text{Euro}}{\text{MWh}} \right)$ - očekivana srednja godišnja cena električne energije na tržištu električne energije,

AEP (MWh) - godišnja proizvodnja fotonaponske elektrane za prosečnu godinu,

C_{PVPM} - indeks korelisanosti između vremenskih dijagrama cene električne energije na berzi i vremenskog dijagrama proizvodnje fotonaponske elektrane,

μ - redukcionni koeficijent.

Vrednost redukcionog koeficijenta μ zavisi od kvaliteta prognoze proizvodnje i kvaliteta prognoze satnih cena električne energije na berzi, pri čemu je uvek $\mu < 1$.

C_{PVPM} je indeks korelisanosti između vremenskih dijagrama promene cene električne energije na berzi električne energije i vremenskog dijagrama proizvodnje fotonaponske elektrane. Ovaj indeks korelisanosti je jedinstven parametar za svaku fotonaponsku elektranu na slobodnom tržištu.

Procenjena vrednost indeksa korelisanosti se može odrediti na osnovu dostupnih podataka o satnoj solarnoj iradijaciji za željenu lokaciju u periodu od najmanje godinu dana i na osnovu istorijskih podataka o cenama električne energije na tržištu električne energije na kom je i namera da se proizvedena električna energija plasira. Sledećom relacijom se može odrediti kvantitativna procena ovog indeksa:

$$C_{PVPM} = \frac{1}{24} \frac{\sum_{j=1}^{24} E_j \cdot P_{OMj}}{E_{avg} \cdot P_{OMavg}} = \frac{1}{24} \sum_{j=1}^{24} e_j \cdot p_{OMj} \quad (4.3)$$

gde su:

E_j - prosečna satna proizvodnja električne energije fotonaponske elektrane u j-tom satu prosečnog dana,

E_{avg} - proizvodnja električne energije (MWh) fotonaponske elektrane za prosečan dan,

P_{OMj} - cena proizvedenog MWh na tržištu električne energije za odgovarajući j-ti sat prosečnog dana,

P_{OMavg} - očekivana srednja cena električne energije na tržištu električne energije.

Vrednosti $e_j = \frac{E_j}{E_{avg}}$ i $p_{OMj} = \frac{P_{OMj}}{P_{OMavg}}$ su odgovarajuće normalizovane vrednosti E_j i P_{OMavg} , respektivno.

Prethodna jednačina (4.3) daje definiciju praktičnog matematičkog izraza indeksa korelisanosti. Ova jednačina koja se koristi za procenu indeksa korelisanosti, može se primeniti na sve intermitentne izvore električne energije. U literaturi [45] je analiziran indeks korelisanosti vetroelektrane. Za razliku od vetroelektrana, disperzibilnost vremenskog dijagrama fotonaponske elektrane je značajno manja.

Radi implementacije matematičkog modela za procenu indeksa korelisanosti C_{PVPM} , neophodno je poznavati profil proizvodnje fotonaponske elektrane e_j , kao i profil cena električne energije na slobodnom tržištu električne energije p_{OMj} .

4.2. Procena vremenskog dijagrama proizvodnje fotonaponske elektrane

Profil proizvodnje električne energije iz fotonaponske elektrane je uglavnom predvidiv, ali se ne može u potpunosti planirati. Promene na dnevnom i godišnjem nivou uzrokuju varijacije nivoa solarne iradijacije na željenoj lokaciji fotonaponske elektrane [46]. Profil proizvodnje fotonaponske elektrane će u najvećoj meri zavisti od doba dana, geografske lokacije, oblačnosti, kao i od temperature ambijenta. Profil proizvodnje fotonaponske elektrane će takođe zavisiti i od azimutnih i altitudnih uglova fotonaponskih panela.

Procena dijagrama proizvodnje fotonaponske elektrane vrši se na osnovu merenja solarne iradijacije i temperature ambijenta. Snaga koju fotonaponski panel injektira u distributivnu mrežu (E_j) svakog sata u toku prosečnog dana je procenjena u skladu sa sledećom relacijom [4]:

$$E_j = \eta_{inv} E_{PVSTC} \frac{I_{PVj}}{I_{STC}} \cdot \left(1 + \alpha_{TPV} (T_{PVj} - T_{STC}) \right) = \eta_{inv} E_{PVSTC} \frac{I_{PVe qj}}{I_{STC}} \quad (4.4)$$

gde su:

E_{PVSTC} - deklarirana snaga fotonaponskog panela pri standardnim test uslovima (*Standard Test Conditions - STC*),

I_{PVj} - prosečna solarne iradijacija na površini fotonaponskog panela u j -tom satu za prosečan dan,

I_{STC} - solarne iradijacija koja odgovara standardnim test uslovima (*Standard Test Conditions - STC*) i iznosi $I_{STC} = 1000 \text{ W/m}^2$,

$I_{PVe qj}$ - ekvivalentna solarne iradijacija za j -ti sat prosečnog dana,

η_{inv} - stepen iskorišćenja odnosno efikasnost invertora,

α_{TPV} - temperaturni koeficijent promene snage fotonaponskih panela, tipično iznosi

$\alpha_{TPV} = - 0.5 \text{ \%/}^\circ\text{C}$,

T_{STC} - temperatura panela pri standardnim test uslovima (*Standard Test Conditions - STC*) i iznosi $T_{STC} = 25^{\circ}\text{C}$,

T_{PVj} - prosečna temperatura fotonaponskog panela u j -tom satu prosečnog dana, koja je estimirana prema sledećoj relaciji:

$$T_{PVj} = T_{ambj} + \left(\frac{NOCT-20}{800} \right) \cdot I_{PVj} \quad (4.5)$$

gde su:

T_{ambj} - izmerena prosečna temperatura ambijenta u j -tom satu prosečnog dana,

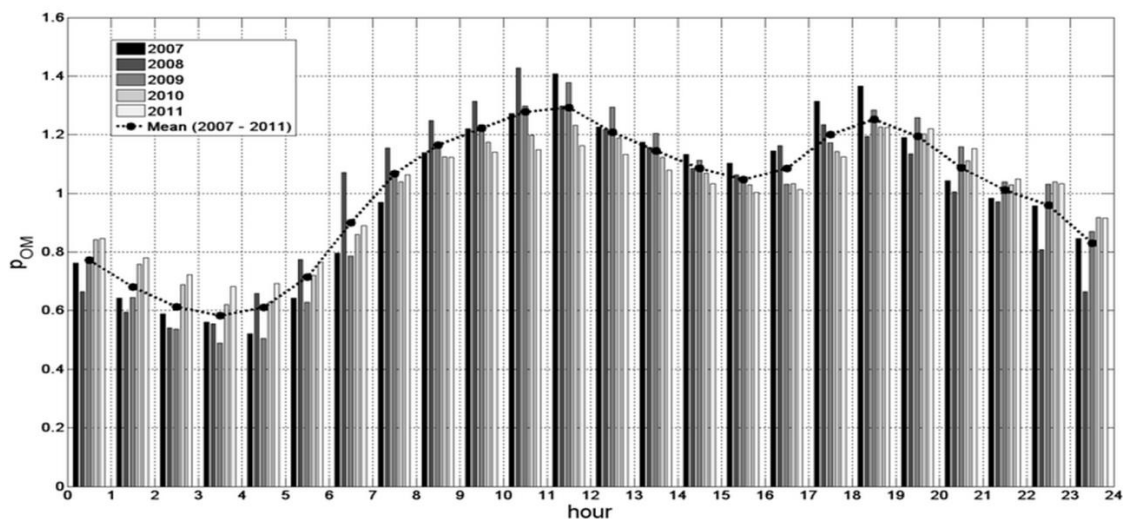
NOCT (*Normal Operation Cell Temperature*) - temperatura fotonaponskog modula kada je temperaturu ambijenta 20°C , solarna iradijacija 800 W/m^2 i brzina vetra 1 m/s . Parametar *NOCT* pri normalnim uslovima eksploatacije dobija se od proizvođača fotonaponskih panela.

4.3. Vremenski dijagrami cena električne energije na tržištu električne energije

Cena električne energije na tržištu električne energije se obično definišu na satnom nivou na osnovu ponude i potražnje, prema principu ponude za dan unapred (*day-ahead auction*). Dnevne promene satnih cena uglavnom prate promenu dnevnog dijagrama potrošnje. Ova činjenica je prikazana u radu [47] kroz uporednu analizu srednjih satnih cena na aukcijama Španije (*The Spanish Electricity Market - OMEL*) i Nemačke (*The German Electricity Market- EEX*) i odgovarajućih satnih dijagrama potrošnje za Španiju i Nemačku. Pored strukture potrošnje, na dnevni dijagram utiče i struktura proizvodnje.

U poslednjih nekoliko godina sve veće prisustvo intermitentnih OIE, pogotovu fotonaponskih elektrana, značajno utiče na profil cene električne energije na nekim tržištima u regionima sa značajnim instalisanim kapacitetima OIE. Ovi efekti su analizirani u radovima [48-51].

Na slici 4.2. su prikazane srednje normalizovane satne cene električne energije na nemačkoj berzi *EEX* (*European Energy Exchange AG*) za prosečan dan za svaku godinu u periodu od 2007. do 2011. godine [52]. Na osnovu srednjih dnevnih dijagrama, odgovarajući srednji normalizovani dnevni dijagram u toku perioda od nekoliko godina je generisan.



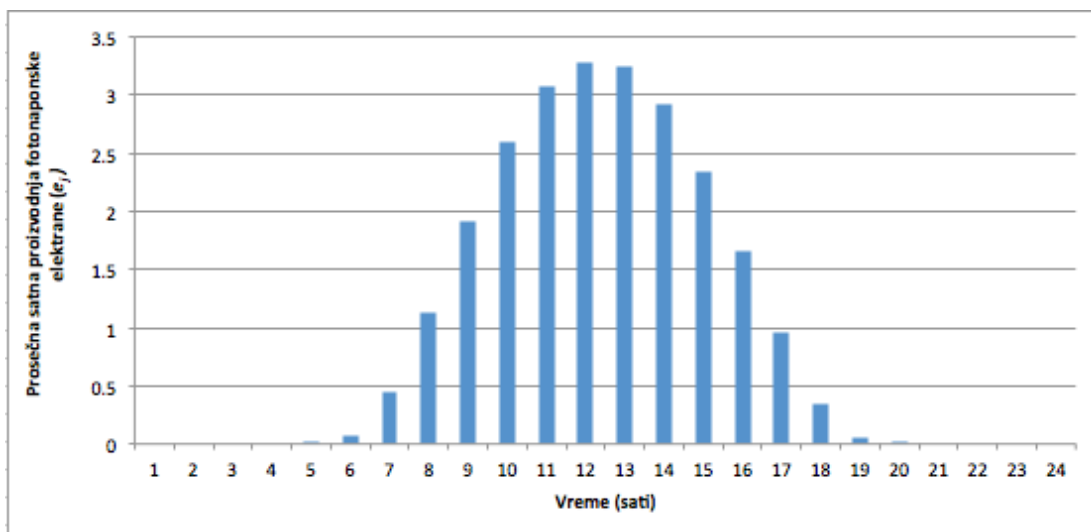
Slika 4.2. Srednje normalizovane satne cene električne energije na nemačkoj berzi *EEX* za svaku godinu u periodu od 2007. do 2011. [45]

U vršnim satima električna energija je u proseku skuplja oko 30% u odnosu na prosečnu cenu, dok je u satima minimalnog opterećenja ona jeftinija za prosečan dan i do 40%. Može se zaključiti da će fotonaponske elektrane na slobodnom tržištu ostvarivati veći prihod po proizvedenom MWh u uslovima slobodnog tržišta u odnosu na prosečnu dnevnu cenu električne energije, jer je cena električne energije u toku obdanice veća od prosečne. Kvantitativna evaluacija ovog efekta je sadržana u indeksu korelisanosti C_{PVPM} koji je definisan matematičkom relacijom (4.3).

4.4. Primer proračuna indeksa korelisanosti fotonaponske elektrane

Kao primer uzeta je i predstavljena studija slučaja za projekat Bavanište u Srbiji. Indeks korelisanosti za buduću fotonaponsku elektranu na lokaciji Bavanište je proračunat i analiziran u ovom primeru. Bavanište je mesto u južnom Banatu na teritoriji opštine Kovin, u južnobanatskom okrugu u Vojvodini. Tokom razvoja projekta vetroelektrane „*Bavaništansko polje*” projektovane nazivne snage 188 MW [53], na ovoj lokaciji, izvršena su jednogodišnja merenja solarnog potencijala i potencijala vetra tokom 2009. godine radi buduće fotonaponske elektrane. U realizaciji jednogodišnjih merenja solarne insolacije korišćen je *Li-Cor* piranometar, dok je merenje temperature ambijenta vršeno pomoću *NRG # 110S* termometra. Na osnovu raspoloživih desetominutnih merenja prosečne vrednosti solarne iradijacije i temperature vazduha na ovoj lokaciji, proračunata je prosečna satna proizvodnja fotonaponskih panela na istoj lokaciji.

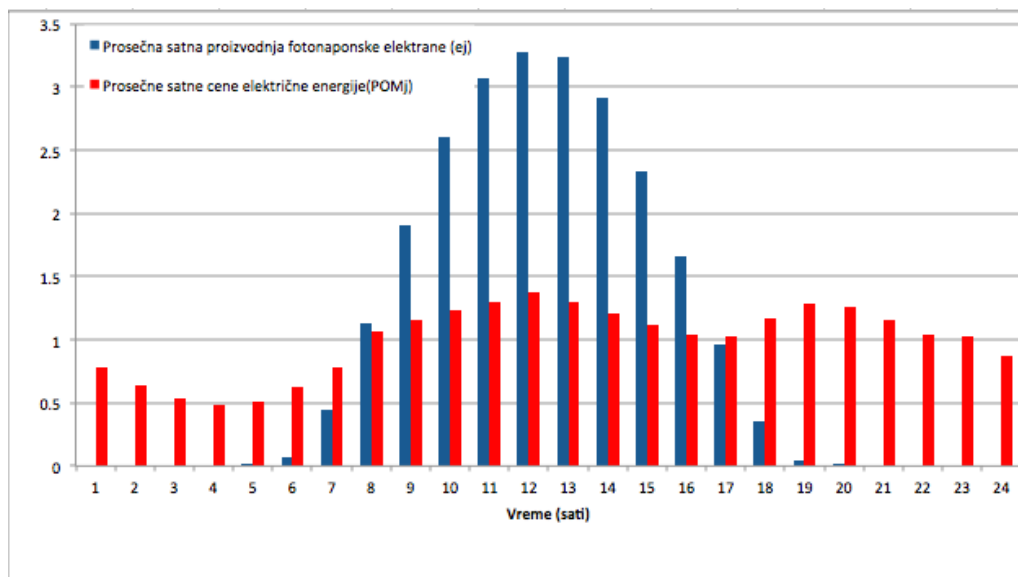
Na osnovu jednogodišnjih merenja na lokaciji buduće fotonaponske elektrane u Bavaništu i opisane metodologije u odeljku 4.2, procenjen je dnevni profil proizvodnje fotonaponske elektrane. Na slici 4.3. je prikazan estimirani prosečni normalizovan satni dijagram proizvodnje buduće fotonaponske elektrane za prosečan dan u 2009. godini.



Slika 4.3. Estimirane normalizovane prosečne vrednosti proizvodnje buduće fotonaponske elektrane u Bavaništu za prosečan dan u toku 2009. godine

Na slici 4.4. su istovremeno prikazani normalizovani prosečni satni dijagram pretpostavljene fotonaponske elektrane u Bavaništu i normalizovane prosečne satne cene električne energije na nemačkoj berzi *EEX* za jedan prosečan dan u toku 2009. godine. Na osnovu raspoloživih prosečnih satnih cena električne energije tokom 2009. godine, što je i opisano u poglavlju 4.3, dobijene su normalizovane prosečne satne cene električne energije.

Slika 4.4. predstavlja komparativni dijagram normalizovanog satnog dijagrama procenjene proizvodnje buduće fotonaponske elektrane u Bavaništu i normalizovanih prosečnih satnih cena električne energije na *EEX* berzi za jedan prosečan dan u toku 2009. godine.



Slika 4.4. Procenjena normalizovana prosečna satna proizvodnja buduće fotonaponske elektrane u Bavaništu i normalizovane satne cene električne energije na *EEX* berzi za prosečan dan u 2009. godini

Analizirajući uporedni dijagram koji je prikazan na slici 4.4, može se zaključiti da je korelacija između prosečne dnevne varijacije proizvodnje buduće fotonaponske elektrane u Bavaništu i prosečne dnevne varijacije cena električne energije na *EEX* berzi izuzetno dobra.

Na osnovu relacije (4.3), može se izračunati srednji dnevni indeks korelisanosti za buduću fotonaponsku elektranu u Bavaništu i on iznosi $C_{PVPM}=1.2082$. Procenjena vrednost indeksa korelisanosti C_{PVPM} pokazuje da će svaki proizveden MWh u budućoj fotonaponskoj elektrani u Bavaništu postići cenu na *EEX* berzi koja je u proseku 20.8% viša u odnosu na prosečnu godišnju cenu MWh. Ovo je značajna komparativna prednost fotonaponskih elektrana u odnosu na druge vrste OIE, kao na primer u odnosu na vetroelektrane. Indeks korelisanosti proizvodnje vetroelektrane i profil cena električne energije na slobodnom tržištu je obično blizu 1, što je i pokazano u literaturi [45], gde je izračunat indeks korelisanosti za vetroelektranu u Bavaništu. To znači da MWh koji je proizveden u fotonaponskoj elektrani ima 20% veću cenu u poređenju sa MWh proizvedenim u vetroelektrani u uslovima slobodnog tržišta za analiziranu lokaciju. Pored toga, treba uzeti u obzir da je predikcija dnevne proizvodnje fotonaponske elektrane znatno bolja nego što je to slučaj sa vetroelektranom. Na osnovu ove činjenice može se izvesti zaključak da energija koja je proizvedena u fotonaponskoj elektrani ima znatno veću vrednost od energije proizvedene u vetroelektrani [54].

Prethodnu analizu je moguće izvršiti ne samo za nemačku berzu *EEX*, već za bilo koje drugo tržište na kom se električna energija proizvedena u fotonaponskoj elektrani plasira i prodaje, a zatim se može izračunati odgovarajući indeks korelisanosti. U uslovima slobodnog tržišta, moguće je prodavati energiju iz fotonaponske elektrane koja ima statističku korelaciju koja najbolje odgovara profilu proizvodnje te fotonaponske elektrane.

Prethodna analiza pokazuje da električna energija proizvedena u fotonaponskoj elektrani ima karakter vršne energije u dnevnom dijagramu potrošnje. Ova karakteristika, pored direktnih ekonomskih efekata, poseduje niz pozitivnih tehničkih efekata na elektroenergetski sistem i na samu distributivnu mrežu, prvenstveno u smislu smanjenja gubitaka, rasterećenja elemenata elektroenergetskog sistema čime se produžava njihov vek trajanja [54].

U perspektivi, svi izvori električne energije će biti podjednako tretirani na slobodnom tržištu električne energije. U takvim uslovima za ekonomičnost projekta fotonaponske elektrane pored godišnje proizvodnje električne energije, potrebno je voditi računa i o profilu dnevnog dijagrama proizvodnje, kao i o prosečnom vremenskom dijagramu cena električne energije.

Prikazana analiza predstavlja jako važan aspekt integracije fotonaponskih sistema u elektroenergetski sistem, kao i na tržište električne energije. Definisani indeks korelisanosti između prosečnog vremenskog dijagrama dnevnog profila cene električne energije na slobodnom tržištu i prosečnog dnevnog vremenskog dijagrama proizvodnje određene fotonaponske elektrane, može poslužiti kao kvantitativna mera uticaja dnevnog profila proizvodnje na ekonomičnost projekta fotonaponske elektrane u uslovima slobodnog tržišta.

Ovakve analize su izuzetno značajne radi pravilnog sagledavanja ekonomije i valorizacije proizvedene električne energije u fotonaponskoj elektrani, kao i u drugim intermitentnim izvorima električne energije na slobodnom tržištu električne energije.

5. OPTIMIZACIJA AZIMUTNOG I NAGIBNOG UGLA FOTONAPONSKIH PANELA UZ UVAŽAVANJE TRŽIŠNIH EFEKATA

Nagli porast broja instalisanih kapaciteta OIE u globalnom tradicionalnom elektroenergetskom sistemu stavio je sam sistem pred ogromne izazove [140, 141]. Takođe, porast instalisanog kapaciteta OIE priključenih na elektroenergetski sistem širom sveta, ima veliki uticaj i na profil cene električne energije na slobodnom tržištu električne energije [144].

Ekonomska predviđanja da će veliki procenat proizvodnje električne energije iz fotonaponskih elektrana, kao i iz svih ostalih OIE smanjiti cenu električne energije na slobodnom tržištu su opravdana. U literaturi je ovaj efekat poznat kao *merit-order* efekat [130, 132, 133].

U postojećim uslovima cenu električne energije na tržištu električne energije uglavnom definiše potrošnja, pa se tako maksimalna cena ostvaruje u popodnevnim časovima, što i odgovara proizvodnji fotonaponskih elektrana. Sa povećanjem učešća fotonaponskih elektrana ponuda električne energije u tradicionalno vršnim satima opterećenja postaje sve veća, što dovodi do pada cene vršne energije pri vedrim danima. Ovaj efekat analiziran je u literaturi [124, 125, 126].

Postojeća strategija pri projektovanju fotonaponskih elektrana je maksimizacija proizvodnje elektrane na godišnjem nivou. Ovakav pristup je motivisan podsticajnim merama, kao što je FIT, koje garantuju cenu proizvedene električne energije, a uglavnom ne vode računa o dinamici cena električne energije na tržištu. U perspektivi svi izvori će biti ravnopravni na tržištu električne energije. U takvim uslovima maksimizacija profita se ne mora poklapati sa maksimizacijom proizvodnje, jer će cena proizvedenog kWh zavisiti od aktuelne cene na tržištu električne energije. Maksimizacija profita za vlasnika fotonaponske elektrane će biti definisana optimizacijom ukupne proizvodnje fotonaponske elektrane i stepenom korelisanosti dijagrama proizvodnje i dijagrama cene električne energije na berzi električne energije.

Električna energija proizvedena iz fotonaponskih panela, je po svojoj prirodi fluktuirajućeg karaktera usled kretanja Sunca, te je samim tim i njena dostupnost tokom celog dana promenljiva [143].

Poznato je da je dijagram proizvodnje fotonaponskih panela definisan putanjom Sunca [123], kao i azimutnim i nagibnim uglom pod kojim je sam panel postavljen. Putanja Sunca uvažava sledeće aspekte: doba dana, geografsku lokaciju, nivo oblačnosti i ambijentalnu temperaturu. Fotonaponski paneli koji su južno orijentisani imaju maksimalnu proizvodnju u solarno podne, oni koji su orijentisani jugo-istočno maksimalnu snagu proizvodnje ostvaruju u prepodnevnom časovima, dok oni koji su orijentisani jugo-zapadno imaju maksimalnu snagu proizvodnje poslepodne. Tako na primer, za fotonaponski panel koji je orijentisan prema jugoistoku, u toku prepodneva u jednom trenutku će se azimutni ugao Sunca i azimutni ugao fotonaponskog panela poklopiti, iako solarna iradijacija u tom trenutku neće biti maksimalna. Kako dan bude odmicao, direktna i difuziona komponenta će rasti, ali će azimutni ugao biti nepovoljniji, pa će se maksimalna proizvodnja ponovo dostići u trenutku kada azimutni ugao Sunca bude bio između azimutnog ugla fotonaponskog panela i nule.

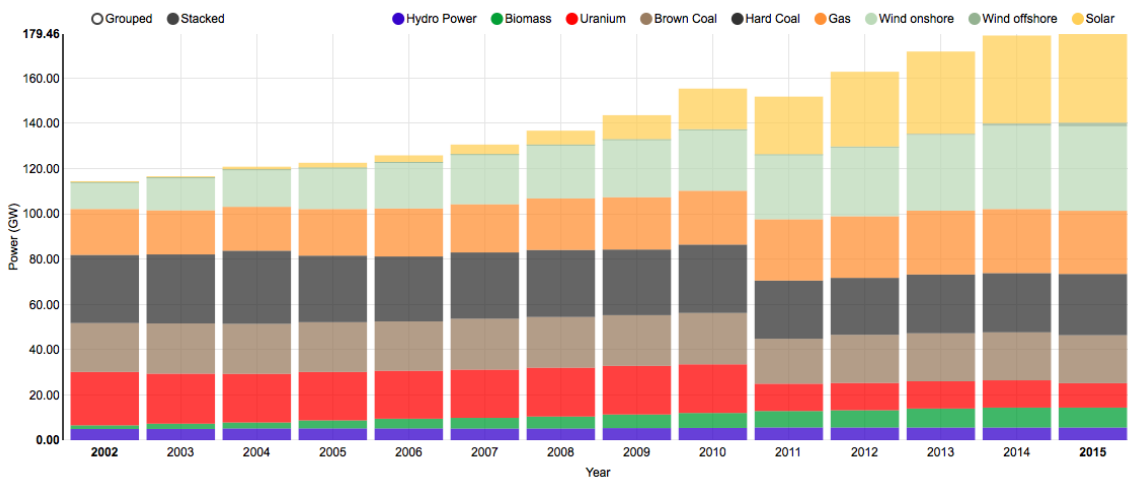
U cilju dostizanja optimuma proizvodnje fotonaponske elektrane u funkciji azimutnog i nagibnog ugla pod kojim je panel postavljen, mora se primeniti složenija optimizaciona tehnika. Neke od optimizacionih tehnika su izložene u literaturi [127, 135].

5.1. Primer proračuna optimalnog azimutnog i nagibnog ugla fotonaponskih panela uz uvažavanje tržišnih efekata

U ovom poglavlju je izvršena analiza uticaja prostorne orijentacije fotonaponskog panela u pogledu profita koji vlasnik fotonaponske elektrane ostvaruje na slobodnom tržištu električne energije. Analize su izvršene korišćenjem realnih mernih podataka o solarnoj iradijaciji i ambijentalnoj temperaturi za Beograd [136-137] i cena električne energije na nemačkoj berzi *EEX (European Energy Exchange AG)* i na evropskoj berzi *EPEX (European Power Exchange)* [52, 134] za 2009. i 2014. godinu.

Određeni su optimalni azimutni i nagibni uglovi fotonaponskog panela pri kojim se ostvaruje maksimalni profit na slobodnom tržištu električne energije.

Na slici 5.1. je prikazan instalisani kapacitet svih izvora električne energije od 2002. do 2015. godine u Nemačkoj.



Slika 5.1. Instalisani kapacitet izvora električne energije od 2002. do 2015. godine u Nemačkoj [131]

U 2009. godini udeo fotonaponskih sistema u ukupnom instalisanom kapacitetu je iznosio 7.36%, a u 2014. godini taj udeo je bio 21.86%. Posmatrajući sliku 5.1. primećuje se da je instalisani kapacitet fotonaponskih sistema drastično povećan u periodu od 2009. do 2015. godine i to skoro tri puta [131].

Proizvodnja električne energije iz konvencionalnih elektrana je velikim delom planska i može se prilagođavati zahtevima tržišta električne energije. Na ovaj način se ostvaruje najbolja cena za proizvedeni kWh. Proizvodnja električne energije u fotonaponskim elektranama je u velikoj meri predvidiva, ali se ne može u potpunosti planirati zbog stohastičke prirode ovog resursa. Proizvodnja u fotonaponskim elektranama je direktno zavisna i diktirana vremenskim dijagramom insolacije.

U 2009. godini u Nemačkoj je stepen uticaja fotonaponskih sistema na cenu električne energije na tržištu bio slab. Instalirani kapacitet fotonaponskih sistema bio je mali i nedovoljan da bi imao značajniji uticaj na cenu električne energije na tržištu. Cena električne energije prati dijagram potrošnje i ima maksimalnu vrednost u 12h kada je i proizvodnja iz fotonaponske elektrane maksimalna.

Profil proizvodnje fotonaponske elektrane zavisi od doba dana, geografske lokacije, nivoa oblačnosti, kao i od temperature ambijenta. U velikoj meri profil proizvodnje fotonaponske elektrane zavisi od azimutnog i nagibnog ugla pod kojim je sam panel postavljen.

Iz reference [136] preuzeti su podaci o ukupnoj srednjoj satnoj direktnoj i difuzionoj horizontalnoj komponenti solarne iradijacije, kao i o ambijentalnoj temperaturi za posmatranu lokaciju Beograd. Na osnovu relacije (5.1) izvršeni su proračuni solarne iradijacije u funkciji nagibnog i azimutnog ugla fotonaponskog panela:

$$I_C = I_B \cdot [\cos \beta \cdot \cos(\Phi_S - \Phi_C) \cdot \sin \Sigma + \sin \beta \cdot \cos \Sigma] + I_{DH} \cdot \left(\frac{1+\cos \Sigma}{2}\right) + \rho \cdot (I_B \cdot \sin \beta + I_{DH}) \cdot \left(\frac{1-\cos \Sigma}{2}\right) \quad (5.1).$$

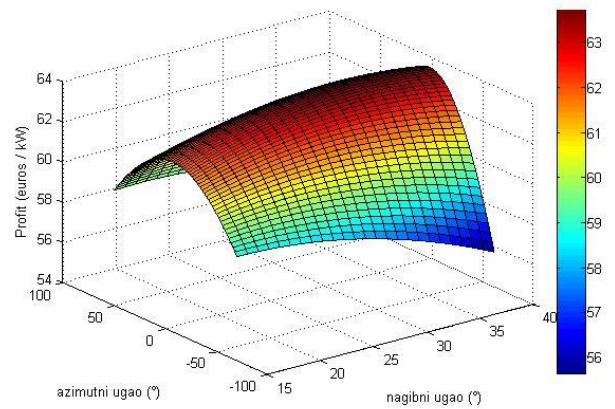
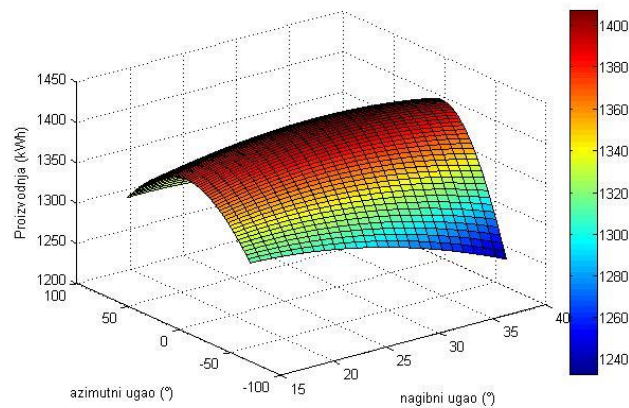
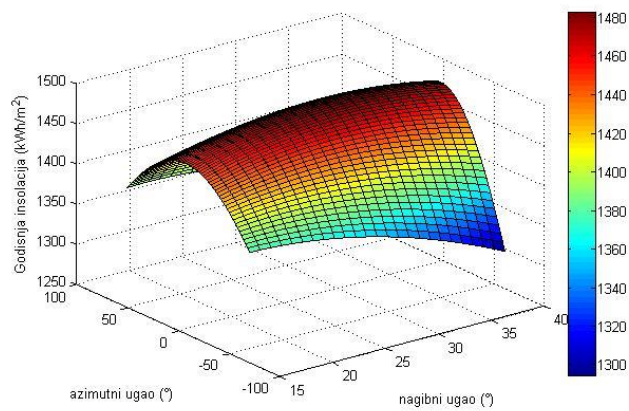
Procena dijagrama proizvodnje fotonaponske elektrane vrši se na osnovu merenja solarne iradijacije i temperature ambijenta, pa je tako na osnovu metodologije prikazane u poglavlju 4.2. izvršen proračun proizvodnje fotonaponske elektrane.

Korišćenjem podataka o ceni električne energije za svaki sat preuzetih sa nemačke berze *EEX* i evropske berze *EPEX* za 2009.-tu godinu [52, 134] i na osnovu proračuna satne proizvodnje fotonaponske elektrane proračunat je profit koji ostvaruje vlasnik fotonaponske elektrane na slobodnom tržištu pomoću sledeće relacije:

$$\sum_{j=1}^{8760} E_j \cdot C_j \quad (5.2)$$

gde su: E_j - prosečna satna proizvodnja električne energije fotonaponske elektrane u j -tom satu prosečnog dana, C_j - cena proizvedenog kWh za odgovarajući j -ti sat prosečnog dana.

Na osnovu opisanih proračuna, dobijeni su grafici prikazani na slici 5.2.



Slika 5.2. Insolacija na površini fotonaponskog panela, godišnja proizvodnja i profit u zavisnosti od azimutnog i nagibnog ugla fotonaponskog panela u 2009. godini

Grafici sa slike 5.2. pokazuju zavisnost proizvodnje fotonaponske elektrane i insolacije na površini fotonaponskog panela u funkciji od azimutnog i nagibnog ugla fotonaponskog panela. Za svaku vrednost azimutnog i nagibnog ugla fotonaponskog panela prikazana je procena profita koji ostvaruje vlasnik fotonaponske elektrane na tržištu u 2009. godini.

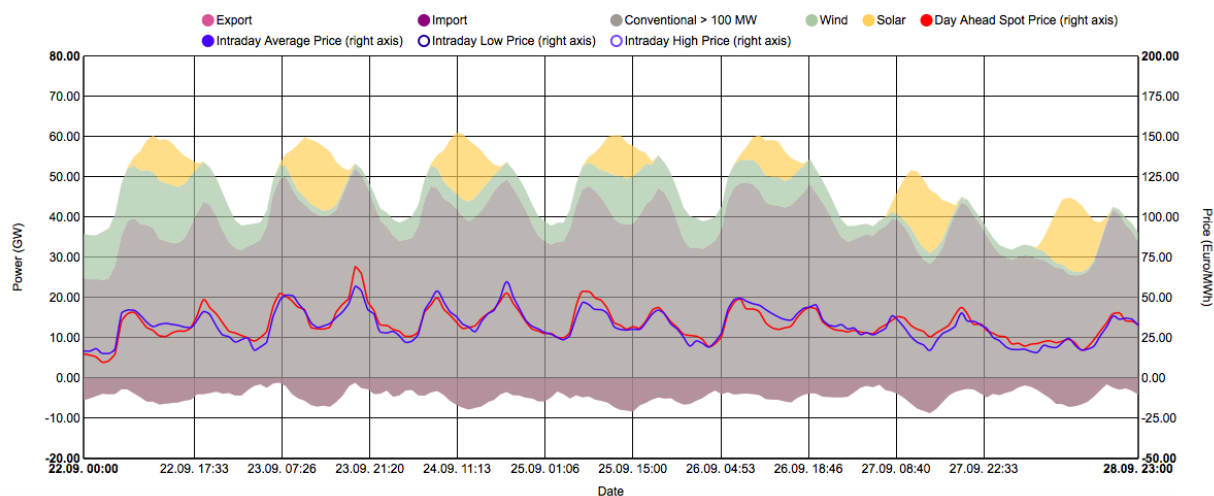
Dobijene vrednosti za maksimalnu insolaciju, maksimalnu proizvodnju fotonaponske elektrane i maksimalni profit koji ostvaruje vlasnik fotonaponske elektrane na slobodnom tržištu u 2009. godini su date u tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Maksimalna insolacija, proizvodnja i profit za 2009. godinu

Kriterijumska funkcija	Optimalni nagibni ugao	Optimalni azimutni ugao	Insolacija (kWh/m ²)	Proizvodnja (kWh)	Profit (euros/kW)
Maksimalna insolacija	30 ⁰	2 ⁰	1482.3	1406.7	63.65
Maksimalna proizvodnja	30 ⁰	3 ⁰	1482.3	1406.8	63.66
Maksimalni profit	33 ⁰	2 ⁰	1481.2	1405.8	63.69

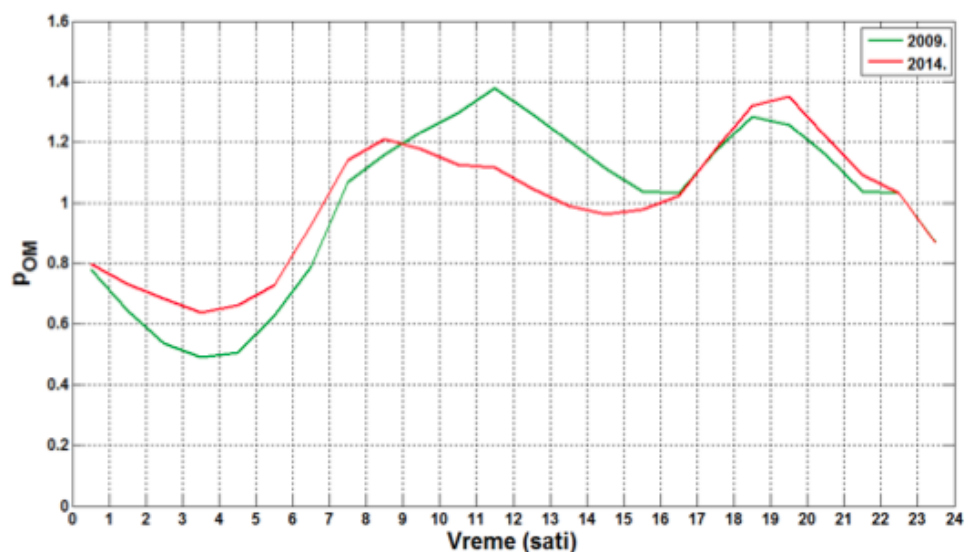
Maksimalni profit se ostvaruje pri nagibnom uglu od 33⁰ i azimutnom uglu od 2⁰, dok je maksimalna insolacija pri nagibnom uglu od 30⁰ i azimutnom uglu od 2⁰. Sve dobijene vrednosti iz tabele 5.1, kao i grafici sa slike 5.2, date su za 1kWp instalisane snage fotonaponskog panela. Za analizu su korišćeni fotonaponski moduli proizvođača *Panda*, model *Panda 60 Cell Series 2*. Geografske koordinate za Beograd su: N44⁰49'14" i E20⁰27'44". Kako se pod uticajem porasta temperature menjaju vrednosti napona, struje i snage, tipična promena ovih veličina za fotonaponske ćelije kod *Panda 60 Cell Series 2* tipa fotonaponskog modula su: $\Delta V_{OC} = -0.3\%/^{\circ}C$, $\Delta I_{SC} = 0.04\%/^{\circ}C$ i $\Delta P_{DCmax} = -0.42\%/^{\circ}C$. Prilikom proračuna uvažene su i sledeće karakteristike ovog fotonaponskog modula: $NOCT = 46^{\circ}C$ i koeficijent temperaturne promene efikasnosti - $0.488\%/^{\circ}C$.

U 2014. godini u Nemačkoj stepen uticaja fotonaponskih sistema na cenu električne energije postaje dominantniji, jer je instalisani kapacitet fotonaponskih sistema znatno povećan. Ovaj uticaj je ilustrovan na slici 5.3. [131]. Cena električne energije na tržištu prati dijagram proizvodnje iz termoelektrana. Ponuda električne energije u dnevnim vršnim satima opterećenja zbog sve većeg generisanja iz fotonaponskih elektrana, postaje sve veća, što dovodi do pada cene električne energije u vršnim dnevnim satima.



Slika 5.3. Proizvodnja električne energije i cene električne energije na tržištu u 39-toj nedelji 2014. godine [131]

Na slici 5.4. prikazani su uporedno normalizovani dijagrami cena električne energije na *EEX* berzi za prosečan dan u 2009. i 2014. godini. Na osnovu dijagrama se može utvrditi da je cena električne energije u popodnevnom satima značajno niža u toku 2014. godine u odnosu na 2009. godinu, dok je cena u večernjem maksimumu nešto veća. Ovo je direktna posledica instalacije fotonaponskih elektrana koje su sa jedne strane oborile cenu u vršnim satima proizvodnje, a sa druge strane povećale cenu u večernjim satima zbog povećanih troškova u termoelektranama. U novim tržišnim uslovima, odnosno pri novom profilu cene, maksimalna cena električne energije se postiže u jutarnjim, umesto u tradicionalnim podnevnim satima. Iz tog razloga se optimizacija azimutnog i nagibnog ugla fotonaponskog panela menja.



Slika 5.4. Normalizovani dijagrami cena električne energije na *EEX* berzi za prosečan dan u 2009. i 2014. godini

Korišćenjem podataka o satnoj ceni električne energije na nemačkoj berzi *EEX* i evropskoj berzi *EPEX* za 2014. godinu [52, 134], kao i na osnovu podataka o ukupnoj srednjoj satnoj direktnoj i difuzionoj horizontalnoj komponenti solarne iradijacije, kao i o ambijentalnoj temperaturi za Beograd preuzetih iz [136], dobijeni su grafici za solarnu insolaciju i proizvodnju u zavisnosti od azimutnog i nagibnog ugla fotonaponskog panela, kao i za maksimalni profit koji ostvaruje vlasnik fotonaponske elektrane. Podaci o ukupnoj srednjoj satnoj direktnoj i difuzionoj horizontalnoj komponenti solarne iradijacije i o ambijentalnoj temperaturi za Beograd preuzeti iz [136] su isti i za 2009. i za 2014. godinu.

Na osnovu već gore opisanih proračuna za 2009. godinu, dobijeni su grafici za proizvodnju fotonaponske elektrane, insolaciju i profit koji ostvaruje vlasnik fotonaponske elektrane u zavisnosti od azimutnog i nagibnog ugla fotonaponskog panela u 2014.-toj godini. Grafici su prikazani na slici 5.5. Dobijene vrednosti za maksimalnu insolaciju, maksimalnu proizvodnju fotonaponske elektrane i maksimalni profit koji ostvaruje vlasnik fotonaponske elektrane na slobodnom tržištu električne energije u 2014. godini su date u tabeli 5.2. Proračuni su vršeni za 1kW instalisane snage.

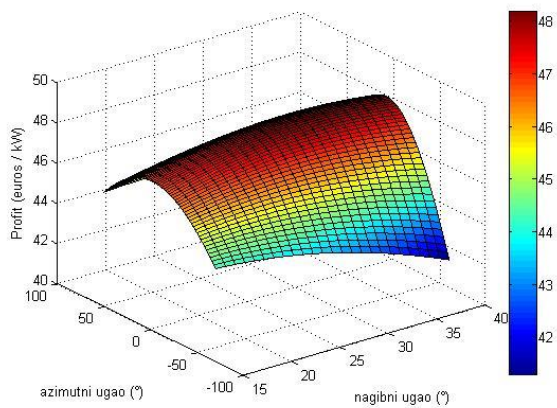
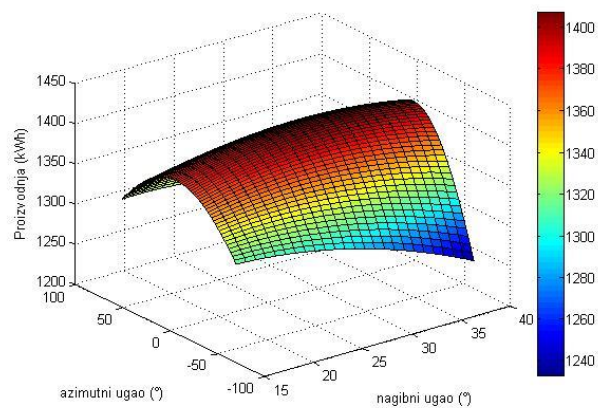
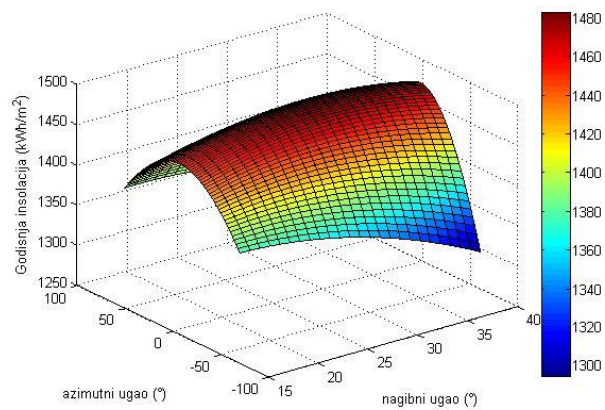
Tabela 5.2. Maksimalna insolacija, proizvodnja i profit za 2014. godinu

Kriterijumska funkcija	Optimalni nagibni ugao	Optimalni azimutni ugao	Insolacija (kWh/m ²)	Proizvodnja (kWh)	Profit (euros/kW)
Maksimalna insolacija	30 ⁰	2 ⁰	1482.3	1406.7	48.1
Maksimalna proizvodnja	30 ⁰	3 ⁰	1482.3	1406.8	48.13
Maksimalni profit	32 ⁰	8 ⁰	1480.8	1405.6	48.16

Maksimalna proizvodnja se ostvaruje pre 12h, a azimutni ugao fotonaponskog panela se u ovom slučaju povećava. Na taj način se smanjuje proizvodnja, ali se dovodi do vrednosti pri kojoj se ostvaruje maksimalna cena, čime se dobija i maksimalni profit. Maksimalni profit se ostvaruje pri nagibnom uglu od 32⁰ i azimutnom uglu od 8⁰, dok je maksimalna insolacija pri nagibnom uglu od 30⁰ i azimutnom uglu od 2⁰. Kada se uporede dobijeni rezultati iz 2009. i 2014. godine za insolaciju na godišnjem nivou dobija se da je dobitak u zaradi 0.12%.

Analizirajući dobijene rezultate može se zaključiti da se u ovakvim uslovima slobodnog tržišta maksimizacija profita neće poklapati sa maksimizacijom proizvodnje. Cena proizvedenog kWh direktno zavisi od aktuelne cene na tržištu električne energije, koje su bile veće 2009. godine u odnosu na 2014. godinu. Maksimizacija profita za vlasnika fotonaponske elektrane je definisana optimizacijom ukupne proizvodnje fotonaponske elektrane i stepenom korelisanosti dijagrama proizvodnje i dijagrama cene električne energije na tržištu električne energije. Prostornom orijentacijom fotonaponskih panela se može bitno uticati na vremenski dijagram snage koju generišu ovi izvori. Može se zaključiti da je izgradnja krovno integrisanih fotonaponskih sistema ekonomski opravdana i za krovove čiji azimutni ugao može biti bitno različit u odnosu na ugao pri kojem se postiže maksimalna proizvodnja.

Analiza prostorne orijentacije fotonaponskih panela može znatno pomoći prilikom planiranja i izrade strategije razvoja fotonaponskih elektrana i njihove izgradnje, čime bi se postigli što bolji efekti na sam elektroenergetski sistem.



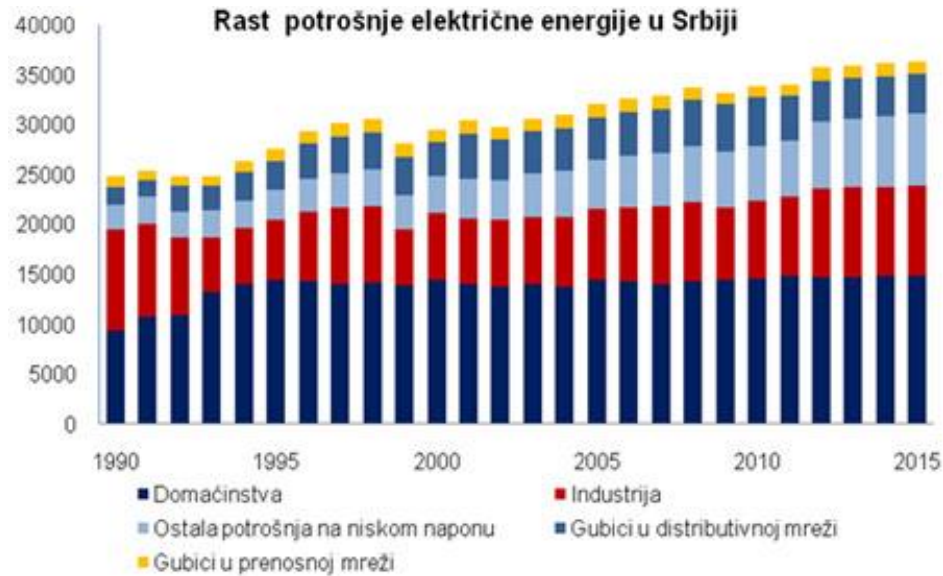
Slika 5.5. Insolacija na površini fotonaponskog panela, godišnja proizvodnja i profit u zavisnosti od azimutnog i nagibnog ugla fotonaponskog panela u 2014. godini

6. PROCENA EFEKATA DISPERZOVANIH FOTONAPONSKIH SISTEMA NA GUBITKE U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI

Elektroenergetski sistem predstavlja složen tehnički sistem za proizvodnju, prenos i distribuciju električne energije. Distributivna mreža, kao značajna komponenta elektroenergetskog sistema, predstavlja vezu između potrošnje i prenosnog podsistema. Zadatak distributivnih mreža je da obezbede sigurno, bezbedno, kvalitetno i ekonomično snabdevanje potrošača električnom energijom [57, 58].

Istorijski gledano, razvoj distributivnih mreža je pratio tradicionalni centralizovani koncept, pri čemu je proizvodnja centralizovana, a distributivna mreža u većini slučajeva ima radijalnu topologiju. Prilikom njene izgradnje nije bilo planirano priključenje distribuiranih izvora energije na nju. Tokovi snaga u distributivnim mrežama, bez distribuiranih izvora energije, su jednosmerni, odnosno teku u jednom smeru i to od mesta preuzimanja energije pa do potrošača. Priključenjem nekog distribuiranog izvora energije, dolazi do promene smerova tokova snaga, distributivni vodovi postaju dvostrano napajani, a distributivna mreža nije više pasivna već postaje aktivna [59-61, 122]. U uslovima jakog prisustva distribuirane proizvodnje u potpunosti se menjaju tokovi snaga, a ukupni gubici električne energije se uglavnom smanjuju, kao što je predstavljeno u literaturi [62-64].

Gubici električne energije u elektroenergetskim mrežama su nelinearna funkcija tokova snaga i za njihov proračun je neophodno poznavati profile potrošnje i proizvodnje, parametre mreže, kao i konfiguraciju same mreže. Problem velikih gubitaka električne energije u distributivnom sistemu je aktuelna problematika i sa njom se suočavaju mnogi distributivni sistemi širom sveta. Na slici 6.1. je prikazana struktura bruto potrošnje u Elektroenergetskom sistemu Srbije gde se uočava da ukupni gubici električne energije u distributivnom sistemu dosežu veliki procenat, koji iznosi čak 15%.



Slika 6.1. Struktura bruto potrošnje električne energije u Elektroenergetskom sistemu Srbije [9]

U poslednjih nekoliko godina, porast instalacije fotonaponskih sistema u elektroenergetski sistem je značajan. S obzirom na raspoloživ solarni potencijal širom sveta [65-70], kao i na permanentno smanjenje cena komponenti fotonaponskih sistema kao posledice razvoja tehnologije proizvodnje fotonaponskih ćelija i ekspanzije tržišta [71-73], zaključuje se da je sasvim opravdana činjenica koja beleži sve veći broj fotonaponskih sistema priključenih na distributivnu mrežu [74, 75].

Fotonaponski sistemi priključeni na elektroenergetski sistem postaju sve popularniji. Fotonaponski sistemi u urbanim sredinama su male disperzovane jedinice, koje se integrišu u krovove i fasade zgrada (*BIPV – Building Integrated Photovoltaic*). Oni ne proizvode buku, a mogu se integrisati tako da doprinesu estetskom izgledu građevine. Evropsko građevinsko zakonodavstvo razmatra da uvede propis po kome bi bila neophodna integracija OIE u javnim i stambenim zgradama. U ovakvim aplikacijama fotonaponski moduli se postavljaju na pasivnim površinama pri čemu ne zauzimaju korisne površine [105] i direktno se povezuju na niskonaponsku distributivnu mrežu [74].

Sa aspekta distributivne mreže ovakvi fotonaponski sistemi se mogu posmatrati kao negativna potrošnja jer su, u električnom smislu, priključeni u istoj tački na distributivni sistem kao i objekata na kojima su postavljeni.

Povezivanje fotonaponskih sistema utiče na različite načine na distributivnu mrežu. U literaturi [142] navedeni su uticaj na relejnu zaštitu, uticaj na kvalitet električne energije, uticaj na pouzdanost i stabilnost sistema. Povezivanje fotonaponskih sistema izaziva promenu tokova snaga kroz distributivne vodove i transformatore [142], a kao posledica toga dolazi do promene napona i gubitaka snage u distributivnoj mreži [76-82].

U postojećoj literaturi, uticaj fotonaponskih sistema na gubitke električne energije u distributivnoj mreži se uglavnom odnosi na određene delove mreže, pri čemu su eksplicitno izvršeni proračuni tokova snaga u tim posmatranim delovima mreže. Međutim, fotonaponski sistemi velikih razmera imaju izuzetno važan uticaj na tokove snaga na svim naponskim nivoima. Postojeći modeli proračuna tokova snaga nisu primenljivi pri ovakvim okolnostima.

S obzirom na činjenicu da je distributivna mreža jedna jako prostrana mreža, koju karakteriše mnogo petlji, veliki broj elemenata, nepotpuna i nedovoljno precizna informaciona baza o parametrima elemenata mreže i režimima rada, kao i manja raspoloživost računskih resursa za proračune radnih stanja, teško je izvršiti proračun tokova snaga za jednu takvu mrežu. Stoga je teško proceniti uticaj priključenja fotonaponskih sistema na smanjenje gubitaka električne energije u distributivnoj mreži.

U cilju sagledavanja efekata fotonaponskih izvora na gubitke u distributivnoj mreži poći će se od pretpostavke da će perspektivni elektroenergetski sistem imati prostorno homogenu disperzovane fotonaponske sisteme integrisane u krovove i fasade zgrada. Efekti rada fotonaponske elektrane na elektroenergetski sistem su dominantno određeni sučeljavanjem vremenskih dijagrama potrošnje i dijagrama proizvodnje fotonaponskih elektrana. Ova sučeljavanja određuju tokove snaga kroz elemente distributivnog sistema, a time i definišu gubitke u distributivnoj mreži.

U narednim poglavljima urađena je komparativna analiza tri različite metode radi procene efekata rada fotonaponskih sistema na gubitke u distributivnoj mreži.

Prva metoda tretira stohastički model ekvivalenta distributivne mreže pri čemu se pretpostavlja da su fotonaponski sistemi homogeno disperzovane jedinice integrisane u krovove i fasade zgrada (slika 6.2.).



Slika 6.2. Fotonaponski sistemi integrisani u krovove i fasade zgrada

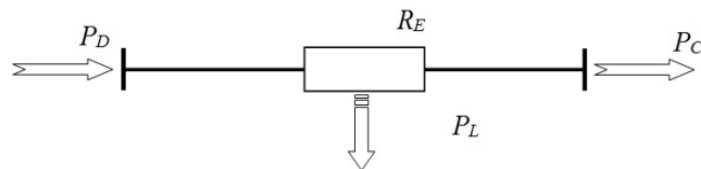
Većina kuća ili zgrada će imati integrisane fotonaponske sisteme i na taj način će se smanjiti gubici u distributivnoj mreži. U cilju sprovođenja ove analize, neophodno je posedovati merne podatke o dijagramima opterećenja u svim čvorovima u mreži, kao i podatke o otpornostima i reaktansama distributivne mreže. Ovi podaci obično nisu dostupni, jer se merenja potrošnje ne vrše u svim čvorištima mreže, tako da se analiza tokova snaga ne može korektno sprovesti na osnovu egzaktnih proračuna. Veliki broj podataka je pogrešno izmeren ili se parametri koji nisu poznati na određeni način procenjuju te se podaci predstavljaju kao Fuzzy brojevi [83-86]. Iz tog razloga druga metoda obuhvata proračune pomoću Fuzzy brojeva. Prema literaturi [86, 87], u slučajevima kada su podaci promenljivi može se koristiti Monte Carlo simulacija, koja se koristi kao treća metoda u ovom poglavlju, i to radi sagledavanja efekata proizvodnje fotonaponskih panela na smanjenje gubitaka u distributivnoj mreži.

U narednim analizama uzeće se u obzir samo tokovi aktivnih snaga, jer oni dominantno utiču na gubitke u distributivnoj mreži [88].

6.1. Stohastički model ekvivalenta distributivne mreže

Kao što je već pomenuto tokovi aktivnih snaga dominantno utiču na gubitke u distributivnoj mreži, pa će se samo oni i uzeti u obzir u ovoj analizi. Tačan proračun gubitaka aktivne snage u distributivnoj mreži zahteva analizu tokova snaga po svim granama distributivne mreže. Da bi se ovakva analiza sproveda, za bilo koju distributivnu mrežu, jako je teško sakupiti merne podatke u svim granama mreže za veliki broj potrošača. Čak i u slučaju posedovanja svih ovih podataka, oni uglavnom nisu dovoljno tačni i precizni. Iz tog razloga se koristi metoda stohastičkog modela ekvivalenta distributivne mreže, na osnovu koje je moguće jednostavno proceniti gubitke u distributivnoj mreži u slučaju promene profila opterećenja distributivnih vodova. U literaturi [88] se ova analiza pokazala kao efikasna pri proceni uticaja masovnog korišćenja štedljivih sijalica na gubitke aktivne snage u distributivnoj mreži.

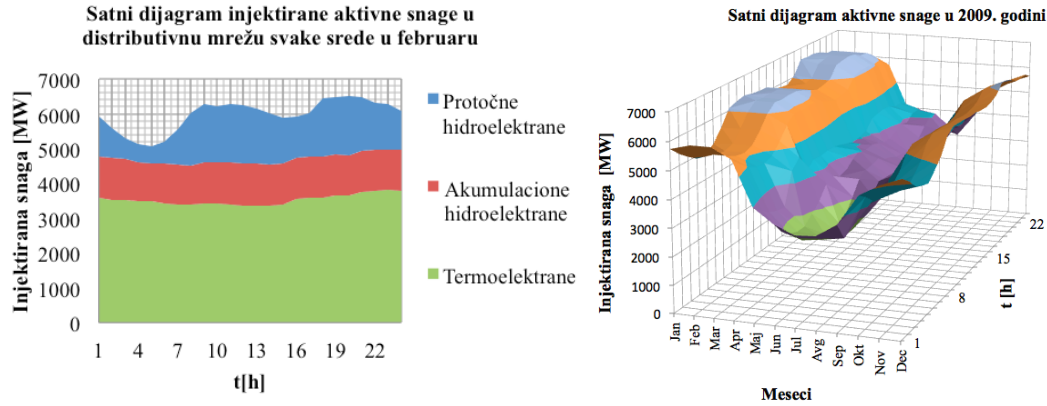
Metoda se zasniva na proceni ekvivalentne statističke otpornosti kojom se modeluje distributivna mreža u pogledu gubitaka. Na slici 6.3. prikazan je ekvivalent distributivne mreže za procenu gubitaka. Oznake na slici 6.3. imaju sledeće značenje: P_D – aktivna snaga injektirana u mrežu, R_E - ekvivalentna statistička otpornost mreže, P_C – aktivna snaga predata potrošačima, P_L – aktivna snaga gubitaka.



Slika 6.3. Ekvivalent distributivne mreže za procenu gubitaka

Na osnovu raspoloživih istorijskih podataka o dijagramima aktivne snage injektiranja u Distributivni sistem Srbije [128] i poznatih gubitaka energije na godišnjem nivou (slika 6.4.), statističkom analizom se može proceniti parametar R_E , kojim se modeluju gubici aktivne snage u celom distributivnom sistemu.

Dakle, zaključuje se da parametar R_E nije fizička, već računaska statistička veličina.



Slika 6.4. Satni dijagram injektirane aktivne snage u distributivnu mrežu Srbije za centralne srede u februaru i satni dijagram aktivne snage u 2009.- toj godini

Na osnovu definisanog ekvivalenta distributivne mreže prikazanog na slici 6.3. može se izvršiti proračun ukupnih gubitaka aktivne snage u distributivnoj mreži prema sledećoj jednačini:

$$P_L = R_E \cdot \frac{P_D^2}{U^2} = C_S \cdot P_D^2 \quad (6.1)$$

gde su: U – računski međufazni napon; $C_S = \frac{R_E}{U^2}$ - odgovarajući statistički parametar distributivnog sistema.

Statistički parametar C_S se može proceniti na osnovu istorijskih podataka o godišnjim gubicima energije za posmatranu distributivnu mrežu.

Gubici aktivne energije u distributivnom sistemu W_L , na vremenskom intervalu T , koji može da bude godina, sezona, sedmica ili dan, mogu se definisati sledećom relacijom:

$$W_L = \int_0^T P_L(t) dt \quad (6.2).$$

Zamenom izraza (6.2) u jednačinu (6.1) dobija se sledeći izraz:

$$W_L = \int_0^T C_S(t) \cdot P_D^2(t) dt \quad (6.3).$$

Dakle, iz poslednje relacije se može zaključiti da se gubici energije mogu proceniti na osnovu dijagrama injektiranih aktivnih snaga u distributivni sistem. Parametar sistema C_S je promenljiv u vremenu i zavisi od mnogo faktora, kao što su varijacija napona, promene uklopnog stanja mreže, kao i od preraspodele opterećenja po granama distributivne mreže. Ipak, s obzirom da se posmatraju godišnji gubici energije, može se pretpostaviti da se sistem u pogledu gubitaka može predstaviti sa fiksnim parametrom C_S . Pod ovom pretpostavkom izraz (6.3) se može napisati u sledećem obliku:

$$W_L = C_S \int_0^T P_D^2(t) dt \quad (6.4).$$

Da bi izraz (6.4) imao praktični značaj potrebno je odrediti parametar C_S . Za njegovo određivanje potrebno je poznavati dijagrame injektiranja aktivne snage u distributivnu mrežu P_D i odgovarajuće gubitke snage P_L .

U narednim poglavljima su opisani načini na koji se ovi parametri procenjuju.

6.1.1. Metodologija za proračun reprezentativnih dijagrama potrošnje

Proračun gubitaka aktivne snage je najbolje izvršiti za svaki sat u toku godine na osnovu odgovarajućih srednjih satnih vrednosti snage potrošnje i snage proizvodnje fotonaponskih sistema. Iako ovakav proračun daje najtačniju procenu gubitaka, on zahteva poznavanje dnevnih dijagrama potrošnje za analiziranu distributivnu mrežu za celu godinu sa satnom rezolucijom. Često podaci o potrošnji nisu dostupni za ceo jednogodišnji period od 365 dana već samo za neke karakteristične dane, kao npr. centralne srede u mesecu. Za slučaj da se poseduju samo podaci o dijagramima potrošnje za karakteristične dane, moguće je primeniti statističku metodu za određivanje reprezentativnog dijagrama potrošnje. Suština ove analize je da se na osnovu raspoloživog seta dnevnih dijagrama potrošnje odredi dijagram koji najbolje reprezentuje gubitke na godišnjem horizontu.

Matematički gledano, ovaj zadatak se najefikasnije rešava metodom minimuma sume kvadrata [100].

Algoritam za određivanje reprezentativnog dijagrama potrošnje na osnovu raspoloživog seta od M karakterističnih dnevnih dijagrama opterećenja se sastoji od sledećih algoritamskih koraka:

1) Izvrši se proračun prosečnog dnevnog dijagrama kvadrata snage potrošnje na sledeći način:

$$\overline{P_{Dl}^2} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^{j=M} P_{Dij}^2 \quad i=1,2,\dots,24 \quad (6.5)$$

gde je P_{Dij} - aktivna snaga potrošnje u i -tom satu j -tog karakterističnog dana.

2) Za svaki od M raspoloživih dijagrama proračuna se prosečna devijacija satnih vrednosti kvadrata snage opterećenja u odnosu na dijagram definisan relacijom (6.5):

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{24} \sum_{i=1}^{i=24} (P_{Dij}^2 - \overline{P_{Dl}^2})^2} \quad j=1,\dots,M \quad (6.6).$$

3) Odabere se dnevni dijagram potrošnje $P_D^*(t)$ koji ima minimalnu vrednost prosečne satne devijacije kvadrata snage proračunate relacijom (6.6). Dijagram $P_D^*(t)$ predstavlja reprezentativni dijagram potrošnje u pogledu gubitaka.

6.1.2. Metodologija za određivanje statističkog parametra distributivne mreže

Da bi se procenio statistički parametar C_s , neophodno je poznavati reprezentativni dijagram potrošnje i godišnju energiju gubitaka za analiziranu distributivnu mrežu. Određivanje reprezentativnih dijagrama snage potrošnje se vrši metodologijom koja je opisana u prethodnom odeljku 6.1.1. Ukupna energija gubitaka je obično poznata za određeni distributivni sistem na osnovu razlike u bruto preuzetoj i neto utrošnoj električnoj energiji.

Na osnovu karakterističnog dijagrama potrošnje, ukupni godišnji gubici energije, koji su definisani relacijom (6.4), se mogu predstaviti sledećom relacijom:

$$W_L = C_S \int_0^T P_D^2(t) dt \cong C_S \cdot M \cdot \sum_{i=1}^{i=24} P_{Di}^{*2} \quad (6.7)$$

gde su: $T=8760$ - broj sati u godini, P_{Di}^* - snaga potrošnje u i -tom satu za reprezentativne dijagrame potrošnje, $M=365$ – broj dana u godini.

Na osnovu relacije (6.7) može se proceniti statistički parametar C_S :

$$C_S = \frac{W_L}{M \cdot \sum_{i=1}^{i=24} P_{Di}^{*2}} \quad (6.8).$$

6.1.3. Uticaj disperzovanih fotonaponskih sistema na gubitke aktivne snage u distributivnoj mreži

Instalacijom fotonaponskih sistema na krovove i fasade zgrada i njihovim priključenjem na niskonaponsku distributivnu mrežu menjaju se profili tokova snaga po distributivnim vodovima. Efekat rada fotonaponskih sistema se svodi na smanjenje preuzete električne energije krajnjih potrošača od distributivne mreže, s obzirom da su potrošači u objektu i fotonaponski sistemi integrisani u objektu priključeni na istu tačku u distributivnoj mreži. Da bi se procenio uticaj fotonaponskih sistema na dijagram injektiranja snage u distributivni sistem potrebno je proceniti dijagram proizvodnje fotonaponskih sistema u analiziranoj distributivnoj mreži.

Procena dijagrama proizvodnje fotonaponskih panela je vršena na osnovu merenja solarne iradijacije i temperature ambijenta u neposrednoj blizini distributivne mreže. Pretpostavljeno je da su svi fotonaponski paneli montirani pod fiksnim nagibnim uglom. Takođe je pretpostavljeno da su paneli čisti i da imaju sisteme za praćenje maksimalne tačke snage *MPPT* [21]. Snaga koju fotonaponski panel može da injektira u distributivnu mrežu (P_{Pvi}) u svakom i -tom satu u toku prosečnog dana je definisana relacijom (4.4), koja je detaljno objašnjena u poglavlju 4.2.

Na osnovu opisane analize u poglavlju 4.2. dobija se dijagram proizvodnje fotonaponskih sistema za svaki sat u toku jedne godine. Merenja temperature ambijenta, kao i izmereni podaci horizontalne iradijacije se odnose na ciljani region i vršena su u periodu od godinu dana.

Smanjenje gubitaka aktivne snage se može proračunati na osnovu reprezentativnih dijagrama proizvodnje fotonaponskih panela. U uslovima injektiranja snage fotonaponskih sistema, srednja satna snaga injektiranja u distributivni sistem u i -tom satu P_{Di}^{PV} , se može proračunati pomoću sledeće relacije

$$P_{Di}^{PV} = P_{Di} - \Delta P_{Di} - \Delta P_{Li} \quad (6.9)$$

gde su: ΔP_{Di} - smanjenja snage koju potrošači preuzimaju od distributivne mreže (neto smanjenje potrošnje); ΔP_{Li} - smanjenja snage gubitaka.

ΔP_{Di} odgovara snazi proizvodnje fotonaponskih panela u i -tom satu:

$$\Delta P_{Di} = P_{PVi} \quad (6.10).$$

Smanjenja gubitaka aktivne snage se može formalno matematički predstaviti sledećom relacijom:

$$\Delta P_{Li} = P_{Li} - P_{Li}^{PV} \quad (6.11)$$

gde su P_{Li} i P_{Li}^{PV} procenjeni dnevni dijagrami snage gubitaka u distributivnom sistemu pre i nakon priključenja fotonaponskih panela, respektivno. Proračun ovih veličina se vrši prema sledećim relacijama:

$$P_{Li} = C_S \cdot (P_{Di})^2 \quad (6.12)$$

$$P_{Li}^{PV} = C_S \cdot (P_{Di}^{PV})^2 \quad (6.13).$$

Kombinujući (6.11) - (6.13) jednačine dobija se sledeći izraz za procenu promene gubitaka u distributivnom sistemu nakon priključenja fotonaponskih sistema:

$$\Delta P_{Li} = C_S \cdot ((P_{Di})^2 - (P_{Di} - \Delta P_{PVi} - \Delta P_{Li})^2) \quad (6.14).$$

Prethodni algoritam je pokazao dobre rezultate u proceni smanjenja gubitaka aktivne snage pri masovnoj upotrebi štedljivih sijalica u distributivnom sistemu Srbije, koji je opisan u literaturi [88]. U suštini, efekti priključenja fotonaponskih sistema imaju isti efekat, s tim što oni pogađaju dnevni vrh potrošnje, za razliku od osvetljenja koje pogađa noćni vršni režim.

Ukupno godišnje smanjenje energije gubitaka u distributivnom sistemu ΔW_L se može proceniti na osnovu sledeće relacije:

$$\Delta W_L = \int_0^T \Delta P_L(t) dt \quad (6.15).$$

6.2. Primena Fuzzy logike

U određenim slučajevima raspolaže se sa nedovoljno preciznim ulaznim podacima. Teorija Fuzzy skupova predstavlja jedan od najpogodnijih matematičkih aparata za tretiranje bilo kakve neizvesnosti i neodređenosti.

Fuzzy skupove definisao je 1965.-te godine *Lotfi Zadeh* kao matematički formalizovan način predstave i modeliranja neodređenosti u lingvistici. U teoriji klasičnih, jasnih skupova, neki određeni element ili pripada ili ne pripada nekom definisanom skupu. Drugim rečima, pripadnost elementa skupu je krajnje distinktna. Fuzzy skup je, u tom smislu, generalizacija klasičnog skupa, budući da se pripadnost tj. stepen pripadnosti elementa Fuzzy skupu može okarakterisati brojem iz intervala $[0,1]$ [86, 89, 90], tj. funkcija pripadanja (*membership function*) Fuzzy skupa preslikava svaki element univerzalnog skupa u pomenuti interval realnih brojeva. Sa druge strane, Fuzzy skup uvodi neodređenosti poništavanjem oštih granica između članova skupa i onih koji to nisu. Osnovne operacije nad Fuzzy skupovima su: komplement skupa, presek skupova, unija skupova, jednakost i podskup.

Fuzzy broj je rasplinuti skup, odnosno to je skup koji je konveksan i normalizovan. On se definiše preko svoje donje i gornje granice. Osnovne operacije kod Fuzzy skupova su: sabiranje, oduzimanje, množenje i deljenje [89].

Osnovne operacije kod Fuzzy logike su fazifikacija i defazifikacija. Fazifikacija naprosto modifikuje signale ulaza, tako da mogu biti pravilno protumačeni i pretvoreni u adekvatan Fuzzy oblik. Često se ovaj postupak naziva i kodiranje. Ovo omogućavaju upravo funkcije pripadanja, koje u stvari mapiraju stepen istinitosti neke tvrdnje.

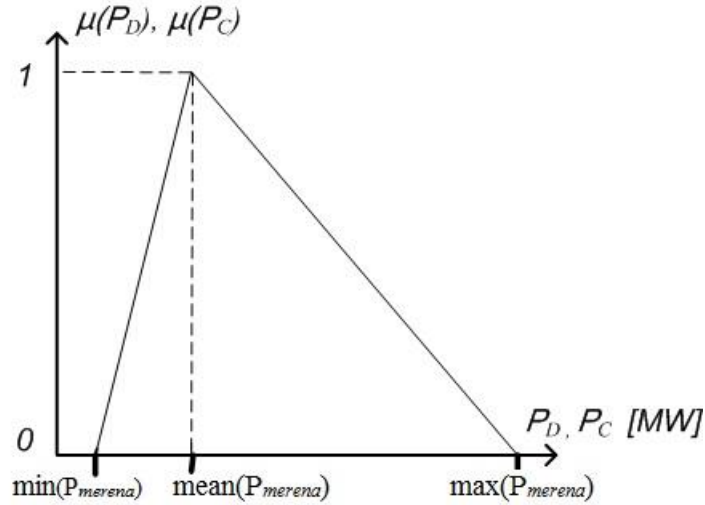
Ako funkciju pripadanja označimo sa $\mu_A(x)$, onda je Fuzzy skup A nad prostorom X definisan kao [85, 89]: $A = [x, \mu_A(x) | x \in X]$, gde je $\mu_A(x)$ funkcija pripadanja koja mapira stepen pripadnosti elementa x skupu A .

Na ovaj način se uvodi neodređenost, gde svaki element x skupa A ima stepen $\mu_A(x) = [0,1]$.

Fuzzy optimizacija, Fuzzy linearno programiranje i Fuzzy kontroleri nalaze primenu u mnogim oblastima elektroenergetskih sistema [91-93]. Fuzzy logika se često primenjuje u distributivnim mrežama kod tokova snaga, gde se snage potrošnje u čvorovima i naponi napojne tačke predstavljaju Fuzzy brojevima jer ovi parametri nisu poznati, već se procenjuju. Na osnovu iskustva se sa velikom tačnošću mogu predstaviti granice između kojih se nalaze ovi parametri. Parametri kao što su snaga potrošnje se menjaju prema definisanom dijagramu potrošnje u zavisnosti od potrošača. Promena potrošnje uzrokuje promene snaga injektiranja u distributivni sistem. Na sličan način variranje insolacije je uslovljeno i uzrokovano prirodnim promenama. Zasnivajući se na toj činjenici, ulazni podaci iz prve metode potrebno je predstaviti kao Fuzzy brojeve.

Fuzzy logika je matematički model koji može da prikaže neke neodređenosti koje imaju izmereni podaci, kao i da omogući bolju procenu rezultata. Ova tvrdnja se koristi za modelovanje ulaznih podataka da bi se procenio statistički parametar C_s , kao i smanjenje gubitaka ΔP_L u distributivnoj mreži. Za izmerene promenljive podatke, kao što su solarna iradijacija, snaga injektiranja i snaga potrošnje, uzimaju se pojedinačne vrednosti sa određenom verovatnoćom. Funkcija pripadanja Fuzzy skupa μ uvodi neodređenost, odnosno mapira svaki element univerzalnog skupa pomenutog interval realnih brojeva. Prvi korak koji treba preduzeti kod Fuzzy logike, odnosno fazifikacije, je onaj kojim se pravilno modifikovali ulazni podaci u formi Fuzzy brojeva. Kroz proces fazifikacije sve promenljive postaju Fuzzy brojevi.

Izmerena snaga injektiranja u distributivnu mrežu P_D i snaga potrošnje P_C su konvertovane u odgovarajući Fuzzy oblik. Ovo omogućava funkcija pripadanja, koja u stvari predstavlja moguću raspodelu Fuzzy promenljive. Kao što je i obično slučaj, funkcija pripadanja snage ima trougaoni oblik i prikazana je na slici 6.5.



Slika 6.5. Snaga injektiranja u distributivnu mrežu P_D i snaga potrošnje P_C u formi Fuzzy broja

Najveća verovatnoća $\mu(P_{D2})=1$, je ta da snaga ima svoju stvarnu vrednost. Verovatnoća da će snaga imati minimalnu ili maksimalnu vrednost je 0, odnosno $\mu(P_{D1,3})=0$. Fuzzy brojevi za snagu injektiranja u distributivnu mrežu P_D i snagu potrošnje P_C se mogu formirati na osnovu realnih merenja pomoću sledećih jednačina:

$$P_{D1} = \min_{i=1,n}(P_{Di})$$

$$P_{D2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{Di}$$

$$P_{D3} = \max_{i=1,n}(P_{Di}) \quad (6.16).$$

Statistički parametar C_S se može proračunati na osnovu izraza sličnog kao i kod stohastičke metode:

$$C_S = \frac{P_D - P_C}{P_D^2} \quad (6.17).$$

Na ovaj način, predstavljen gornjim izrazom, statistički parametar C_S takođe ima oblik Fuzzy broja.

Na osnovu proračunate satne vrednosti proizvodnje fotonaponskog panela koju on injektira u distributivnu mrežu, kao što je opisano u poglavlju 6.1.3, P_{PV} se može predstaviti u obliku Fuzzy broja. Na osnovu (6.9)-(6.14) se može proračunati smanjenje gubitaka aktivne snage ΔP_L korišćenjem formiranih Fuzzy brojeva. Statistički parametar C_s i smanjenje gubitaka aktivne snage ΔP_L se mogu proračunati za svaku sredu, za svaki mesec u 2009. godini, kao i za celu godinu. U svim formulama operacije sa Fuzzy brojevima su definisane preko njihovih funkcija pripadanja kao:

$$\mu_C(z) = \mu_{A+(-,*,/)B} = \max\{\min[\mu_A(x), \mu_B(y)]\} \quad (6.18).$$

Dobijeni rezultati za statistički parametar C_s , kao i smanjenje gubitaka aktivne snage ΔP_L u distributivnoj mreži, korišćenjem ove metode za celu 2009. godinu su predstavljeni u obliku Fuzzy brojeva.

Kako bi se ovi rezultati uporedili sa rezultatima dobijenim korišćenjem stohastičke metode, neophodno ih je transformisati u realne brojeve, odnosno potrebno je defazifikovati ih.

Defazifikacija je proces dodeljivanja determinističke vrednosti Fuzzy broju i to je zapravo proces suprotan procesu fazifikacije. Metoda koja se najčešće koristi za defazifikaciju je centar gravitacije:

$$A = defuzzy(A) = \frac{\int \mu_A(x) \cdot x \cdot dx}{\int \mu_A(x) \cdot dx} \quad (6.19).$$

Na ovaj način izlazni rezultati dobijaju jedinstvene vrednosti i mogu se porediti sa bilo kojim drugim rezultatima. Primenjena Fuzzy logika u suštini dozvoljava implementaciju velikog broja mernih podataka, pri čemu se pomoću nje ti podaci i izuzetno brzo obrađuju.

6.3. Primena Monte Carlo simulacije

Naziv metode Monte Carlo datira iz 40-tih godina prošlog veka iz škole matematičara i fizičara u Las Alamosu.

Zasluge za osmišljavanje Monte Carlo metode pripisuju se poljskom matematičaru *Stanislavu Ulmu* koji je igrajući popularnu igru karata „solitere“ pokušao je da odgonetne kolike su šanse da se špil od 52 karte podele tako da se u toj igri pobjedi. Uočio je da je mnogo jednostavnije podeliti karte sto puta pa prebrojati koliko je bilo uspešnih ishoda, što mu je dalo ideju kako da prilagodi procese opisane diferencijalnim jednačinama u ekvivalentne oblike koji se zasnivaju na operacijama nad slučajnim brojevima. Ova metoda je dobila naziv prema gradu Monte Carlo, poznatog po kockarnicama, u kojima se u igra rulet, za koji bismo mogli da kažemo da proizvodi slučajne brojeve. Metoda Monte Carlo je i zasnovana na korišćenju slučajnih brojeva.

Numeričke metode, poznate kao Monte Carlo metode, definišu se kao statistički simulacione metode, kod kojih se upotrebljavaju nizovi slučajnih brojeva za izvršenje simulacije. Monte Carlo metode su poznate kao „statistička uprošćavanja“ i metoda ponovljenih pokušaja. Monte Carlo simulacija koristi statistiku, kako bi se matematički modelovali realni procesi, a zatim odredila verovatnoća mogućih rešenja. Rezultat Monte Carlo simulacije se izračunava kao funkcija nekoliko neodređenih ulaza gde svaka od njih ima svoju raspodelu verovatnoće. Ova metoda je pogodna za proračune kod kojih se neke od ulaznih veličine utvrđuju sa određenom neizvesnošću.

U nekoliko poslednjih decenija, Monte Carlo metoda je dobila puni smisao i značaj i predstavlja jednu od numeričkih metoda koje imaju sposobnost da rešavaju najkompleksnije zahteve sa najsloženijim uslovima.

U ovom poglavlju Monte Carlo simulacija će se koristiti za simulaciju izmerene snage i da bi se proračunala snaga fotonaponskih panela P_{PV} , što predstavlja ulazne parametre u proračunu smanjena gubitaka snage ΔP_L . Korišćenje Monte Carlo simulacije uključice sve moguće slučajeve proizvodnje fotonaponskih panela i potrošnje električne energije. Jedan od načina da se okarakterišu izvori neodređenosti u sistemu je da se predstave ulazni podaci kao slučajne vrednosti iz nekih određenih izmerenih opsega. Prema tome, shodno ovoj metodi, ulazne vrednosti za snagu injektiranja u distributivnu mrežu P_D , snagu potrošnje P_C i gubitke aktivne energije u distributivnom sistemu W_L su respektivno njihove satne vrednosti, pored vrednosti za svaki sat za centralne srede u mesecu. Na taj način, nasumične promene ulaznih parametara nisu uzete u obzir.

Na primer, snaga potrošnje i insolacija se menjaju svakog minuta i time se stalno menja stanje distributivne mreže. Ove promene upravo tretiraju metode zasnovane na Fuzzy brojevima i Monte Carlo simulaciji.

Opsezi slučajno odabranih ulaznih promenljivih su isti kod obe metode. Promenljive i njihova ograničenja su takođe iste kao i kod metode sa Fuzzy brojevima. Opseg snage koji je zasnovan na realnim merenjima se može formirati uz pomoć sledećih jednačina:

$$P_{min} = \min_{i=1,n}(P_i)$$

$$P_{max} = \max_{i=1,n}(P_i) \quad (6.20).$$

Promenljive su nasumično odabrane iz zadanog opsega snage i kao takve se koriste u gore pomenutim relacijama. Broj izvršenih Monte Carlo simulacija je broj uzetih promenljivih iz definisanog opsega. Broj Monte Carlo simulacija koji je potreban za dobijanje određenih rezultata direktno je određen i zavisi od veličine samog sistema i on najčešće i iznosi 1000 [94, 95].

Prednost ove metode je svakako njena sjajna slikovita predstava, koja se jako lako razume i tumači. Vrednosti koje se mogu najčešće očekivati su predstavljene upravo kao rezultati proračuna uz pomoć Monte Carlo simulacije.

Dobijeni rezultati za statistički parametar C_S , kao i smanjenje gubitaka aktivne snage ΔP_L u distributivnoj mreži, korišćenjem Monte Carlo simulacije, su predstavljeni u obliku histograma i na taj način je predstavljena raspodela dobijenih vrednosti.

U cilju komparacije ovako dobijenih rezultata sa rezultatima dobijenim korišćenjem prve metode i sa defazifikovanim rezultati dobijenim korišćenjem druge metode, stvarne vrednosti se proračunavaju na sledeći način:

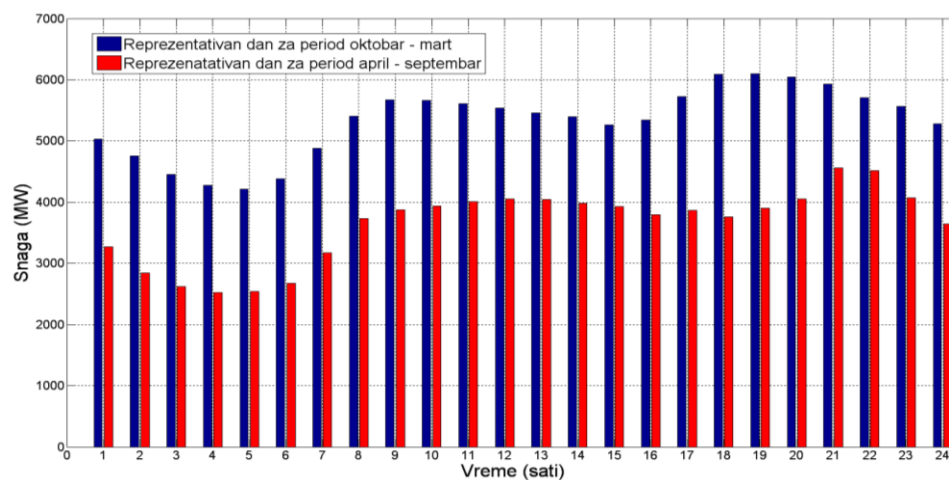
$$C_S = \frac{1}{n_{MCS}} \sum_{C_{min}}^{C_{max}} C_i \quad (6.21).$$

6.4. Testiranje modela

U ovom odeljku izvršena je analiza uticaja perspektivnih fotonaponskih sistema integrisanih u krovove i fasade zgrada u Srbiji na promenu gubitaka aktivne snage u distributivnom sistemu. Pretpostavljen je scenario u pogledu instalisane snage fotonaponskih sistema i on iznosi 1000 MW_p. U ovoj analizi korišćeni su istorijski podaci o bilansima snaga u Distributivnom sistemu Srbije za 2009. godinu, prema kojima je isporučena električna energija iznosila 29676 GWh, dok je naplaćena električna energija iznosila 25305 GWh. Na osnovu ovih podataka dobija se da je ukupna energija gubitaka u Distributivnom sistemu Srbije u 2009. godini iznosila 4371 GWh, što je 14.72%.

Iznos ukupnih distributivnih gubitaka predstavlja zbir tehničkih i netehničkih gubitaka. Procenjeno je da tehnički gubici predstavljaju 60% ukupnih gubitaka, dok ostalih 40% predstavlja netehničke gubitke [96].

Na osnovu metodologije prikazane u odeljku 6.1 i na osnovu raspoloživih dijagrama opterećenja za centralne srede u mesecu za analizirani jednogodišnji period, tj. za 2009. godinu, proračunati su reprezentativni dijagrami opterećenja na pragu distribucije. Dijagrami snage injektiranja su proračunati za dve sezone: zimsku i letnju, odnosno oktobar – mart i april – septembar, što je i prikazano na slici 6.6.



Slika 6.6.. Procenjeni reprezentativni dnevni dijagrami injektiranja snage u Distributivni sistem Srbije za 2009. godinu

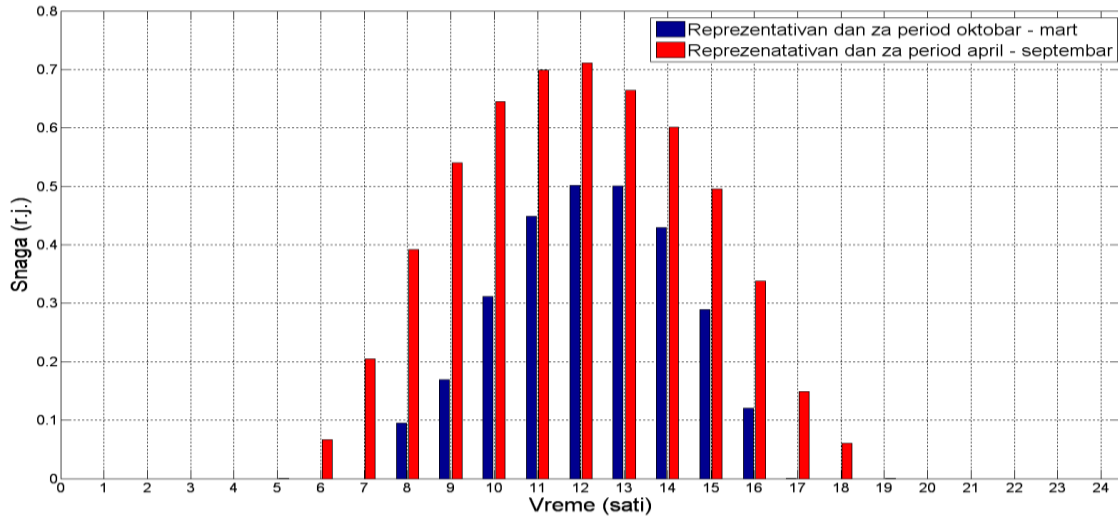
Na osnovu dostupnih dijagrama opterećenja za centralne srede u mesecu u toku 2009. godine, kao i na osnovu podataka o tehničkim gubicima energije iz ove godine, dobija se pomoću relacije (6.1) da statistički parametar C_s iznosi $1.5325 \cdot 10^{-11} \text{ W}^{-1}$ za posmatranu 2009. godinu. Na osnovu relacije (6.8) dobijena je vrednost ukupnih godišnjih gubitaka energije W_L , koji iznose 2655 GWh, a to predstavlja 60% od vrednosti 4371 GWh.

U ovoj analizi je pretpostavljeno da se fotonaponski paneli homogeno instaliraju u okviru distributivne mreže, pri čemu ukupna instalisana snaga fotonaponskih panela integrisanih u krovove i fasade zgrada može da varira. S obzirom na intermitentan karakter solarnog zračenja i činjenicu da su gubici snage nelinearna funkcija tokova snaga, potrebno je odrediti reprezentativne dijagrame proizvodnje fotonaponskih panela radi procene godišnjih gubitaka.

Merenja horizontalne solarne iradijacije i temperature vazduha su vršena u toku 2009. godine na lokaciji Kovin, koja se nalazi u južnom Banatu, u Vojvodini i koja je 50 kilometara udaljena od Beograda. Na osnovu raspoloživih merenja za 2009. godinu izvršen je proračun srednjih satnih snaga proizvodnje fotonaponskog panela na ovoj lokaciji. S obzirom na geografsku poziciju merne lokacije i klimatske uslove u ovom regionu pretpostavljeno je da mereni podaci mogu biti, za potrebe ove analize, reprezentativni za čitavu teritoriju Republike Srbije [97, 98].

U proračunu je pretpostavljeno da su fotonaponski paneli južno orijentisani i da su fiksno postavljeni pod nagibnim uglom od 34° . Takođe, pretpostavljene su i uvažene sledeće karakteristike modula: $NOCT=47^{\circ}\text{C}$, koeficijent temperaturne promene efikasnosti $-0,5\%/^{\circ}\text{C}$, gubici usled zaprljanosti panela 4%, gubici usled neuparenosti modula u panelu 3% i EURO efikasnost invertora 97%.

Na osnovu dobijenih srednjih satnih vrednosti proizvodnje fotonaponskih panela određena su dva reprezentativna dnevna dijagrama proizvodnje fotonaponskih panela P_{PV} . Dijagrami su prikazani na slici 6.7. Ovi reprezentativni dijagrami su procenjeni metodom minimuma sume kvadrata odstupanja pomoću relacija (6.5) i (6.6).



Slika 6.7. Procenjeni reprezentativni dnevni dijagrami proizvodnje fotonaponskih panela za zimski i letnji period u toku 2009. godine

Isti merni podaci i parametri su korišćeni pri proračunima proizvodnje fotonaponskih panela P_{PV} korišćenjem Fuzzy logike.

U tabeli 6.1. prikazane su dobijene satne vrednosti proizvodnje fotonaponskih panela P_{PV} za reprezentativan dan u zimskom periodu u toku 2009. godine u obliku Fuzzy broja, sa svojim minimalnim, stvarnim i maksimalnim vrednostima, kao i satne vrednosti snage potrošnje P_C predstavljene u obliku Fuzzy broja.

Satne vrednosti proizvodnje fotonaponskih panela P_{PV} i snage potrošnje P_C date su za slučaj kada je statistički parametar C_S konstantan i iznosi $1.5325 \cdot 10^{-11} \text{ W}^{-1}$ za posmatranu 2009. godinu. Vrednost statističkog parametra C_S je dobijena stohastičkom metodom.

U tabeli 6.2. prikazane su dobijene satne vrednosti proizvodnje fotonaponskih panela P_{PV} za reprezentativan dan u letnjem periodu u toku 2009. godine u obliku Fuzzy broja, kao i satne vrednosti snage potrošnje P_C predstavljene u obliku Fuzzy broja za slučaj kada je statistički parametar C_S konstantan i iznosi $1.5325 \cdot 10^{-11} \text{ W}^{-1}$ za posmatranu 2009. godinu.

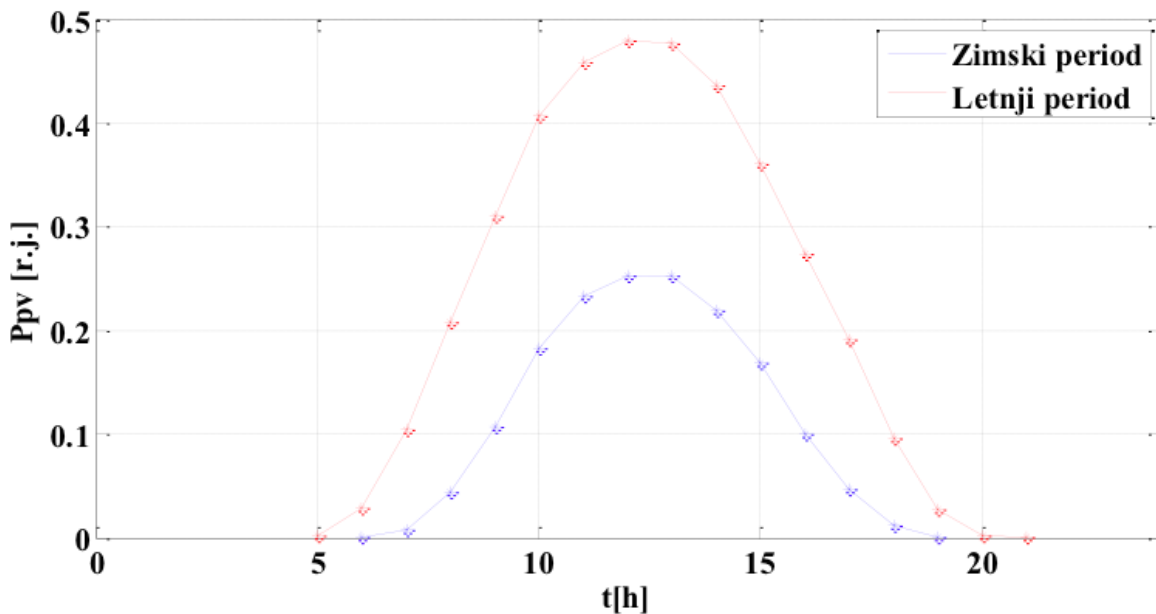
Tabela 6.1. Satne vrednosti proizvodnje fotonaponskih panela i snage potrošnje u obliku Fuzzy broja za reprezentativan dan za zimski period u toku 2009. godine

t [h]	P_{PV} [r.j.]	P_C [10^9 W]	C_S [10^{-11} 1/W]
1	0 0 0	4.3275 5.0111 5.4021	1.5325
2	0 0 0	4.1334 4.7569 5.1057	1.5325
3	0 0 0	3.8108 4.4316 4.7895	1.5325
4	0 0 0	3.6703 4.2588 4.6191	1.5325
5	0 0 0	3.6142 4.2171 4.5917	1.5325
6	0 0.00001 0.0001	3.8457 4.4098 4.6825	1.5325
7	0 0.0055 0.0193	4.1099 4.7409 5.0411	1.5325
8	0.0029 0.0379 0.0897	4.6009 5.2605 5.6007	1.5325
9	0.0344 0.1027 0.1863	4.7652 5.4473 5.7685	1.5325
10	0.0735 0.1751 0.2996	4.7269 5.4187 5.7501	1.5325
11	0.1213 0.2287 0.3477	4.7294 5.4370 5.7857	1.5325
12	0.1458 0.2519 0.3624	4.6655 5.3808 5.7485	1.5325
13	0.1486 0.2544 0.3574	4.6509 5.3296 5.6301	1.5325
14	0.1195 0.2203 0.3184	4.6210 5.2522 5.5247	1.5325
15	0.0802 0.1633 0.2620	4.5851 5.1673 5.3805	1.5325
16	0.0309 0.0936 0.1744	4.6203 5.1905 5.4171	1.5325
17	0.0019 0.0364 0.1026	4.7591 5.3462 5.5777	1.5325
18	0 0.0060 0.0289	5.0038 5.6902 6.0535	1.5325
19	0 0.0001 0.0007	4.9682 5.6800 6.0101	1.5325
20	0 0 0	4.8841 5.6630 6.0527	1.5325
21	0 0 0	4.7057 5.5274 5.9715	1.5325
22	0 0 0	4.6631 5.4107 5.7841	1.5325
23	0 0 0	4.7093 5.4425 5.7937	1.5325
24	0 0 0	4.5283 5.2285 5.5745	1.5325

Tabela 6.2. Satne vrednosti proizvodnje fotonaponskih panela i snage potrošnje u obliku Fuzzy broja za reprezentativan dan za letnji period u toku 2009. godine

t [h]	P_{PV} [r.j.]	P_C [10^9 W]	C_S [10^{-11} 1/W]
1	0 0 0	0.2836 0.3763 0.5464	1.5325
2	0 0 0	0.2495 0.3404 0.5164	1.5325
3	0 0 0	0.2313 0.3234 0.4850	1.5325
4	0 0 0	0.2231 0.6375 2.8034	1.5325
5	0 0.0015 0.0054	0.2126 0.3115 0.4650	1.5325
6	0.0001 0.0287 0.0585	0.2133 0.3278 0.4743	1.5325
7	0.0193 0.1131 0.1819	0.2114 0.3490 0.5103	1.5325
8	0.0897 0.2277 0.3073	0.2287 0.3715 0.5577	1.5325
9	0.1863 0.3322 0.4115	0.2703 0.3954 0.5829	1.5325
10	0.2996 0.4208 0.4988	0.3161 0.3994 0.5775	1.5325
11	0.3477 0.4745 0.5558	0.3058 0.4078 0.5844	1.5325
12	0.3624 0.4962 0.5791	0.2959 0.4101 0.5809	1.5325
13	0.3574 0.4868 0.5881	0.3268 0.4187 0.5692	1.5325
14	0.3184 0.4463 0.5439	0.2977 0.4042 0.5583	1.5325
15	0.2620 0.3715 0.4476	0.2851 0.3909 0.5441	1.5325
16	0.1744 0.2895 0.3592	0.2689 0.3860 0.5479	1.5325
17	0.1026 0.1965 0.2725	0.2631 0.3906 0.5590	1.5325
18	0.0289 0.0980 0.1623	0.2580 0.4031 0.5990	1.5325
19	0.0007 0.0248 0.0548	0.2646 0.4046 0.6039	1.5325
20	0 0.0015 0.0048	0.2880 0.4183 0.6101	1.5325
21	0 0.0000 0.0000	0.3301 0.4213 0.6032	1.5325
22	0 0 0	0.3270 0.4232 0.5846	1.5325
23	0 0 0	0.3071 0.4204 0.5852	1.5325
24	0 0 0	0.2670 0.3906 0.5635	1.5325

Na grafiku koji je prikazan na slici 6.8. predstavljene su defazifikovane satne vrednosti proizvodnje fotonaponskih panela P_{PV} za reprezentativan dan u zimskom periodu i u letnjem periodu u toku posmatrane 2009. godine.



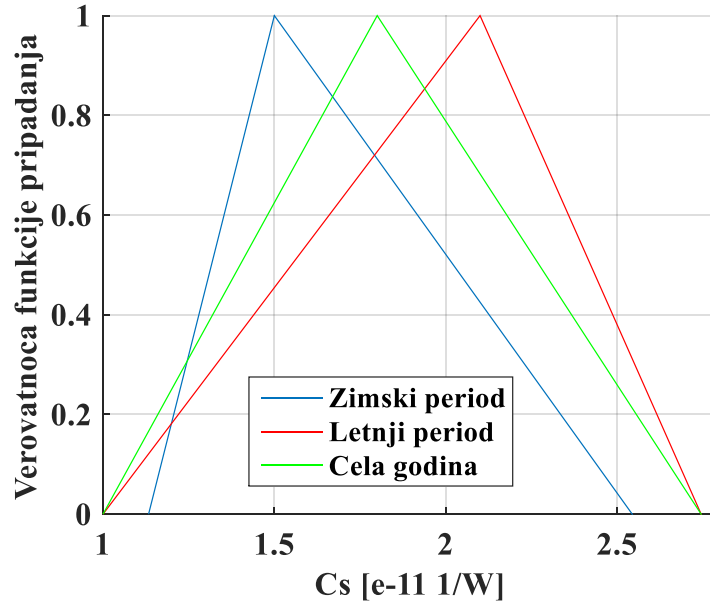
Slika 6.8. Defazifikovane satne vrednosti proizvodnje fotonaponskih panela za reprezentativan dan u zimskom i letnjem periodu u 2009. godine

U tabeli 6.3. prikazane su dobijene vrednosti statističkog parametra C_S za reprezentativan dan u zimskom periodu i u letnjem periodu u toku 2009. godine, kao i za celu godinu u obliku Fuzzy broja dobijene korišćenjem Fuzzy logike.

Tabela 6.3. Vrednosti statističkog parametra C_S za reprezentativan dan u zimskom i letnjem periodu i u toku cele 2009. godine u obliku Fuzzy broja

C_S [10^{-11} 1/W]	Minimalna vrednost	Srednja vrednost	Maksimalna vrednost
Zimski period	1.133	1.500	2.544
Letnji period	1	2.1	2.745
Cela godina	1	1.8	2.745

Na slici 6.9. su vrednosti statističkog parametra C_S iz tabele 6.3. grafički islutrovane.



Slika 6.9. Statistički parametra C_S za reprezentativan dan u zimskom i letnjem periodu i u toku cele 2009. godine u obliku Fuzzy broja

Kada su poznati statistički parametar C_S i proizvodnja fotonaponskih panela P_{PV} , nije teško proračunati smanjenje gubitaka aktivne snage ΔP_L u distributivnoj mreži.

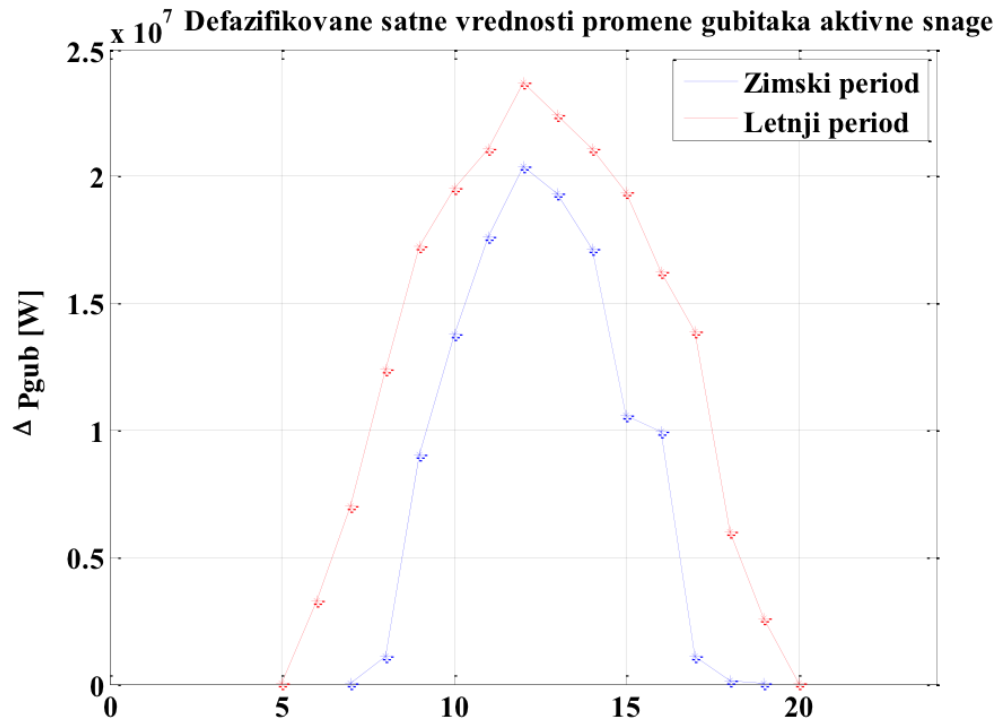
Korišćenjem relacije (6.14) i procenjenih reprezentativnih dnevnih dijagrama snage injektiranja u distributivni sistem, kao i dijagrama proizvodnje fotonaponskih panela, procenjene su promene prosečnih godišnjih gubitaka aktivne snage ΔP_L u Distributivnom sistemu Srbije u toku 2009. godine.

U tabeli 6.4. prikazane su dobijene satne vrednosti smanjenja gubitaka aktivne snage ΔP_L u distributivnoj mreži dobijene korišćenjem Fuzzy logike. Date su vrednosti za reprezentativan dan u zimskom periodu i u letnjem periodu u toku 2009. godine u obliku Fuzzy broja, kao i defazifikovane vrednosti smanjenja gubitaka aktivne snage ΔP_L u distributivnoj mreži za obe sezone u toku pomenute godine.

Tabela 6.4. Satne vrednosti smanjenja gubitaka aktivne snage u distributivnoj mreži za reprezentativan dan za zimski i letnji period u toku 2009. godine

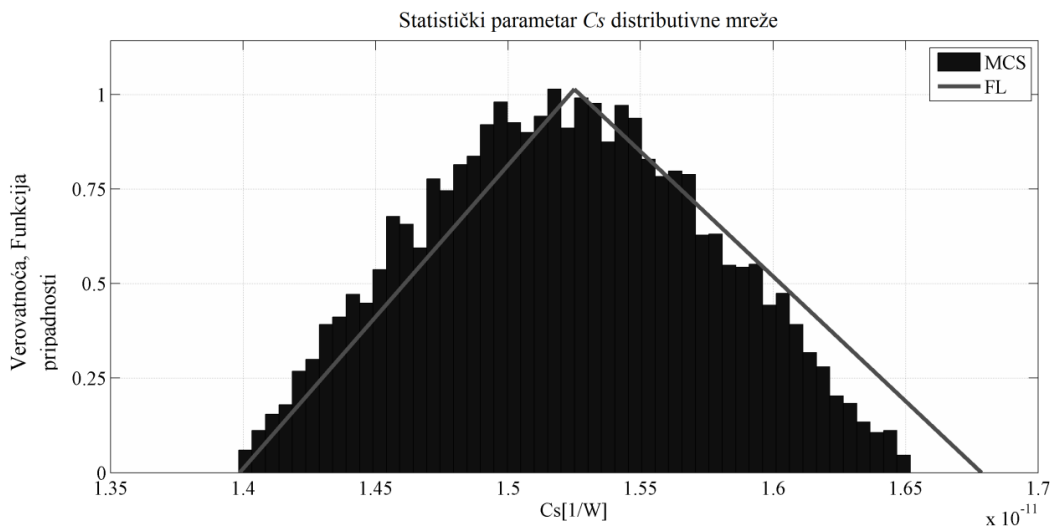
t [h]	Zimski period: ΔP_L [10^7 W] u formi Fuzzy broja	Zimski period: ΔP_L [10^7 W] defazifikovan	Letnji period: ΔP_L [10^7 W] u formi Fuzzy broja	Letnji period: ΔP_L [10^7 W] defazifikovan
1	0 0 0	0	0 0 0	0
2	0 0 0	0	0 0 0	0
3	0 0 0	0	0 0 0	0
4	0 0 0	0	0 0 0	0
5	0 0 0	0	0 0.0055 0.0094	0.0050
6	0 0 0	0	0.1530 0.2540 0.570	0.3257
7	0.0004 0.0050 0.0095	0.0050	0.1280 0.7550 1.2160	0.6997
8	0.0014 0.0249 0.3090	0.1118	0.5500 1.2440 1.9200	1.2380
9	0.2373 0.9478 1.5309	0.9053	0.7100 1.6400 2.8200	1.7233
10	0.3670 1.5753 2.1897	1.3773	0.8660 1.6700 3.3300	1.9553
11	0.4324 1.9571 2.8973	1.7623	0.9178 1.900 3.5100	2.1093
12	0.5618 2.1915 3.3649	2.0394	1.16 00 2.2400 3.7100	2.3700
13	0.4958 2.0253 3.2737	1.9316	1.1800 1.9600 3.5800	2.2400
14	0.4718 1.9417 2.7262	1.7132	0.9800 1.9600 3.3800	2.1067
15	0.1407 1.1275 1.9062	1.0581	0.8800 1.7600 3.1800	1.9400
16	0.2064 1.1835 1.5888	0.9929	0.6100 1.5400 2.7200	1.6233
17	0.00137 0.0247 0.3090	0.1117	0.6500 1.2440 2.2730	1.3890
18	0 0.0060 0.0289	0.0116	0.1380 0.5500 1.1160	0.6013
19	0 0.0001 0.0007	0.0003	0.1130 0.1940 0.4700	0.2590
20	0 0 0	0	0 0.0045 0.0084	0.0043
21	0 0 0	0	0 0.0000 0.0000	0
22	0 0 0	0	0 0 0	0
23	0 0 0	0	0 0 0	0
24	0 0 0	0	0 0 0	0

Na slici 6.10. prikazana je promena defazifikovane vrednosti smanjenja gubitaka aktivne snage ΔP_L u distributivnoj mreži za reprezentativan dan u zimskom periodu i u letnjem periodu u toku 2009. godine. Posmatrajući sliku 6.10. može se izvesti zaključak da je smanjenje gubitaka aktivne snage ΔP_L u distributivnoj mreži izraženije u toplijem delu godine, odnosno u letnjoj sezoni kada je proizvodnja fotonaponskih panela mnogo veća.



Slika 6.10. Promena defazifikovane satne vrednosti gubitaka aktivne snage za reprezentativan dan u zimskom i letnjem periodu u toku 2009. godine

Statistički parametar C_S je proračunat metodama izloženim u poglavljima 6.2 i 6.3, odnosno korišćenjem Fuzzy brojeva i Monte Carlo simulacije, i to u cilju verifikacije i komparacije rezultata dobijenih korišćenjem metode stohastičkog modela ekvivalenta distributivne mreže izložene u poglavlju 6.1. Histogram statističkog parametra C_S i njegov Fuzzy broj prikazani su na slici 6.11.



Slika 6.11. Statistički parametar procenjen korišćenjem Monte Carlo simulacije i Fuzzy logike

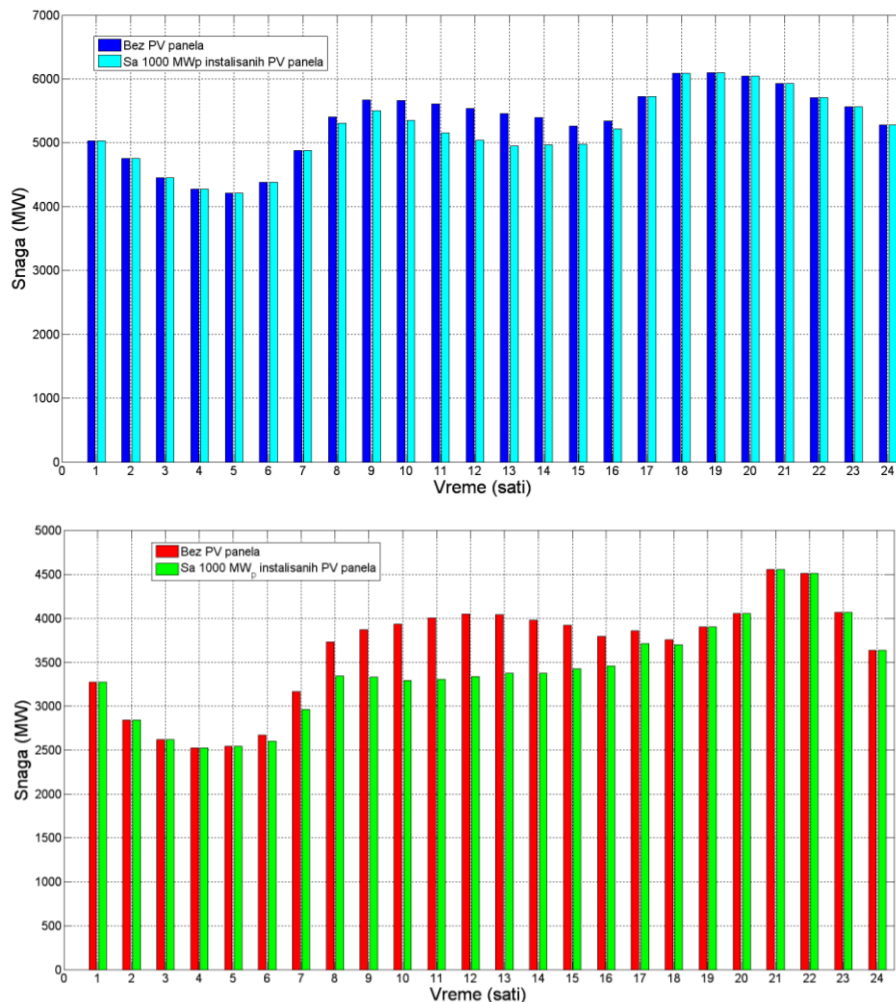
Rezultati komparativne analize tri metode su predstavljeni u tabeli 6.5. Dobijene su srednje vrednosti statističkog parametra C_S i srednje vrednosti smanjenja gubitaka aktivne snage ΔP_L za Distributivni sistem Srbije u 2009. godini korišćenjem stohastičke metode, Fuzzy logike i Monte Carlo simulacije.

Tabela 6.5. Srednje vrednosti statističkog parametra i smanjenja gubitaka aktivne snage za Distributivni sistem Srbije u 2009. godini

Metoda	Rezultati	$C_S [10^{-11}W^{-1}]$	$\Delta P_L [MW]$
Stohastička metoda		1.5325	22.1496
Fuzzy logika	Defazifikovana vrednost	1.5063	16.7149
Monte Carlo simulacija	Stvarna vrednost	1.5211	18.4420

Posmatrajući tabelu 6.5. i pregledom dobijenih rezultata može se zaključiti da sve tri metode daju jako slične rezultate za statistički parametar C_S , kao i za smanjenje gubitaka aktivne snage ΔP_L za Distributivni sistem Srbije u 2009. godini.

Slika 6.12. predstavlja prosečne promene dnevnog dijagrama snage injecciona u distributivni sistem za analizirane reprezentativne dane u zimskoj i letnjoj sezoni, ako bi u Distributivnom sistemu Srbije bilo instalirano 1000 MW_p fotonaponskih panela.



Slika 6.12. Usporedni vremenski dijagrami aktivne snage injecciona u Distributivni sistem Srbije za reprezentativni dan u toku perioda oktobar-mart i april-septembar pre i posle instalacije 1000 MW_p disperzovanih krovno i fasadno integrisanih fotonaponskih sistema

Na osnovu dijagrama prikazanih na slici 6.12. može se zaključiti da fotonaponski paneli utiču na smanjenje snage injektiranja u distributivni sistem u periodu dnevnog maksimuma opterećenja. Ovaj efekat je naročito izražen u toplijem delu godine, kada je proizvodnja fotonaponskih panela veća, a tako i korelisanost dnevne vršne snage potrošnje i vršne snage proizvodnje fotonaponskih panela bolja u odnosu na hladniji period godine.

Pod uslovom da se scenario integracije 1000 MW_p fotonaponskih panela u Distributivni sistem Srbije ostvari, gubici snage u distributivnom sistemu bi se smanjili za 7% na godišnjem nivou. Sve tri primenjene metode daju slične rezultate. Srednja godišnja snaga gubitaka bi bila smanjena za 22.1 MW, odnosno 193.6 GWh po godini, što predstavlja 15% od ukupne godišnje proizvodnje integrisanih 1000 MW_p fotonaponskih panela [104]. Ova ušteda se ostvaruje tokom perioda dnevne vršne potrošnje, a samim tim je i ekonomska vrednost uštede na tržištu električne energije za 20-30% viša u poređenju sa prosečnom dnevnom cenom električne energije na tržištu električne energije *EEX* [45].

Cilj ove analize je procena uticaja perspektivnih disperzovanih fotonaponskih sistema integrisanih u krovove i fasade zgrada na gubitke aktivne snage u Distributivnom sistemu Srbije. S obzirom na trendove razvoja fotonaponskih sistema, realnost ove pretpostavke može biti prihvatljiva u budućem distributivnom sistemu u Srbiji.

Radi verifikacije rezultata, korišćene su tri metode i izvršena je komparativna analiza kako bi se procenile snage gubitaka u distributivnom sistemu i na taj način sagledali efekti proizvodnje fotonaponskih sistema na smanjenje gubitaka aktivne snage u distributivnom sistemu. Razvojem i unapređenjem stohastičkog modela ekvivalenta mreže procenjen je efekat rada fotonaponskih sistema na smanjenje gubitaka aktivne snage u distributivnoj mreži. Razvijeni su matematički modeli za procenu uticaja disperzovanih fotonaponskih sistema na gubitke aktivne snage u distributivnoj mreži korišćenjem Fuzzy logike i Monte Carlo simulacije. Ukoliko merenja nisu dovoljno precizna niti dovoljno česta, najbolje je koristiti Fuzzy brojeve. Modelovanje profila potrošnje i proizvodnje fotonaponskih panela izvršeno je korišćenjem Fuzzy brojeva. Ovakav pristup je dosta napredniji, jer se na taj način omogućava uvažavanje promena u strukturi same distributivne mreže.

Proračuni pokazuju da se instalacijom krovno i fasadno integriranih fotonaponskih sistema mogu značajno smanjiti gubici aktivne snage u distributivnom sistemu.

Predložena metodologija je generalnog karaktera i moguće je primeti na bilo koji drugi distributivni sistem sa homogeno disperzovanim fotonaponskim sistemima, a ne samo na distributivni sistem u Srbiji. S tim u vezi sve tri metode mogu biti primenjene u svakom distributivnom sistemu u kom je planirana masovna instalacija krovno i fasadno integriranih fotonaponskih sistema.

U narednom poglavlju kroz primere na realnim distributivnim mrežama izvršiće se testiranje razvijenih modela.

6.5. Analiza gubitaka u realnoj distributivnoj mreži

U cilju verifikacije tri metode, koje su primenjivane u prethodnim poglavljima, kao i u pogledu analize uticaja disperzovanih fotonaponskih sistema na promenu gubitaka aktivne snage u distributivnoj mreži, urađena je analiza na primeru distributivne mreže realne konfiguracije.

Analiza uključuje srednjenaponske vodove realnih preseka i dužina pri čemu su korišćeni realni merni podaci o solarnoj iradijaciji i temperaturi ambijenta u toku 2009. godine iz poglavlja 6.4. za lokaciju Banat.

Distributivna mreža realne konfiguracije, koja je korišćena za analizu gubitaka aktivne snage, nalazi se u Banatu i prikazana je na slici 6.13.

Mreža je radijalna i napaja se u čvoru 1 iz TS 110/35 kV Zrenjanin.



Slika 6.13. Posmatrana srednjenaponska distributivna mreža u Banatu u Srbiji

Svi vodovi su nadzemni i izvedeni su sa provodnicima različitih poprečnih preseka. Parametri posmatrane distributivne mreže su dati u tabeli 6.6.

Kao što je već pomenuto u poglavlju 6.1, prva metoda tretira stohastički model ekvivalenta distributivne mreže. Tačan proračun gubitaka aktivne snage u distributivnoj mreži zahteva analizu tokova snaga po svim granama distributivne mreže. Metoda stohastičkog ekvivalenta distributivne mreže ne zahteva poznavanje svih parametara distributivne mreže, već samo bilanse ulazne i izlazne snage.

Za proračun tokova snaga u radijalnim mrežama razvijene su posebne metode. Jedna od njih je Shirmohamadijeva metoda koja se često koristi u distributivnim radijalnim i slaboupetljanim mrežama. Ova metoda prilikom proračuna polazi od činjenice da su poznate snage injektiranja u čvorove mreže, odnosno da su poznate snage potrošnje.

Tabela 6.6. Parametri posmatrane srednjenaponske distributivne mreže u Banatu

Vodovi	Dužina voda [km]	Pogonska rezistansa [Ω]	Naponski nivo [kV]	Aktivna snaga [kW]
1-2	0.7	0.4	35	0
2-3	4.1	1.7	35	0
3-4	5,4	0.64	35	0
4-5	13.4	5.5	35	0
5-6	1.9	1.2	35	0
6-7	1.96	0.6	35	0
6-9	5.0	3	35	0
7-8	0.4	0.1	35	0
10-11	1	0.433	20	869.40
11-12	2.5	1.083	20	802.60
12-13	2	0.866	20	1003.2
10-14	2	0.866	20	668.9
14-15	1.5	0.909	20	668.9
10-16	1.5	0.650	20	1337.6
10-17	1.5	0.650	20	802.6
17-18	1.5	0.909	20	535.0
19-20	1	0.433	10	1094.4
20-21	2	0.866	10	547.2
21-22	1.5	0.909	10	547.2
19-23	1	0.433	10	820.8
23-24	2	1.212	10	820.8
19-25	1.5	0.909	10	1094.4
25-26	2	1.212	10	547.2
12-27	3	0.957	20	0
25-28	2	0.866	10	0

U literaturi [84, 86] analiziran je uticaj promene gubitaka električne energije, promene napona, kao i ukupnog izobličenja harmonika u distributivnoj mreži. U literaturi koja se bavi tokovima snaga, najčešće se pretpostavlja da se sva distribuirana proizvodnja priključuje u jednom čvoru distributivne mreže. Planirano mesto priključenja se bira na osnovu indeksa stabilnosti napona koji je definisan u literaturi [145, 146].

Kako u distributivnim mrežama snage potrošnje u mnogim čvorovima nisu poznate, već se na određeni način procenjuju potrebno je uvesti veći stepen neizvesnosti u proračun tokova snaga, koji će pružiti širi uvid u mrežu kada snage i naponi u čvorovima variraju. Izmerene vrednosti solarne iradijacije i temperature ambijenta se takođe menjaju svakog trenutka.

Iz tog razloga druga metoda vrši proračun tokova snaga pomoću Fuzzy logike što predstavlja modifikaciju iterativne metode proračuna radijalnih i slaboupetljanih distributivnih mreža [147-149]. Ulazne promenljive su formirane na osnovu merenja solarne iradijacije, temperature ambijenta i snage injektiranja i predstavljene su kao Fuzzy brojevi, kao što je i opisano u poglavlju 6.2.

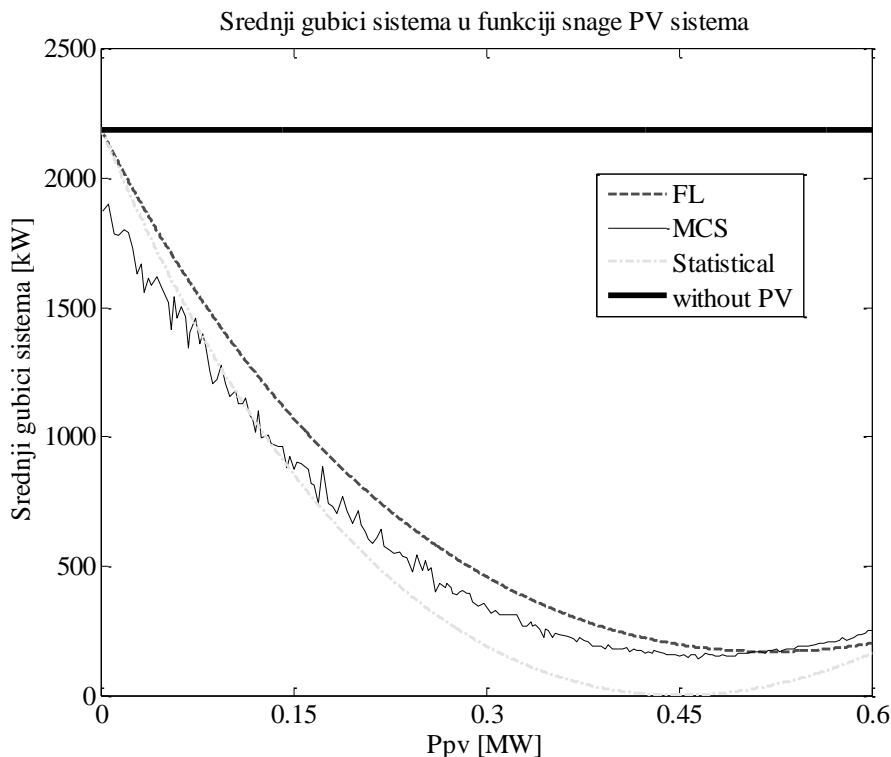
Kod treće metode proračun tokova snaga se vrši korišćenjem Monte Carlo simulacije, opisane u poglavlju 6.3. Promene distribuirane proizvodnje i potrošnje su slučajne i ne dešavaju se istovremeno. Radi bolje predstave izvora nesigurnosti i neodređenosti sistema ulazne podatke treba predstaviti kao slučajne promenljive tj. kao vrednosti iz nekih određenih izmerenih opsega. Snaga koju fotonaponski panel može da injektira u distributivnu mrežu P_{PVi} u svakom satu i u toku prosečnog dana je definisana relacijom (4.4), koja je detaljno objašnjena u poglavlju 4.2.

Opseg proizvodnje iz fotonaponskih sistema se formira na osnovu realnih merenja solarne iradijacije i temperature ambijenta (4.4) pomoću sledećih jednačina:

$$\begin{aligned}
 I_{PVmin} &= \min_{i=1,n}(I_{PVi}); T_{PVmin} = \min_{i=1,n}(T_{PVi}) \\
 I_{PVmax} &= \max_{i=1,n}(I_{PVi}); T_{PVmax} = \max_{i=1,n}(T_{PVi})
 \end{aligned}
 \tag{6.22}.$$

Promenljive su nasumično odabrane iz zadatog opsega snage i kao takve se koriste u pomenutim relacijama. Imajući za cilj sagledavanje efekata disperzovanih fotonaponskih elektrana na gubitke aktivne snage u distributivnoj mreži, fotonaponski sistemi će se homogeno rasporediti i priključiti u sve čvorove posmatrane srednjenaponske distributivne mreže.

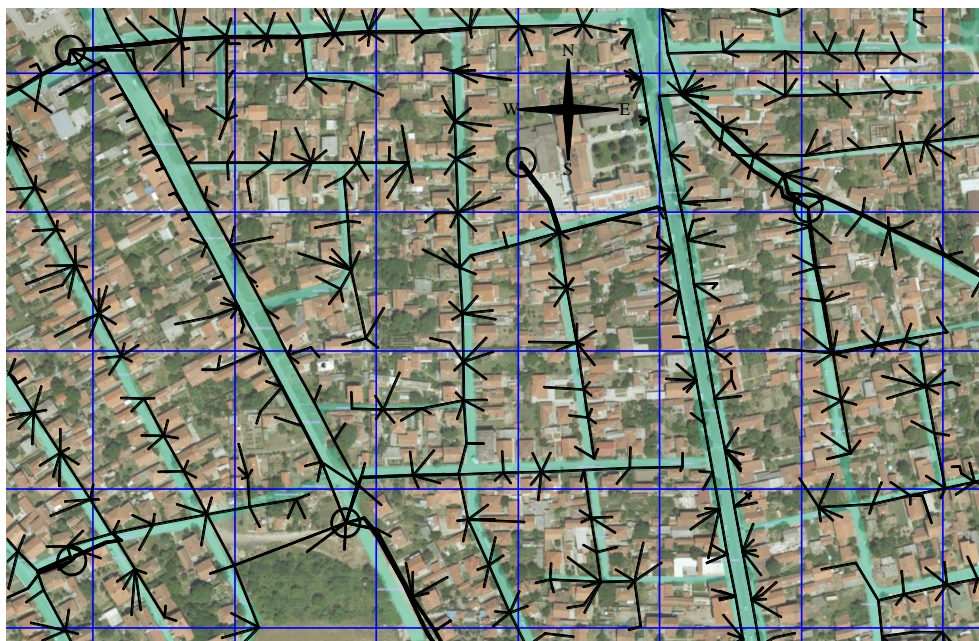
Analiza osetljivosti uticaja disperzovanih fotonaponskih sistema na gubitke aktivne snage u distributivnoj mreži, je prikazana variranjem snage proizvodnje instalisanih fotonaponskih sistema P_{PV} u opsegu od 0.01 MW do 0.6 MW. Slika 6.13. predstavlja vezu između srednje aktivne snage gubitaka distributivnog sistema P_L i izlazne snage fotonaponskih sistema P_{PV} . Na slici 6.13. su prikazani rezultati koji su dobijeni korišćenjem sve tri metode. Posmatrajući sliku 6.13. može se primetiti da snage gubitaka distributivne mreže variraju sa promenom solarne iradijacije. Očigledno je da su na ovaj način gubici aktivne snage posmatrane srednjenaponske distributivne mreže minimizirani. Na osnovu rezultata sa slike 6.14. se može izvesti zaključak da sve tri metode daju jako slične rezultate.



Slika 6.14. Srednji gubici aktivne snage distributivnog sistema u funkciji snage proizvodnje fotonaponskog sistema

Pored analize uticaja disperzovanih fotonaponskih sistema na promenu gubitaka aktivne snage u srednjenaponskoj distributivnoj mreži, urađena je analiza i na primeru niskonaponske distributivne mreže realne konfiguracije. Niskonaponska distributivna mreža realne konfiguracije, koja je korišćena za analizu gubitaka aktivne snage, nalazi se na području PD „Centar” d.o.o. Kragujevac, u Srbiji. Analiza je vršena na detaljnom modelu dela mreže koju napaja jedna transformatorska stanica (TS) 35/10 kV, koji uključuje mrežu naponskog nivoa 0.4 kV, mrežu naponskog nivoa 10 kV i samu TS 35/10 kV zaključno sa 35 kV sabirnicama. Odabran je deo mreže sa domaćinstvima kao dominantnom kategorijom potrošnje [150].

Niskonaponska mreža je prikazana na slici 6.15. zajedno sa geografskom podlogom koja prikazuje objekte koji čine konzum.



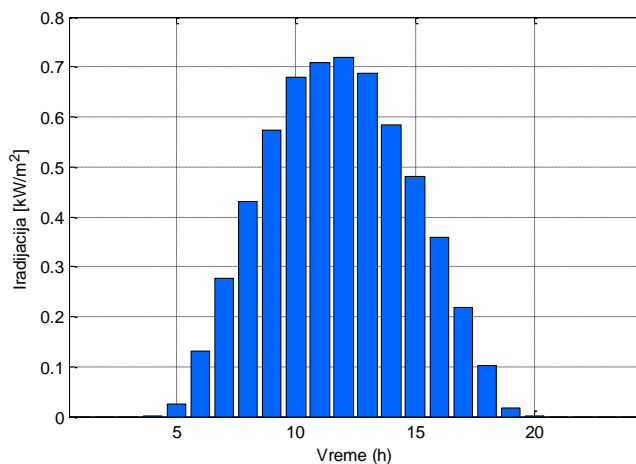
Slika 6.15. Posmatrana niskonaponska distributivna mreža [150]

U literaturi [150] opisan model niskonaponske mreže implementiran je u okviru programskog alata *DIgSILENT Power Factory* uz pomoć koga su vršeni proračuni tokova snaga u cilju određivanja gubitaka u niskonaponskoj mreži.

Proračun je vršen za svaki sat u toku dana za slučajeve sa i bez instalisanih fotonaponskih panela, pri čemu je rezultat pokazao da je prisustvo fotonaponskih panela povoljno uticalo na smanjenje gubitke u niskonaponskoj mreži. Gledano za celokupan dan, gubici električne energije za slučaj bez prisutnih fotonaponskih panela iznose oko 476 kWh, dok za slučaj sa fotonaponskim panelima iznose oko 368 kWh. Pokazano je da se na posmatranom delu mreže ostvaruje smanjenje gubitaka energije od 10.9 kWh, odnosno od 22.7% u slučaju prisustva fotonaponskih panela.

U cilju verifikacije rezultata dobijenih u literaturi [150] izvršen je proračun pomoću prve metode koja tretira stohastički model ekvivalenta distributivne mreže koja je detaljno opisana u poglavlju 6.1. Podaci koji su se koristili u proračunu su: snaga injektirana u mrežu $P_D = 1675.5$ kW, snaga predata potrošačima $P_C = 1655.76$ kW i snaga gubitaka $P_L = 19.88$ kW za slučaj kada fotonaponski paneli nisu instalirani. Posmatrajući sliku 6.3. ekvivalenta distributivne mreže za procenu gubitaka uočavamo da su svi ulazni podaci poznati, pa se tako korišćenjem relacije (6.1) dobija da statistički parametar C_S iznosi $7.085 \cdot 10^{-9} \text{ W}^{-1}$.

Radi modelovanja proizvodnje iz fotonaponskih panela korišćena su merenja srednjih desetominutnih vrednosti horizontalne iradijacije i temperature vazduha u toku meseca maja na lokaciji u blizini posmatrane niskonaponske mreže. Na osnovu tih vrednosti određen je dijagram koji pokazuje promene srednjih satnih vrednosti horizontalne iradijacije za prosečan dan u mesecu koji je prikazan na slici 6.16. [150].



Slika 6.16. Srednje satne vrednosti horizontalne iradijacije za prosečan dan u maju [150]

Na osnovu raspoloživih merenja za mesec maj izvršen je proračun srednjih satnih snaga proizvodnje fotonaponskog panela na ovoj lokaciji. U proračunu je pretpostavljeno da su fotonaponski paneli južno orijentisani i da su fiksno postavljeni pod nagibnim uglom od 45° . Za potrebe ove analize usvojeno je da su svi moduli istog tipa proizvođača *Kyocera* KC158G, dimenzija $1.29 \cdot 0.99 \text{ m}^2$ i efikasnosti 12.4%. Takođe, pretpostavljene su i uvažene sledeće karakteristike modula: $NOCT=47^{\circ}\text{C}$, koeficijent temperaturne promene efikasnosti $-0.5\%/^{\circ}\text{C}$, gubici usled zaprljanosti panela 4%, gubici usled neuparenosti modula u panelu 3% i EURO efikasnost invertora 95%.

Kada su poznati statistički parametar C_S i proizvodnja fotonaponskih panela P_{PV} , nije teško proračunati smanjenje snage gubitaka ΔP_L u distributivnoj mreži pomoću relacije (6.14).

Instalacijom fotonaponskih panela ukupne instalisane snage 890 kWp dobija se smanjenje gubitaka aktivne snage ΔP_L u niskonaponskoj distributivnoj mreži od 3.9540 kW, odnosno smanjenje gubitaka električne energije od 94.9 kWh, što je 19.94%. Razlika u odnosu na proračun gubitaka dobijenih na osnovu realnih tokova snaga i realnih otpornosti vodova je oko 12%, što je prihvatljivo za ovakve analize. Treba napomenuti da je za tačnost metode od suštinske važnosti što bolje proceniti parametar C_S . Na osnovu relacije (6.1) može se zaključiti da je za njegovu procenu potrebno poznavati naponske prilike u distributivnoj mreži. U prethodnoj analizi je usvojeno da napon u analiziranoj mreži ima nominalnu vrednost. Ukoliko bi se posedovali podaci o merenjima napona u napojnoj transformatorskoj stanici mogao bi se preciznije proračunati parametar C_S , a samim tim i pouzdanije proceniti efekti fotonaponskih sistema na gubitke aktivne snage u distributivnoj mreži.

Prednost predložene metode koja tretira stohastički model ekvivalenta distributivne mreže je u tome što se može primeniti na sve sredjenaponske i niskonaponske mreže koje su suviše složene i koje imaju dosta nepoznatih parametara. Još jednom je pokazano da stohastički model ekvivalenta distributivne mreže daje dosta dobre rezultate, kao i da masovna integracija fotonaponskih panela u postojeći distributivni sistem povoljno utiče na smanjenje gubitaka aktivne snage u distributivnoj mreži.

7. UTICAJ TEMPERATURE VAZDUHA I BRZINE VETRA NA EFIKASNOST FOTONAPONSKE ELEKTRANE

Za svaku fotonaponsku elektranu je izuzetno važno izvršiti analizu njene efikasnosti, kao i analizu svih parametara koji na nju mogu da utiču. Električna energija fotonaponskog sistema, koja se predaje elektroenergetskom sistemu svakodnevno, određuje se preko srednje dnevne insolacije, površine panela i srednje vrednosti efikasnosti. Kao vremenski period može se posmatrati jedan dan, mesec ili godina. Parametri koji utiču na efikasnost konverzije fotonaponske elektrane su:

- gubici u proizvodnji usled zaprljanosti panela i neuparenosti modula u panelu,
- smanjenje efikasnosti konverzije usled povećanja temperature panela,
- gubici u proizvedenoj snazi usled gubitaka u invertoru.

Koeficijent efikasnosti pokazuje koji deo energije Sunca se pretvara u električnu energiju i definiše se za standardne test uslove (*Standard Test Conditions - STC*). Pod standardnim test uslovima se podrazumevaju sledeći uslovi [4, 24]:

1. Fotonaponski panel je čist, bez prašine i drugih nečistoća koje su moguće u realnim uslovima,
2. Solarna iradijacija na površini panela je 1000 W/m^2 (jedno Sunce),
3. Temperatura ćelije je 25°C .
4. Koeficijent vazdušne mase je 1.5.

Koeficijent efikasnosti dostiže vrednost 15% sa tendencijom rasta, dok se vrednosti od 25% dobijaju u laboratorijskim uslovima. Izraz za koeficijent efikasnosti je:

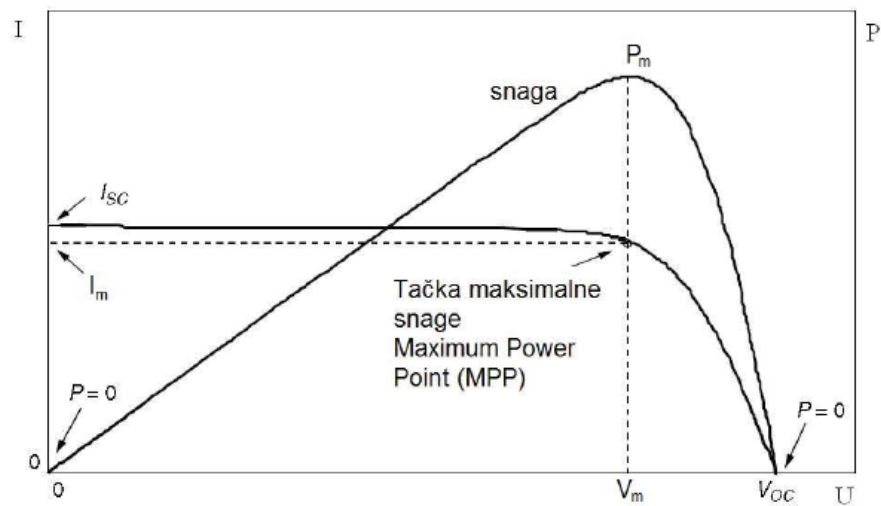
$$\eta_c = \frac{V_m \cdot I_m}{1000 [W/m^2] \cdot A [m^2]} \quad (7.1)$$

gde su: napon V_m i struja I_m pri maksimalnoj snazi, A - površina panela.

Realni uslovi rada odstupaju od standardnih, tako da se efikasnost panela i ostali tehnički parametri u realnim eksploatacionim uslovima u manjoj ili većoj meri razlikuju od standardnih.

Pored koeficijenta efikasnosti u bitne karakteristike fotonaponske ćelije spadaju: napon praznog hoda V_{OC} , struja kratkog spoja I_{SC} , tačka maksimalne snage P_m koja se postiže pri odgovarajućem naponu V_m i maksimalnoj struji I_m kao i faktor popunjenosti FF .

Tačka maksimalne snage predstavlja tačku na $U-I$ karakteristici fotonaponske ćelije u kojoj se nalazi teme pravougaonika najveće površine koji se može upisati ispod $U-I$ karakteristike. Na slici 7.1. je prikazana tačka maksimalne snage P_m , napon V_m i struja I_m pri maksimalnoj snazi.



Slika 7.1. $U-I$ karakteristika i kriva snage fotonaponske ćelije [4]

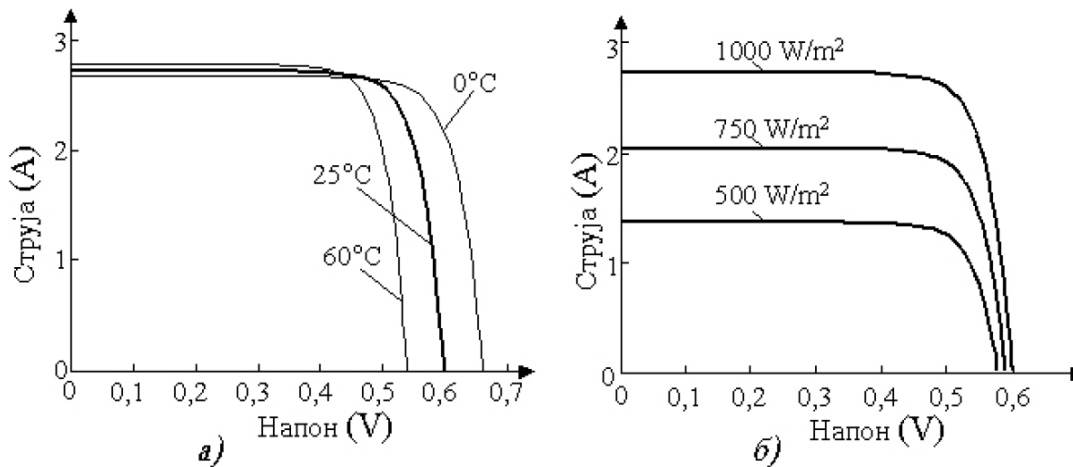
Faktor popunjenosti FF pokazuje koji deo pravougaonika dimenzija I_{SC} i V_{OC} je popunjen pravougaonikom maksimalne snage. Vrednosti faktora popunjenosti za realne fotonaponske ćelije su oko 0.7-0.8., dok izraz za faktor popunjenosti glasi [4]:

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{OC} \cdot I_{SC}} = \frac{P_m}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (7.2)$$

gde su: V_{OC} - napon praznog hoda, I_{SC} - struja kratkog spoja, P_m - tačka maksimalne snage.

Struja fotonaponske ćelije je direktno srazmerna sa iradijacijom. Što je veća osvetljenost ćelije, tj. iradijacija javlja se jača struja, odnosno stvara više parova elektron-šupljina.

Sa druge strane, iradijacija jako malo utiče na napon fotonaponske ćelije. Napon fotonaponske ćelije je direktno srazmeran sa temperaturom. Pri višim temperaturama elektroni imaju veću energiju, odnosno smanjuje se energetska barijera između provodne i valentne zone što utiče na smanjenje napona fotonaponske ćelije. Temperatura jako malo utiče na struju ćelije [23]. Zavisnost $U-I$ karakteristike od iradijacije i temperature je prikazana na slici 7.2. [4, 24].



Slika 7.2. Uticaj iradijacije i temperature na $U-I$ karakteristiku fotonaponske ćelije [4]

Posmatrajući sliku može se zaključiti da će se struja duplo smanjiti ukoliko se iradijacija upolovi, a samim tim i snaga, jer napon ćelije ostaje praktično nepromenjen. Tipična promena ovih veličina za fotonaponske ćelije od kristalnog silicijuma iznosi: $\Delta V_{oc} = -0.37\text{ \%}/^{\circ}\text{C}$, $\Delta I_{sc} = 0.05\text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ i $\Delta P_{DCmax} = -0.5\text{ \%}/^{\circ}\text{C}$. Da bi se ovaj uticaj uzeo u obzir, neophodno je poznavati temperaturu fotonaponske ćelije.

Temperatura fotonaponske ćelije je jedan od bitnih parametara koji utiču na efikasnost same ćelije. Povećanje temperature ćelije uzrokuje značajan pad efikasnosti. Na primer, ako je temperatura fotonaponskog modula 65°C , onda je njegova efikasnost oko 20% manja od deklarisanе efikasnosti, koja se odnosi na temperaturu modula od 25°C .

Da bi se mogla odrediti efikasnost panela pri različitim ambijentalnim uslovima potrebno je proračunati temperaturu tog panela. Na temperaturu fotonaponskog panela dominantno utiču snaga zračenja Sunca i uslovi hlađenja, tj. vetar.

U eksploatacionim uslovima može se direktno meriti temperatura fotonaponskih panela i sagledavati njen uticaj na efikasnost fotonaponske konverzije. Međutim, u fazi planiranja elektrana, za procenu njene proizvodnje, potrebno je estimirati temperaturu panela na osnovu izmerenih meteoroloških parametara. Postoje mnogi modeli preko kojih je temperatura fotonaponske ćelije T_c izražena u zavisnosti od meteoroloških parametara kao što su: ambijentalna temperatura (T_{amb}), lokalna brzina vetra (v) i solarna iradijacija (I). Cilj je da modeli koji opisuju korelaciju između solarne iradijacije, ambijentalne temperature, brzine vetra i temperature fotonaponskog modula budu što precizniji u determinisanju operativne temperature fotonaponske ćelije. Za determinisanje temperature T_c postoji više matematičkih modela od kojih svaki ima svoju grešku aproksimacije. U daljem tekstu su navedeni neki od modela koji se koriste za proračun temperature ćelije T_c , a koji su detaljnije opisani u literaturi [107, 109, 110, 112, 113].

7.1. David Faiman-ov model temperature fotonaponskog modula

David Faiman-ov model je dobijen iz balansa energije za fotonaponski modul i glasi [110]:

$$T_{mod} = T_{amb} + \frac{I}{U_0 + U_1 v} \quad (7.3)$$

gde su: T_{mod} - temperatura modula, T_{amb} - ambijentalna temperatura, I – solarna iradijacija, v - brzina vetra, U_0 ($W/^{0}Cm^2$) - koeficijent koji opisuje efekat iradijacije na temperaturu modula, U_1 ($Ws/^{0}Cm^3$) - koeficijent koji opisuje efekat hlađenja vetrom.

Koeficijenti U_0 i U_1 su dobijeni eksperimentalnim putem i imaju sledeće vrednosti:

- $U_0=26.89$ za pustinjske oblasti (eksperimenti su vršeni u pustinji Negev na jugu Izraelu)
- $U_0=28.04$ za planinske oblasti (eksperimenti su vršeni u Alpima)

- $U_I=6.18$ za pustinjske oblasti (eksperimenti su vršeni u pustinji Negev na jugu Izraelu)
- $U_I=7.77$ za planinske oblasti (eksperimenti su vršeni u Alpima).

Iz prethodne jednačine (7.3) može se dobiti realna operativna temperatura modula (*ROMT*), data sledećom jednačinom [110]:

$$ROMT = 20^\circ + \frac{800[W/m^2]}{(U_0 + U_1 v)} \quad (7.4)$$

Za module za koje su eksperimenti vršeni u pustinji Negev realna operativna temperatura modula (*ROMT*) je imala prosečnu vrednost 43.7°C , dok je njena realna vrednost 45.5°C . Ova temperatura se dobija tako što se fotonaponski moduli drže u tački maksimuma snage putem rezistivnog opterećenja. Relacija (7.4) se pokazala kao vrlo dobra za određivanje temperature fotonaponskog modula, čak i nakon samo jednog meseca monitoringa u pustinji, dok je za planinsku klimu potreban dugoročniji merni period za dobijanje uporedivih rezultata [110].

David Faiman-ov model zanemaruje uticaj infracrvenog dela spektra Sunčevog zračenja i prirodnu konvekciju, koji je primetan pri manjoj brzini vetra i manjoj iradijaciji. [107, 110].

7.2. **NOCT model temperature fotonaponskog modula**

Na temperaturu ćelije dominantno utiče solarna iradijacija i uslovi hlađenja, odnosno vetar. Za svaku fotonaponsku ćeliju proizvođač definiše temperaturu pri normalnim uslovima eksploatacije (*Normal Operation Cell Temperature* - *NOCT*). *NOCT* je temperatura ćelije pri ambijentalnoj temperaturi od 20°C , solarnoj iradijaciji od 800 W/m^2 i brzini vetra od 1 m/s . Parametar *NOCT* pri normalnim uslovima eksploatacije se dobija od proizvođača fotonaponskih panela [4, 109, 112].

NOCT model se uglavnom koristi za lako procenjivanje performansi fotonaponskog modula u toku godine. On je važan parametar u karakterizaciji fotonaponskog modula, jer opisuje kako će modul raditi u realnim uslovima [112].

Temperatura fotonaponske ćelije pri različitoj iradijaciji i ambijentalnoj temperaturi se može odrediti na osnovu sledeće jednačine:

$$T_c = T_a + \left(\frac{NOCT-20^\circ}{800 \text{ [W/m}^2\text{]}} \right) \cdot I \quad (7.5)$$

gde su: T_c - temperatura ćelije, T_a - temperatura ambijenta, I - solarna iradijacija na površini fotonaponske ćelije.

Uticao brzine vetra na temperaturu ćelije je dosta kompleksan i zavisi od nagiba modula. S obzirom da je pri standardnim uslovima pretpostavka da je vetar vrlo slab, nevažavanjem uticaja vetra na temperaturu fotonaponskih ćelija se ide na stranu sigurnosti [4, 105].

Ukoliko za neku fotonaponsku ćeliju podatak o *NOCT*-u nije dostupan, temperatura se može odrediti prema sledećoj aproksimativnoj formuli:

$$T_c = T_a + \gamma \cdot \left(\frac{I}{1 \text{ [kW/m}^2\text{]}} \right) \quad (7.6)$$

gde je γ - koeficijent proporcionalnosti koji zavisi od uslova hlađenja ćelije.

Tipična vrednost koeficijenta proporcionalnosti je između 25°C i 35°C, što znači da će pri iradijaciji od jednog Sunca temperatura ćelije biti za 25–35°C veća od temperature ambijenta.

7.3. Model Nacionalne Laboratorije Sandia za predviđanje temperature fotonaponskog modula

U cilju poboljšanja nedostataka *NOCT* modela za predviđanje temperature fotonaponskog modula, grupa istraživača u *Sandia National Laboratory* (SNL) u Sjedinjenim Državama, razvila je novi model. Ovaj model uključuje nekoliko parametara koji utiču na temperaturu fotonaponskog modula. Temperatura fotonaponskog modula je data sledećom relacijom [113]:

$$T_m = T_{amb} + I_t e^{(a+bV_w)} \quad (7.7)$$

gde su: a i b - empirijski koeficijenti, V_w - brzina vetra.

Pri konstantnoj brzini vetra, relacija (7.7) postaje analogna sa relacijom (7.5), jer je relacija za temperature fotonaponskog modula kod *NOCT* modela takođe konstantna vrednost pod specificiranom konstantnom brzinom vetra.

Temperatura fotonaponske ćelije se može pomoću *SNL* model determinisati za različite uslove za razliku od *NOCT* modela, ali je i dalje ostaje strogo empirijski model. Istraživači ove laboratorije su razvili bazu podataka za empirijske koeficijente za različite tipova fotonaponskih ćelija. Međutim, mana je što su svi dobijeni empirijski koeficijenti razmatrani za Novi Meksiko, u Sjedinjenim Državama, što automatski dovodi do ograničenja u primeni na druge oblasti kod kojih je klima drugačija [113].

7.4. Eksperimentalna analiza procene temperature fotonaponskog panela u realnim uslovima eksploatacije

Kao primer uzeta je realna fotonaponska elektrana nazivne snage 50 kW, koja je instalirana na krovu zgrade Instituta „Mihajlo Pupin” koji se nalazi u Zvezdarskoj šumi, u Beogradu [151,152]. Geografske koordinate ove fotonaponske elektrane su: N44⁰48'22" i E20⁰30'23". Na slici 7.3. je prikazana ova fotonaponska elektrana [138, 152]. Raspoloživa površina krova je bila dovoljna da se instalira 180 polikristalnih fotonaponskih modula snage 280 W proizvođača *Solar Schutten*.

Pod uticajem porasta temperature, napon se smanjuje, samim tim se smanjuje i snaga, dok je promena struje mala. Tipična promena ovih veličina za fotonaponske ćelije kod ovog tipa fotonaponskih modula proizvođača *Solar Schutten*, koji su postavljeni na krovu zgrade su: $\Delta V_{OC} = -0.346 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$, $\Delta I_{SC} = 0.065 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ i $\Delta P_{DCmax} = -0.488 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$.



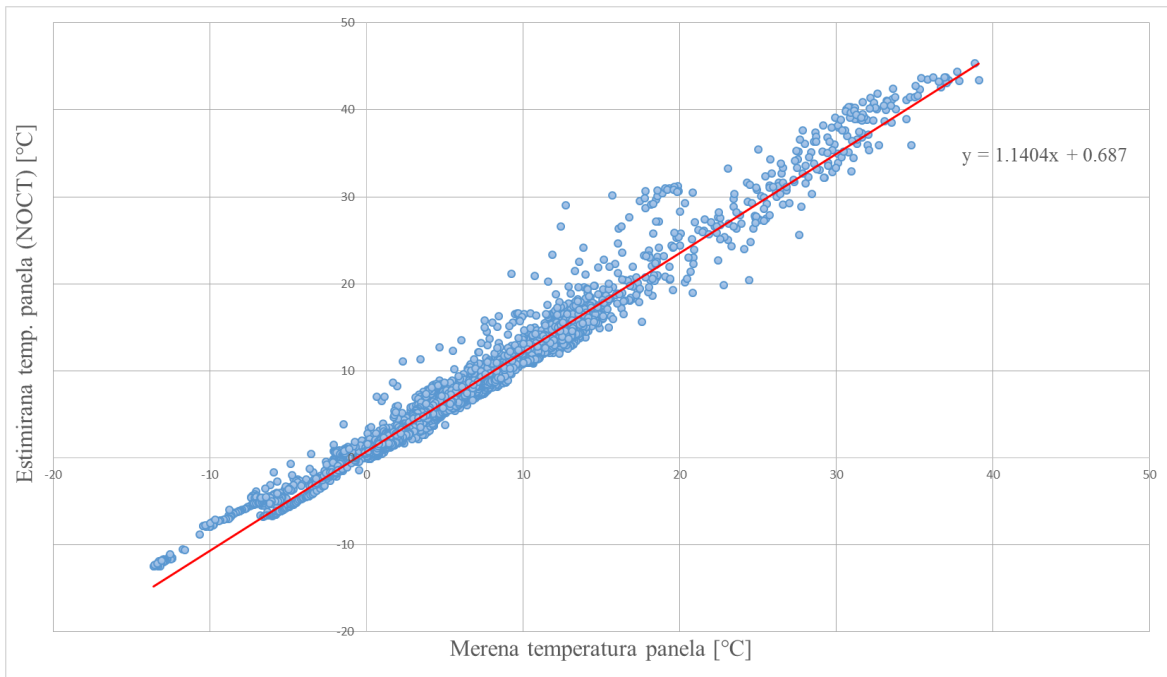
Slika 7.3. Fotonaponska elektrana na krovu zgrade Instituta „Mihajlo Pupin” [138]

Za dalju analizu odabrana su tri karakteristična meseca za zimsku, prolećnu i letnju sezonu, odnosno januar, maj i avgust u toku 2015. godine. Podaci i merenja za ova tri meseca, preuzeti su sa javno dostupne stranice na kojoj se prikazuju merenja relevantnih parametara rada pomenute fotonaponske elektrane [151]. Na raspolaganju su bili podaci o ambijentalnoj temperaturi, temperaturi fotonaponskog panela, brzini vetra, proizvodnji fotonaponskog panela, insolaciji, kao i o efikasnosti fotonaponskog panela.

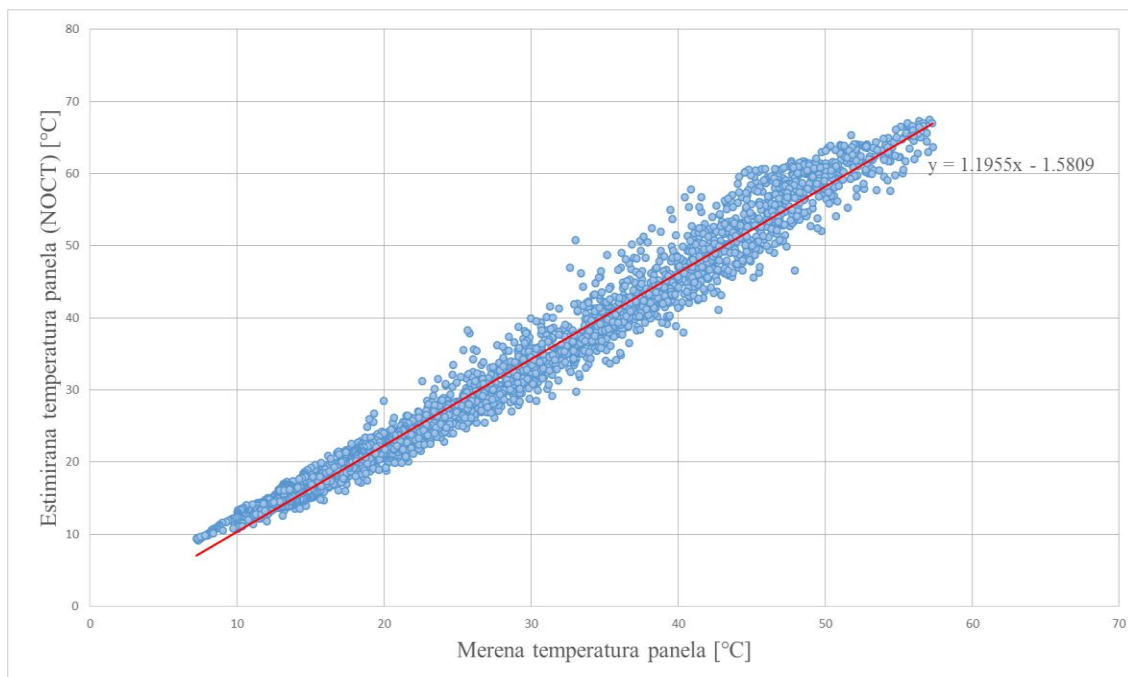
Izvršena je analiza korelacije estimirane temperature fotonaponskog panela pomoću dva modela i merene temperature fotonaponskog panela. Temperatura fotonaponskog panela je estimirana pomoću modela od kojih jedan ne uvažava, a drugi uvažava uticaj brzine vetra na temperaturu panela.

U prvoj analizi na osnovu desetominutnih merenja ambijentalne temperature i solarne iradijacije na pomenutoj lokaciji pomoću relacije (7.5) *NOCT* modela procenjena je temperatura fotonaponskog panela. Poređenje estimirane temperature fotonaponskog panela na osnovu pomenutog modela i merene temperature fotonaponskog panela je prikazano na slici 7.4. za sva tri karakteristična meseca.

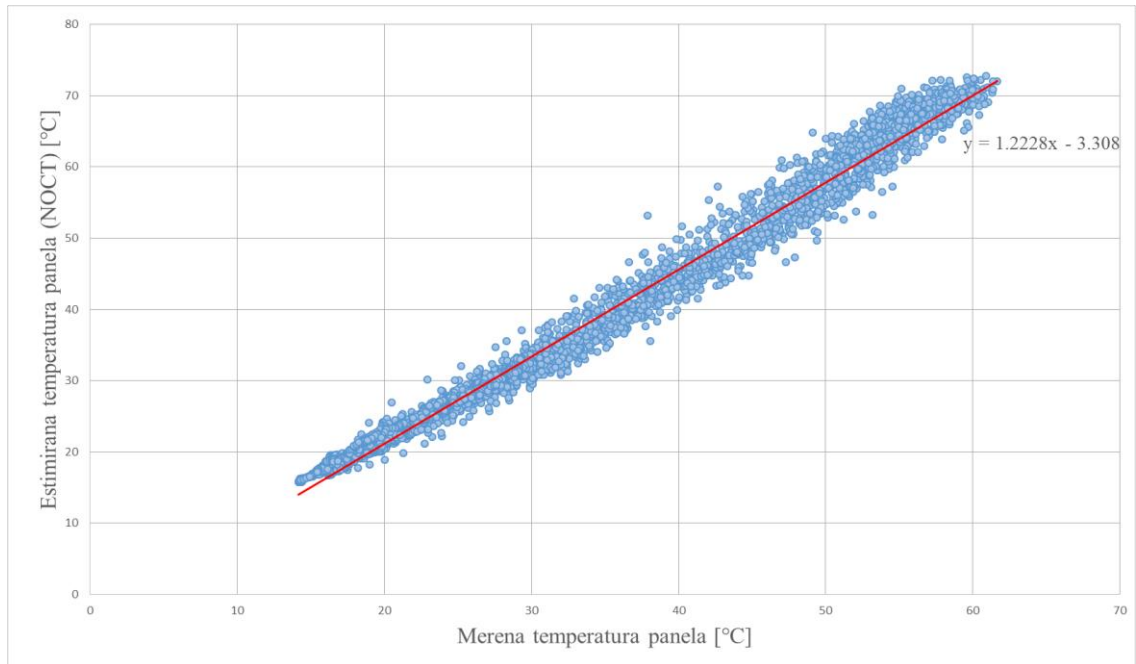
Uvažene su sledeće karakteristike fotonaponskog modula: $NOCT=46^{\circ}\text{C}$ i koeficijent temperaturne promene efikasnosti $-0.488\%/^{\circ}\text{C}$.



a)



b)



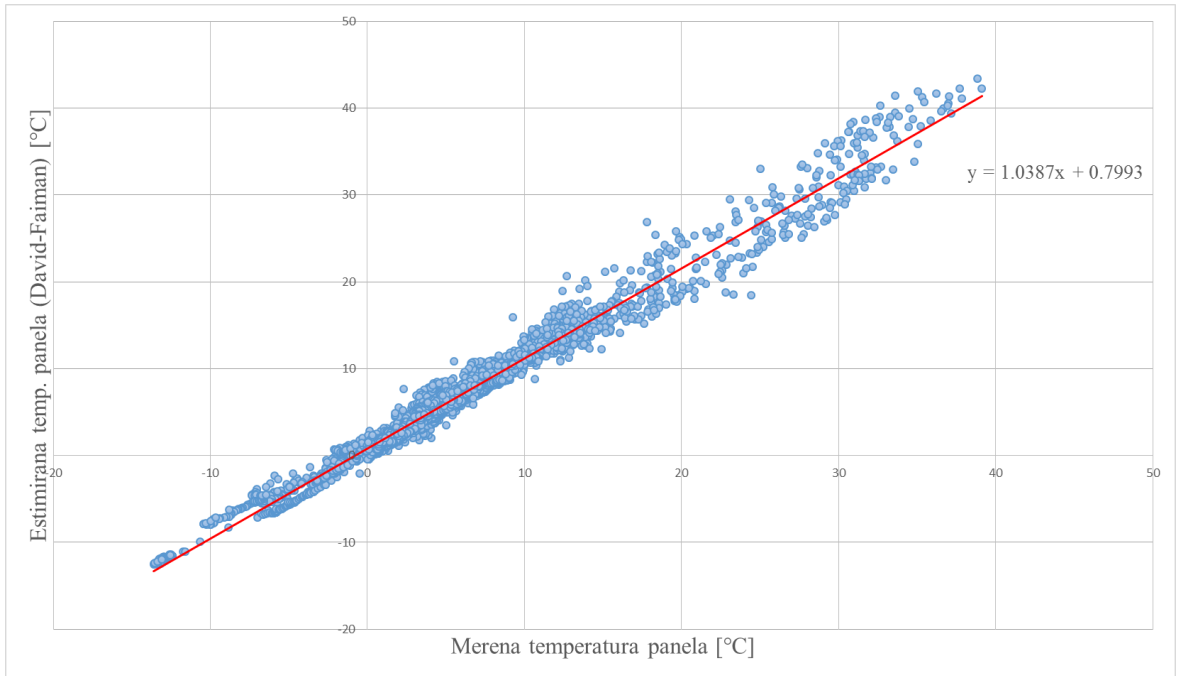
c)

Slika 7.4. Poređenje estimirane (*NOCT* model) i merene temperature fotonaponskog panela za a) januar, b) maj, c) avgust

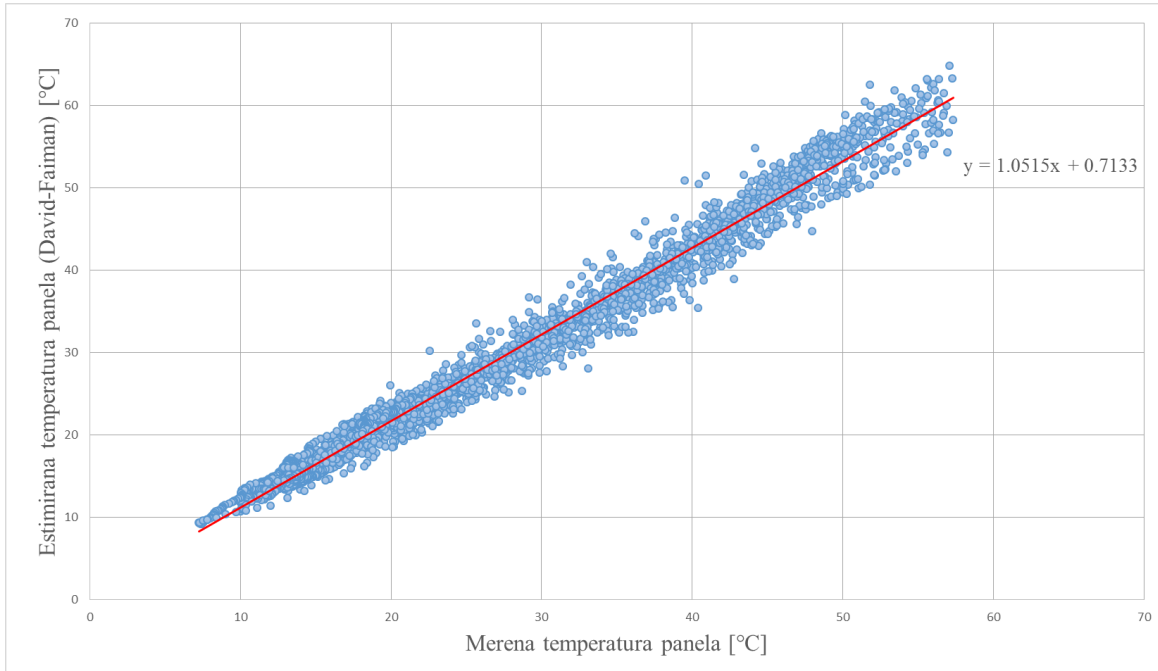
Na osnovu analiza dijagrama na slici 7.4. može se zaključiti da je estimirana temperatura fotonaponskog panela pomoću *NOCT* modela u proseku veća od izmerene. Ovo se može objasniti činjenicom da *NOCT* model pretpostavlja vrlo slabu brzinu vetra, od svega 1 m/s, pa su realni uslovi hlađenja često bolji od pretpostavljenih. Iz tog razloga je i stvarna temperatura niža od izmerene temperature.

U drugoj analizi na osnovu desetominutnih merenja ambijentalne temperature, solarne iradijacije i brzine vetra pomoću relacije (7.3) *David Faiman-ovog* modela procenjena je temperatura fotonaponskog panela. Uvažene vrednosti za koeficijent koji opisuje efekat iradijacije na temperaturu modula (U_0) i koeficijent koji opisuje efekat hlađenja vetrom (U_1) su: $U_0=27.47$ i $U_1=6.98$.

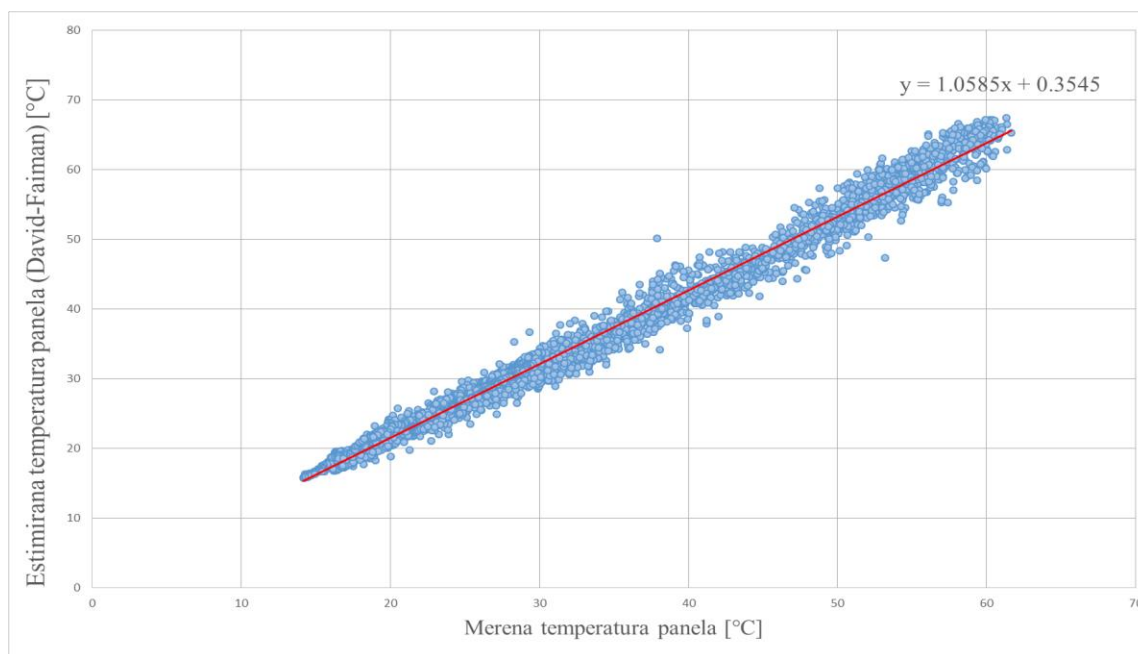
Poređenje estimirane temperature fotonaponskog panela na osnovu ovog modela i merene temperature fotonaponskog panela je prikazano na slici 7.5. za sva tri karakteristična meseca.



a)



b)



c)

Slika 7.5. Poređenje estimirane (*David Faiman-ov* model) i merene temperature fotonaponskog panela za a) januar, b) maj, c) avgust

Za sva tri karakteristična meseca je dobijena bolja korelacija estimirane temperature fotonaponskog panela prema *David Faiman-ovom* modelu, koji uvažava uticaj brzine vetra na temperaturu fotonaponskog panela, i merene temperature fotonaponskog panela, nego prema *NOCT* modelu. Ovo potvrđuje tvrdnju da na temperaturu fotonaponskog panela pored solarne iradijacije, dominantno utiče vetar.

U tabeli 7.1. prikazane su vrednosti koeficijenta korelacije kada su poređene merene temperature fotonaponskog panela i estimirane temperature fotonaponskog panela prema *NOCT* modelu i prema *David Faiman-ovom* modelu za sva tri karakteristična meseca u 2015. godini.

Tabela 7.1. Vrednosti koeficijenta korelacije

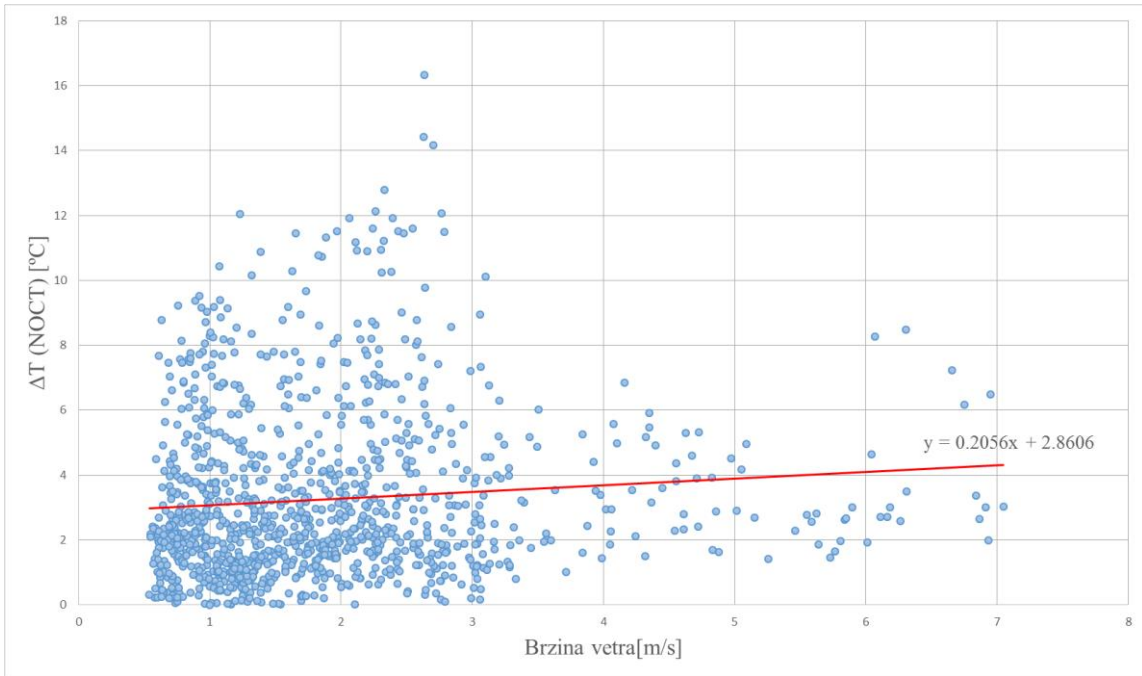
Mesec	Koeficijent korelacije	
	<i>NOCT</i> model	<i>David Faiman-ov</i> model
Januar	0.9852	0.9890
Maj	0.8456	0.9805
Avgust	0.9759	0.9769

Interesantno je analizirati promenu greške temperature fotonaponskog panela u zavisnosti od izmerene brzine vetra, pri čemu je greška temperature određena pomoću sledećeg izraza:

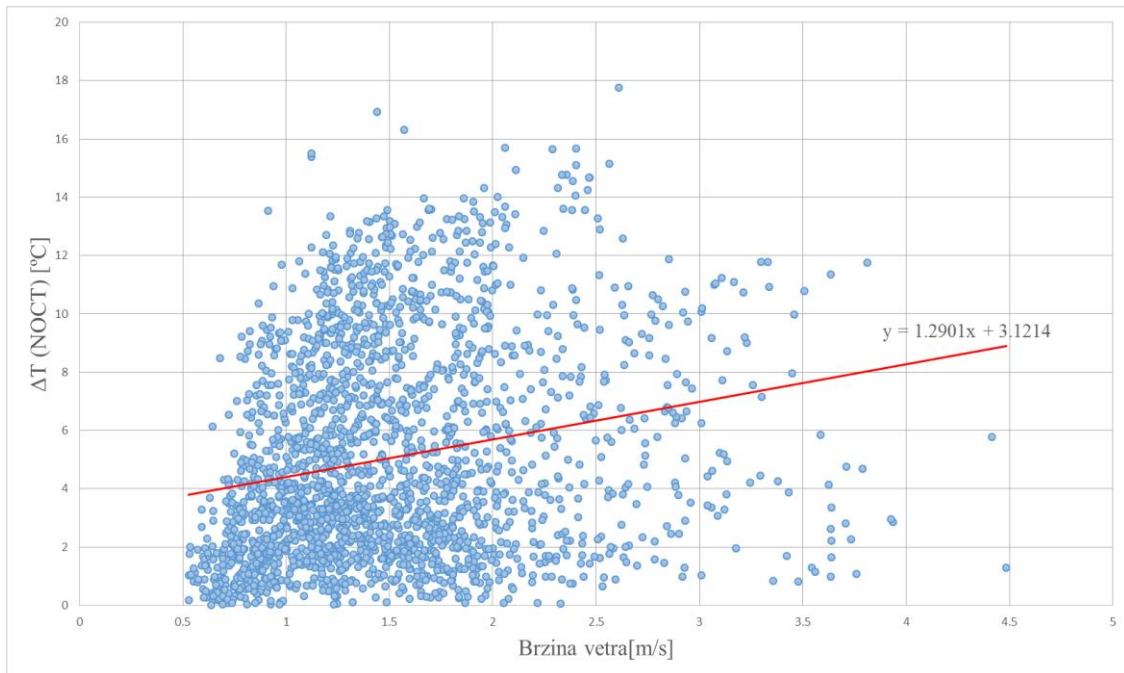
$$\Delta T = T_{estimirano} - T_{mereno} \quad (7.8)$$

gde je estimirana temperatura fotonaponskog panela, $T_{estimirano}$, estimirana pomoću dva modela.

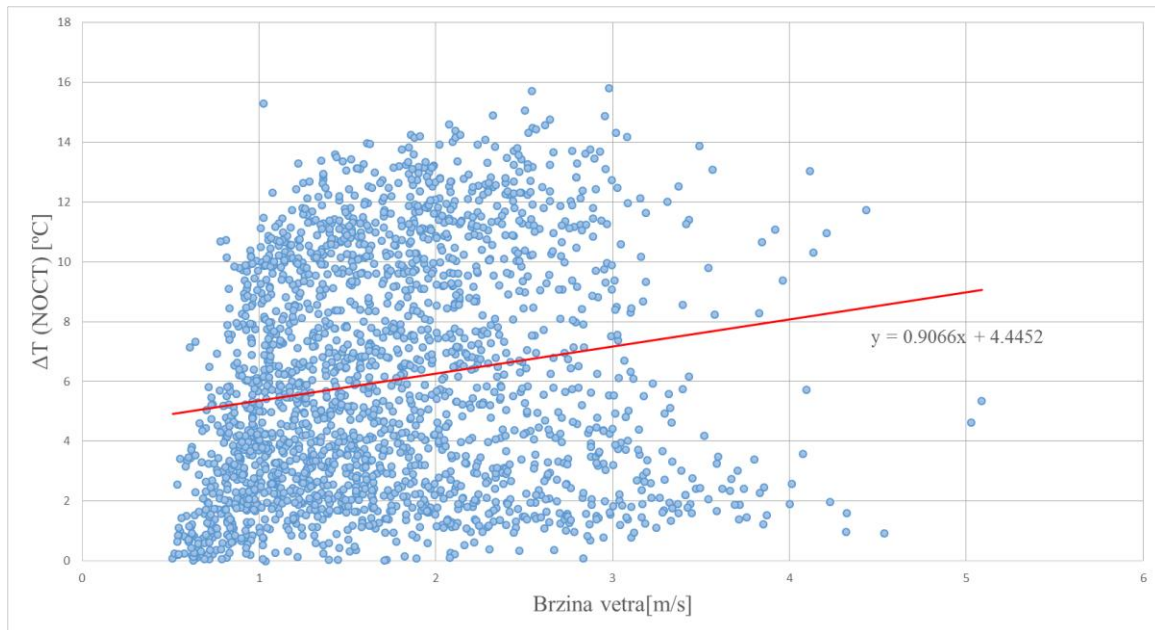
Prvi je *NOCT* model koji ne uvažava uticaj brzine vetra na temperaturu fotonaponskog panela, a drugi je *David Faiman-ov* model koji uvažava uticaj brzine vetra na temperaturu panela. Promena greške temperature fotonaponskog panela u zavisnosti od brzine vetra pri čemu je za estimiranu temperaturu korišćen *NOCT* model je prikazana na slici 7.6.



a)



b)

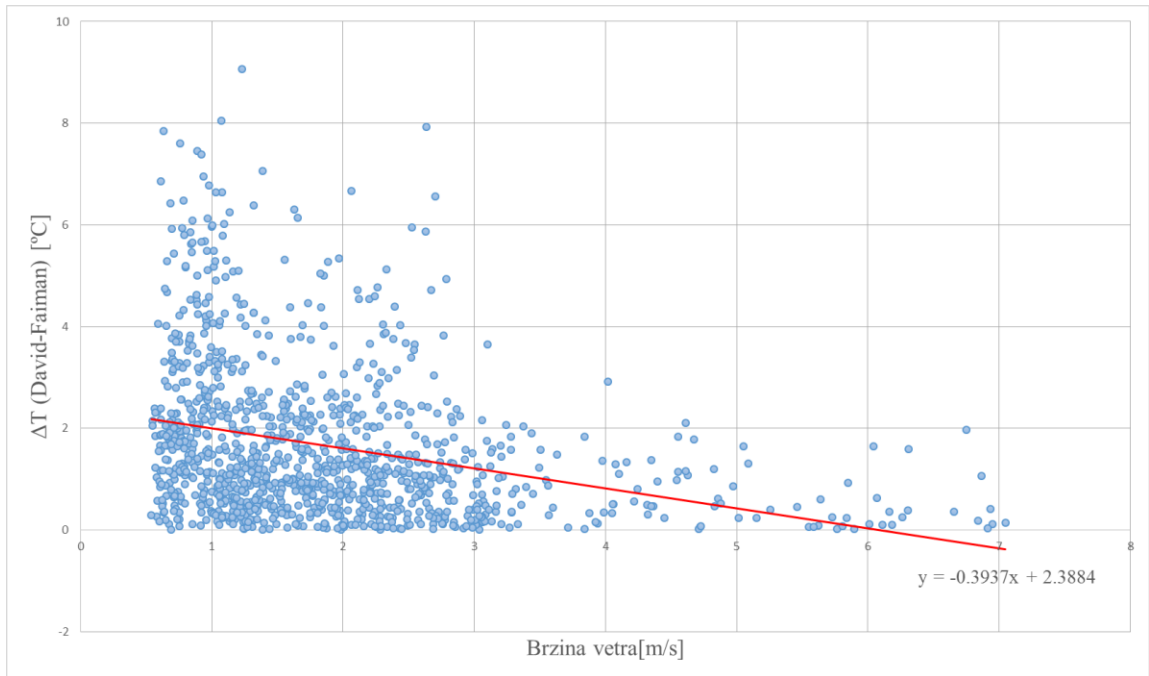


c)

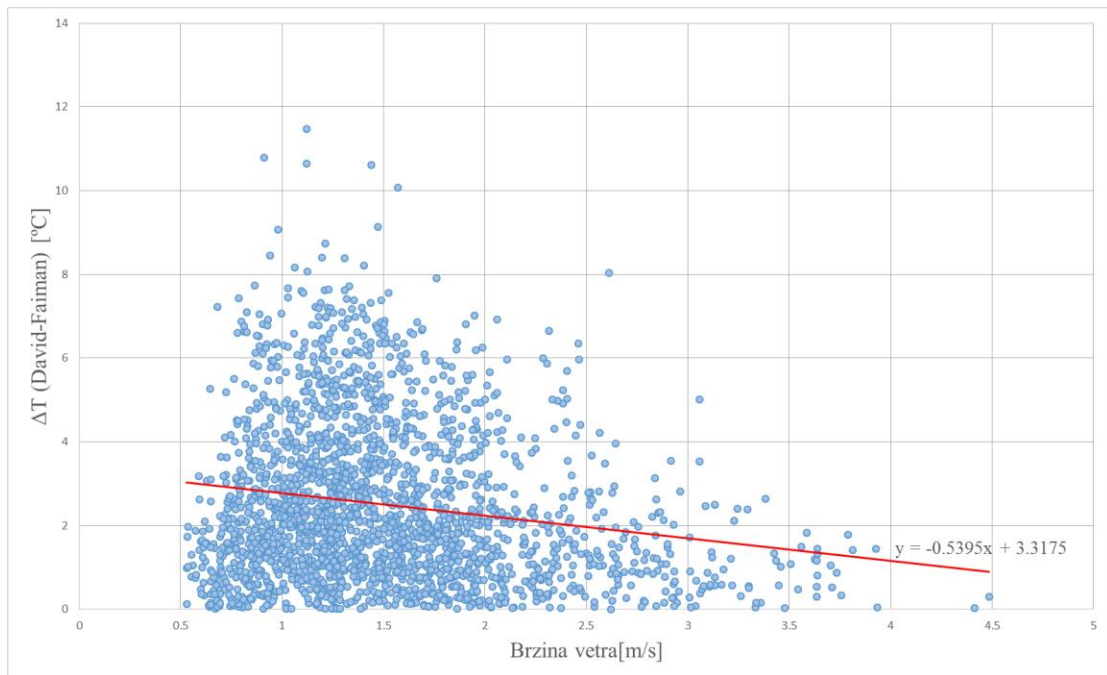
Slika 7.6. Promena greške temperature fotonaponskog panela u zavisnosti od brzine vetra (*NOCT* model) za a) januar, b) maj, c) avgust

Na slici 7.7. je prikazana promena greške temperature fotonaponskog panela u zavisnosti od brzine vetra pri čemu je za estimiranu temperaturu korišćen *David Faiman-ov* model.

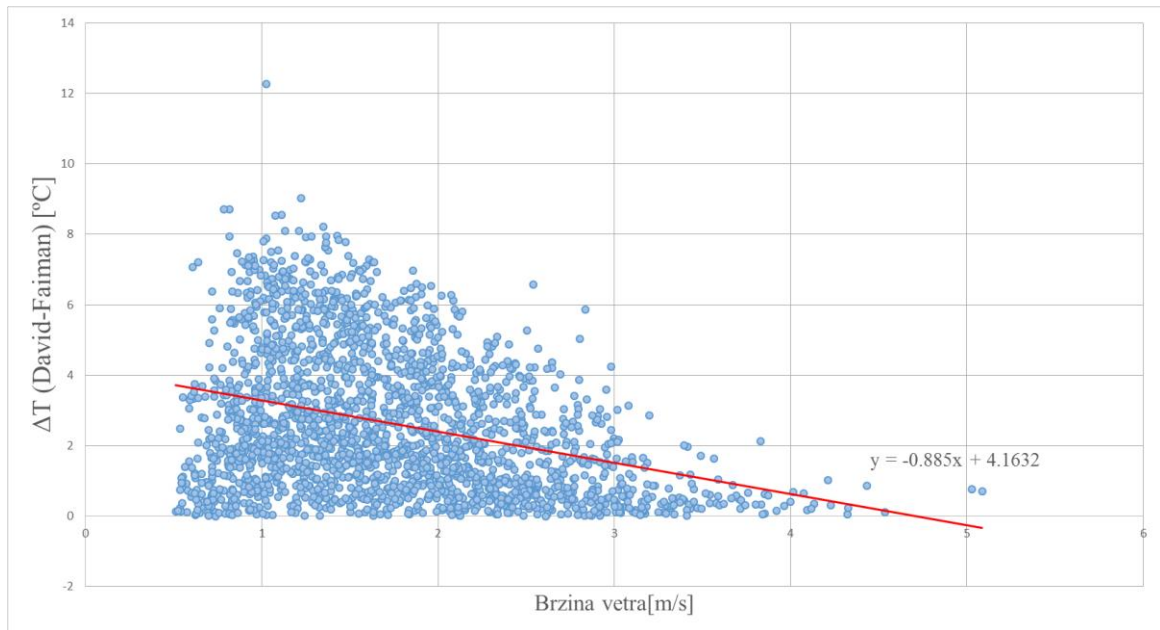
U oba slučaja analize su urađene za sva tri karakteristična meseca.



a)



b)



c)

Slika 7.7. Promena greške temperature fotonaponskog panela u zavisnosti od brzine vetra (*David Faiman-ov* model) za a) januar, b) maj, c) avgust

Na osnovu dobijenih grafika prikazanih na slikama 7.6. i 7.7. može se izvesti zaključak da je trend promene greške temperature fotonaponskog panela u zavisnosti od brzine vetra potpuno različit.

S povećanjem brzine vetra greška se smanjuje za slučaj kada je temperatura fotonaponskog panela estimirana pomoću *David Faiman-ovog* modela, koji uvažava uticaj brzine vetra, dok se za slučaj kada je temperatura fotonaponskog panela estimirana pomoću *NOCT* modela koji ne uvažava uticaj brzine vetra, ona povećava.

Na ovaj način je još jednom potvrđeno da vetar bitno utiče na temperaturu fotonaponskog panela i da se mora uvažiti pri proračunima efikasnosti fotonaponskih panela.

7.5. Eksperimentalna analiza procene efikasnosti fotonaponskog panela u realnim uslovima eksploatacije

U ovom poglavlju je vršena analiza uticaja temperature fotonaponskog panela na njegovu efikasnost η_c .

Maksimalna snaga fotonaponske ćelije definisana je izrazom [107, 108]:

$$P_m = V_m \cdot I_m = (FF) \cdot V_{OC} \cdot I_{SC} \quad (7.9)$$

pri čemu je napon otvorenog kola:

$$V_{OC} = V_{OC_0} [1 + \beta(I_{T_0})(T_c - T_0)] \left[1 + \delta(T_c) \ln \left(\frac{I_T}{I_{T_0}} \right) \right] \quad (7.10)$$

dok je struja kratkog spoja:

$$I_{SC} = \frac{I_T}{I_{T_0}} I_{SC_0} [1 + \alpha(T_c - T_0)] \quad (7.11)$$

gde su: α - strujni koeficijent za temperaturu, β - naponski koeficijent za temperaturu, δ - korekcionni koeficijent za solarnu iradijaciju, T_c - temperatura solarne ćelije, T_0 - temperatura ambijenta u referentnim uslovima, I_T - solarna iradijacija na površini fotonaponskog panela, I_{T_0} - solarna iradijacija od 1000 W/m² (snaga jednog Sunca), FF - faktor popunjenosti.

Iz gornjih izraza može se zaključiti da napon otvorenog kola i faktor popunjenosti opadaju značajno sa temperaturom, dok struja kratkog spoja raste, ali blago. Ovaj efekat se može interpretirati sledećom relacijom za efikasnost fotonaponske ćelije [107, 108]:

$$\eta_c = \eta_{T_{ref}} [1 - \beta_{ref}(T_c - T_{ref}) + \gamma \log_{10} I_T] \quad (7.12)$$

gde je $\eta_{T_{ref}}$ - efikasnost ćelije na referentnoj temperaturi T_{ref} i pri iradijaciji od 1000 W/m².

Temperaturni koeficijent β_{ref} i koeficijent iradijacije γ su uglavnom svojstva materijala i za fotonaponske module od kristalnog silicijuma imaju vrednosti od oko 0.004 K⁻¹ i 0.12, respektivno. Vrednost koeficijenta iradijacije γ je obično nula, tako da prethodna jednačina postaje [107, 108]:

$$\eta_c = \eta_{T_{ref}} [1 - \beta_{ref} (T_c - T_{ref})] \quad (7.13)$$

koja predstavlja linearnu zavisnost efikasnosti fotonaponske ćelije.

Vrednosti efikasnosti na referentnoj temperaturi $\eta_{T_{ref}}$ i temperaturnog koeficijenta β_{ref} obično daje proizvođač fotonaponskih modula. Međutim, ove vrednosti se mogu dobiti iz oglada u kom se električni izlaz modula meri pri dve različite temperature za datu iradijaciju. Stvarna vrednost temperaturnog koeficijenta ne zavisi samo od fotonaponskog materijala već i od referentne temperature T_{ref} i ona je data sledećom relacijom [107, 108]:

$$\beta_{ref} = \frac{1}{T_0 - T_{ref}} \quad (7.14)$$

u kojoj je T_0 vrlo visoka temperatura pri kojoj efikasnost fotonaponskog modula pada na nulu. Za solarne ćelije od kristalnog silicijuma ova temperatura iznosi 270 °C.

Električna energija fotonaponskog sistema, koja se predaje elektroenergetskom sistemu svakodnevno, određuje se preko srednje dnevne insolacije, površine fotonaponskog panela i srednje vrednosti efikasnosti. U realnim eksploatacionim uslovima snaga koju fotonaponski sistem predaje mreži je manja od snage na priključcima modula pri standardnim test uslovima zbog gubitaka, odnosno efikasnosti konverzije. Snaga koju fotonaponski sistem predaje mreži:

$$P_{AC} = P_{DC(STC)} \cdot \eta \quad (7.15)$$

gde su: $P_{DC(STC)}$ - snaga na priključcima modula pri STC , P_{AC} – snaga koju fotonaponski sistem predaje mreži i η - efikasnost konverzije.

Na efikasnost konverzije utiče više faktora, pa se tako uzimaju u obzir gubici u proizvodnji usled zaprljanosti i neuparenosti modula u panelu koji pojedinačno uzrokuju gubitke od oko 3%, zatim se uvažava smanjenje efikasnosti konverzije usled promene temperature i uvažavaju se gubici u proizvedenoj snazi usled efikasnosti invertora, kao i usled efikasnosti solarnih modula. Ove dve poslednje veličine daju proizvođači fotonaponskih panela i invertora. Na osnovu ovoga može se napisati sledeća relacija za efikasnost konverzije:

$$\eta = \eta_{INV} \cdot \eta_T \cdot \eta_Z \cdot \eta_N \cdot \eta_M \quad (7.16)$$

gde su: η_{INV} - efikasnost invertora, η_T - smanjenje efikasnosti usled povećanja temperature, η_Z - smanjenje efikasnosti usled zaprljanja modula, η_N - smanjenje efikasnosti usled neuparenosti modula u panelu, η_M - efikasnost samih modula.

Dnevni dijagrami snage proizvodnje fotonaponskog sistema se mogu predstaviti sledećom relacijom:

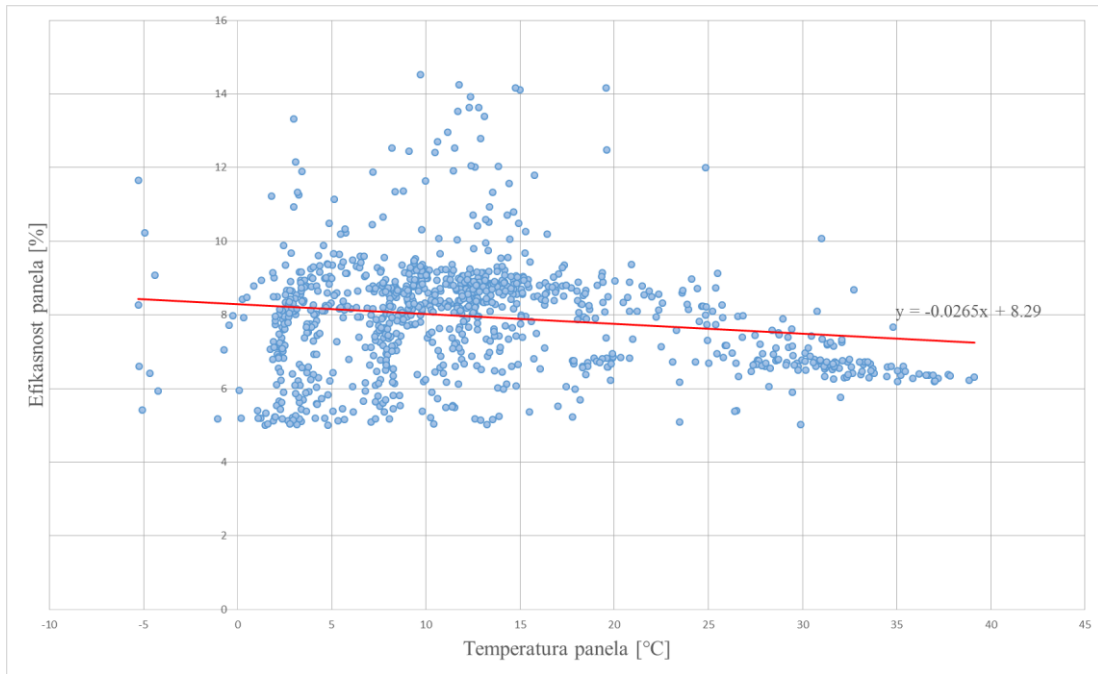
$$P_{AC}[kW] = I_{PV}[kW/m^2] \cdot A[m^2] \cdot \eta \quad (7.17)$$

gde su: I_{PV} - solarna iradijacija na fotonaponski panel, A - površina panela, η – efikasnost konverzije.

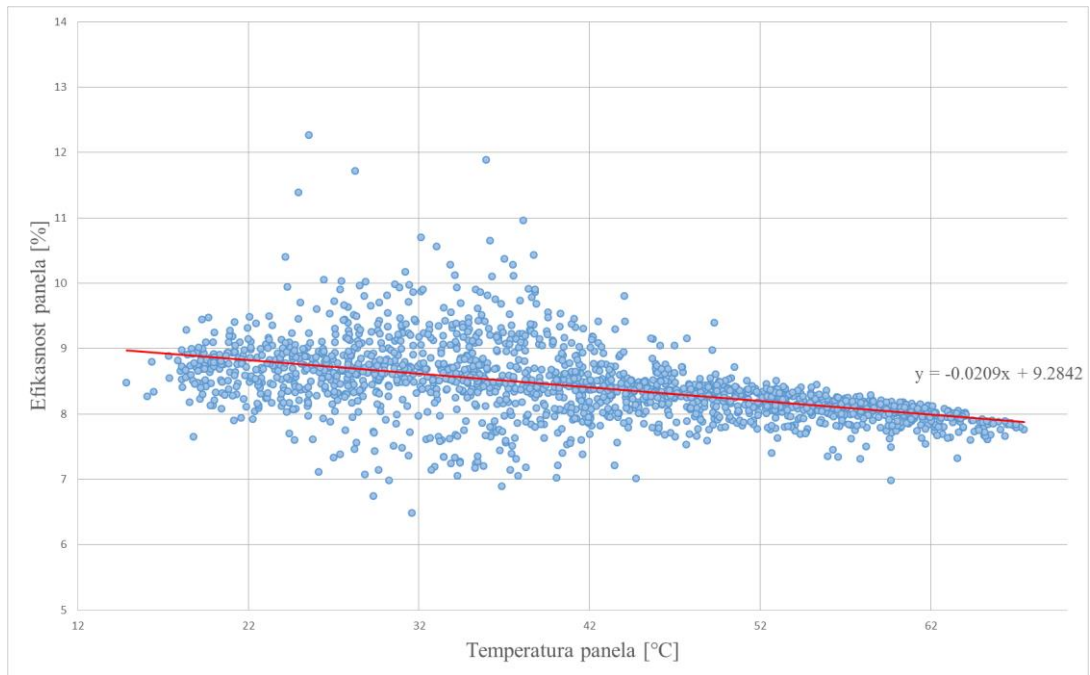
Temperatura fotonaponske ćelije je jako važan parametara koji utiče na efikasnost fotonaponske ćelije. Izvršena je analiza efikasnosti realne fotonaponske elektrane na krovu zgrade Instituta „Mihajlo Pupin” u vremenskom periodu od godinu dana, pri čemu je pokazano kako se menja efikasnost konverzije u zavisnosti od temperature.

Vrednost realne efikasnosti se može odrediti na osnovu stvarnih merenja. Na osnovu merenja solarne iradijacije na fotonaponski panel i dnevnog dijagrama proizvodnje fotonaponske elektrane na krovu zgrade Instituta „Mihajlo Pupin” preuzetih sa javno dostupne stranice na kojoj se prikazuju merenja relevantnih parametara rada pomenute fotonaponske elektrane [151], izvršen je proračun koeficijenta efikasnosti.

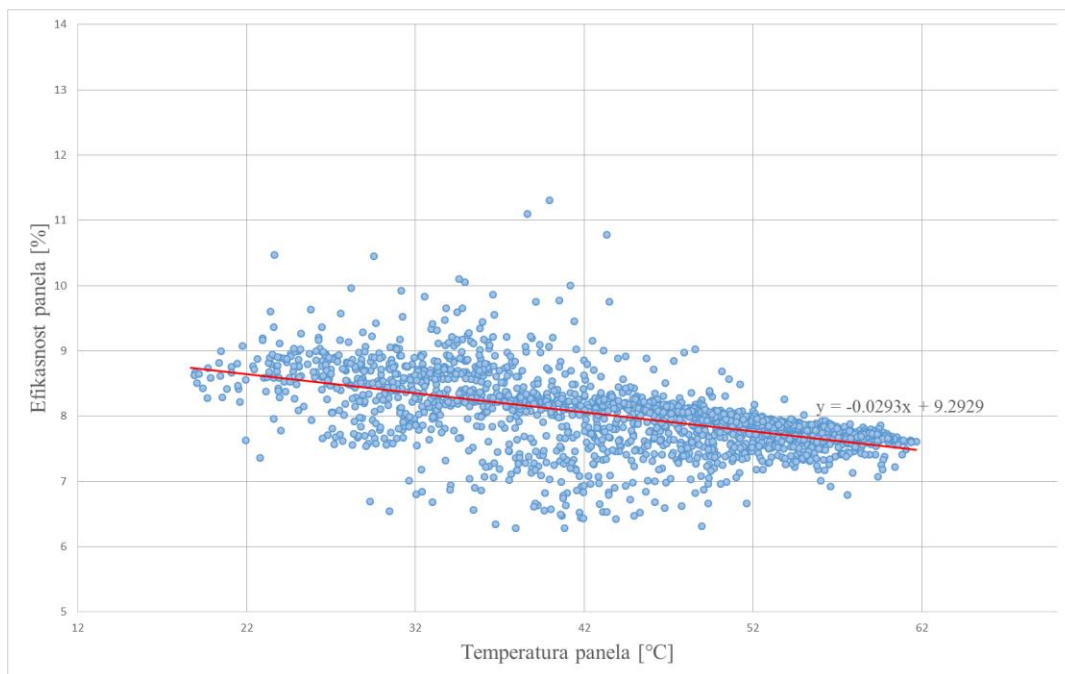
Zavisnost koeficijenta efikasnosti od merene temperature fotonaponskog panela prikazana je na slici 7.8. za sva tri karakteristična meseca 2015. godine. Ukupna površina fotonaponske elektrane postavljene na krov zgrade iznosi 332 m², a površina jednog fotonaponskog modula 1.84 m² [152].



a)



b)



c)

Slika 7.8. Zavisnost efikasnosti fotonaponskog panela od merene temperature fotonaponskog panela za a) januar, b) maj, c) avgust

Efikasnost konverzije u velikoj meri zavisi od temperature. Primećuje se da ukoliko je proizvodnja fotonaponske elektrane veća, a to znači da su i vremenske prilike u datom trenutku bolje, odnosno da su temperatura i iradijacija veće. Porastom temperature opada efikasnost konverzije, pa se može zaključiti da ove dve veličine imaju promene u suprotnom smeru za isti vremenski trenutak.

Vrednost teorijske efikasnosti se određuje pomoću izraza (7.16). Usvojene su sledeće karakteristike fotonaponskog modula koje daje proizvođač: smanjenje efikasnosti konverzije usled zaprljanja panela od 3%, efikasnost invertora 98% i efikasnost modula 14.9%. Smanjenje efikasnosti usled neuparenosti modula u panelu je zanemarena.

Uvažava se smanjenje efikasnosti usled povećanja temperature:

$$\eta_T = 1 - 0.005(T_C - 25^\circ) \quad (7.18)$$

pri čemu je koeficijent temperaturne promene efikasnosti $-0.5 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$. Teorijska efikasnost se određuje kao proizvod svih gore pomenutih efikasnosti shodno relaciji (7.16).

Smanjenje efikasnosti usled povećanja temperature je određeno za dva slučaja, a to su slučaj kada je temperatura fotonaponskog panela estimirana pomoću modela koji ne uvažava uticaj brzine vetra na temperaturu panela i za slučaj kada je temperatura fotonaponskog panela estimirana pomoću modela koji uvažava uticaj brzine vetra na temperaturu panela.

U prvoj analizi na osnovu dostupnih desetominutnih merenja ambijentalne temperature i solarne iradijacije na pomenutoj lokaciji pomoću relacije (7.5) *NOCT* modela procenjena je temperatura fotonaponskog panela koja figuriše u izrazu (7.18). Uvažene su sledeće karakteristike fotonaponskog modula: $NOCT=46^{\circ}\text{C}$ i koeficijent temperaturne promene efikasnosti $-0.5 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$.

U drugoj analizi pomoću relacije (7.3) *David Faiman-ovog* modela procenjena je temperatura fotonaponskog panela koja figuriše u izrazu (7.18). Uvažene vrednosti za koeficijent koji opisuje efekat iradijacije na temperaturu modula (U_0) i koeficijent koji opisuje efekat hlađenja vetrom (U_1) su: $U_0=27.47$ i $U_1=6.98$.

Analiza je pokazala da je merena efikasnost manja od teorijske, odnosno proračunate efikasnosti. Što je viša temperatura ambijenta, efikasnost panela tokom eksploatacionog perioda opada, a samim tim i njegova proizvodnja. Što je bliža temperatura ambijenta temperaturi deklarisanog u standardnim test uslovima, panel radi sa deklarisanom efikasnošću. Ako je temperatura ambijenta niža od deklarisanog vrednosti, fotonaponski panel radi sa višom efikasnošću od deklarisanog.

Za sva tri karakteristična meseca je određena standardna devijacija prema formuli:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_{mereno}(k) - x_{estimirano}(k))^2}{n}} \quad (7.19)$$

gde su: x_{mereno} - izmerene vrednosti efikasnosti, $x_{estimirano}$ - estimirane vrednosti efikasnosti korišćenjem dva modela (*NOCT* modela i *David Faiman-ovog* modela).

Korišćenjem formule (7.19) za standardnu devijaciju dobijene su sledeće vrednosti za sva tri karakteristična meseca prikazane u tabeli 7.2.

Tabela 7.2. Vrednosti standardne devijacije

Mesec	Standardna devijacija	
	<i>NOCT</i> model	<i>David Faiman-ov</i> model
Januar	11.0429	11.1887
Maj	4.8038	4.9754
Avgust	6.5558	6.8193

Analiza je pokazala da *David Faiman-ov* model unosi veću grešku pri estimaciji. Iako se očekuje suprotno, jer *David Faiman-ov* model uzima u obzir uticaja brzine vetra prilikom procene temperature fotonaponskog panela, za razliku od *NOCT* modela, dobijeni rezultati su sasvim opravdani, jer je izmerena efikasnost daleko manja od obe procenjene efikasnosti panela.

S obzirom da *David Faiman-ov* model uzima u obzir uticaj brzine vetra, a samim tim i snižava estimiranu temperaturu fotonaponskog panela, to za posledicu ima veću estimiranu efikasnost panela, što prouzrokuje još veću grešku u odnosu na izmerenu efikasnost panela.

Sprovedene analize u pogledu uticaja varijacije ambijentalne temperature na efikasnost fotonaponskih panela imaju važan praktični značaj, jer omogućavaju bolje sagledavanje nesigurnosti u proceni efikasnosti fotonaponskih sistema usled promene ambijentalnih uslova.

8. ZAKLJUČAK

U poslednjih desetak godina došlo je do ubrzanog razvoja solarne energetike, što ukazuje na ogroman potencijal fotonaponskih sistema, kao i na činjenicu da će fotonaponski sistemi u narednom periodu postati jedan od vodećih izvora električne energije. Shodno tome, izuzetno je važno analizirati efekte rada fotonaponskih sistema na performanse elektroenergetskog sistema, kako bi se što efikasnije integrisali u njega. U ovoj doktorskoj disertaciji je urađena detaljna analiza uticaja vremenskog profila solarnog zračenja na efekte rada fotonaponskih sistema u elektroenergetskom sistemu.

U doktorskoj disertaciji razvijena je unapređena metodologija za valorizaciju električne energije proizvedene u fotonaponskim elektranama u uslovima slobodnog tržišta električne energije. Time je omogućena bolja procena ekonomičnosti rada fotonaponskih elektrana u uslovima slobodnog tržišta električne energije. U slučaju kada svi izvori električne energije postanu podjednako tretirani na slobodnom tržištu električne energije za ekonomičnost projekta fotonaponske elektrane pored godišnje proizvodnje električne energije, potrebno je voditi računa i o profilu dnevnog dijagrama proizvodnje, kao i o vremenskom dijagramu cena električne energije na tržištu električne energije. Matematički model za procenu kvantifikatora za valorizaciju električne energije proizvedene u fotonaponskim panelima u uslovima slobodnog tržišta je dat kroz korelacionu analizu tipičnih dijagrama proizvodnje i dijagrama cene električne energije na tržištu električne energije. Definisani su indeks korelisanosti između prosečnog vremenskog dijagrama dnevnog profila cene električne energije na slobodnom tržištu i prosečnog dnevnog vremenskog dijagrama proizvodnje određene fotonaponske elektrane. Upravo ovaj definisani indeks korelisanosti može da služi kao kvantitativna mera uticaja dnevnog profila proizvodnje na ekonomičnost projekta fotonaponske elektrane u uslovima slobodnog tržišta. Predstavljeni model je jako značajan radi pravilnog sagledavanja ekonomije, kao i valorizacije proizvedene električne energije u fotonaponskoj elektrani, ali i u drugim intermitentnim izvorima električne energije na slobodnom tržištu električne energije. Analiza je pokazala da električna energija proizvedena u fotonaponskoj elektrani ima karakter vršne energije u dnevnom dijagramu potrošnje. To daje niz pozitivnih tehničkih efekata na elektroenergetski sistem i distributivnu mrežu, i to u smislu smanjenja gubitaka, kao i

rasterećenja elemenata elektroenergetskog sistema. Prikazana analiza predstavlja jako važan aspekt integracije fotonaponskih sistema u elektroenergetski sistem, kao i plasiranja električne energije proizvedene u fotonaponskim sistemima na tržište električne energije. Praktična primena razvijenog matematičkog modela, kao i samo testiranje izvršeno je na primeru buduće fotonaponske elektrane u Bavaništu za koju je pretpostavljeno da plasira proizvedenu električnu energiju na nemačku berzu *EEX*.

U doktorskoj disertaciji je razvijena inovirana metodologija za optimizaciju prostorne orijentacije fotonaponskih panela u pogledu profita koji vlasnik fotonaponske elektrane stiče na slobodnom tržištu električne energije. Analiza je pokazala da se u uslovima slobodnog tržišta maksimizacija profita ne poklapa sa maksimizacijom proizvodnje, već da će maksimizacija profita za vlasnika fotonaponske elektrane biti definisana optimizacijom ukupne proizvodnje fotonaponske elektrane i stepenom korelisanosti dijagrama proizvodnje i dijagrama cene električne energije na tržištu električne energije. Prostornom orijentacijom fotonaponskih panela se može uticati na vremenski dijagram snage koju proizvode fotonaponski sistemi. Pokazano je da je izgradnja krovno integrisanih fotonaponskih sistema ekonomski opravdana i za krovove čiji azimutni ugao može biti bitno različit u odnosu na ugao pri kojem se postiže maksimalna proizvodnja. Analiza prostorne orijentacije fotonaponskih panela može koristiti prilikom planiranja i izrade strategije integracije fotonaponskih elektrana čime bi se postigli što bolji efekti na sam elektroenergetski sistem. Analize su izvršene korišćenjem realnih mernih podataka o solarnoj iradijaciji i ambijentalnoj temperaturi za Beograd i cena električne energije na nemačkoj berzi *EEX* i na evropskoj berzi *EPEX*. Određeni su nagibni i azimutni uglovi fotonaponskog panela pri kojima vlasnik fotonaponske elektrane ostvaruje maksimalni profit na slobodnom tržištu električne energije i to za godinu kada je udeo fotonaponskih sistema u ukupnom instalisanom kapacitetu bio mali, kao i za godinu u kojoj je taj udeo značajno povećan, i to čak tri puta. To je direktna posledica instalacije fotonaponskih elektrana koje su usled jednovremenosti rada, sa jedne strane oborile cenu u vršnim satima proizvodnje, a sa druge strane povećale cenu u ranim jutarnjim i večernjim satima. U novim tržišnim uslovima, maksimalna cena električne energije se postiže u jutarnjim, umesto u tradicionalnim podnevnim satima, stoga se i optimizacija azimutnog i nagibnog ugla fotonaponskog panela menja.

Pored tržišnih efekata, u doktorskoj disertaciji je analiziran i vremenski profil solarnog zračenja u cilju sagledavanje uticaja fotonaponskih elektrana na gubitke u distributivnoj mreži. Razvojem i unapređenjem stohastičkog modela ekvivalenta mreže procenjen je efekat rada fotonaponskih sistema na smanjenje gubitaka aktivne snage u distributivnoj mreži. Razvijeni su matematički modeli za procenu uticaja disperzovanih fotonaponskih sistema na gubitke aktivne snage u distributivnoj mreži korišćenjem Fuzzy logike i Monte Carlo simulacije. Analizom je procenjen uticaj perspektivnih disperzovanih fotonaponskih sistema integrisanih u krovove i fasade zgrada na gubitke aktivne snage u distributivnom sistemu, konkretno u Distributivnom sistemu Srbije. S obzirom na trendove razvoja fotonaponskih sistema, ova pretpostavka je sasvim realna i prihvatljiva u distributivnom sistemu u Srbiji u budućnosti. Efekti priključenja i rada fotonaponske elektrane na elektroenergetski sistem su dominantno određeni sučeljavanjem vremenskih dijagrama potrošnje i dijagrama proizvodnje fotonaponskih elektrana. Sučeljavanje ova dva dijagrama određuju tokove snaga kroz elemente distributivnog sistema, a time se i definišu gubici u distributivnoj mreži. Korišćene su tri metode i izvršena je komparativna analiza kako bi se procenili gubici aktivne snage u distributivnom sistemu i na taj način sagledali efekti proizvodnje fotonaponskih sistema na smanjenje gubitaka u distributivnom sistemu. Analizom je prikazano da se instalacijom krovno i fasadno integrisanih fotonaponskih sistema mogu značajno smanjiti gubici aktivne snage u distributivnom sistemu. Prikazana metodologija može biti primenjena u bilo kom distributivnom sistemu u kom je planirana masovna instalacija krovno i fasadno integrisanih fotonaponskih sistema. Testiranje modela je izvršeno uz pretpostavku da se fotonaponski paneli homogeno instaliraju u okviru distributivne mreže, pri čemu ukupna instalisana snaga fotonaponskih panela integrisanih u krovove i fasade zgrada može da varira. Korišćena su realna merenja horizontalne solarne iradijacije i temperature vazduha na lokaciji Kovin, kao i istorijski podaci o bilansima snaga u Distributivnom sistemu Srbije. U cilju verifikacije matematičkog modela, u disertaciji je izvršena analiza uticaja fotonaponskih sistema na gubitke aktivne snage na primeru srednjenaponske i niskonaponske distributivne mreže realne konfiguracije, koja uključuje vodove realnih preseka i dužina, kao i realne merne podatke o solarnoj iradijaciji. Pristup uvođenja Fuzzy logike u proračune stohastičkog modela ekvivalenta mreže, kao i modelovanje profila potrošnje i proizvodnje fotonaponskih panela korišćenjem Fuzzy brojeva je dosta napredniji, jer omogućava uvažavanje promena u strukturi same distributivne mreže.

U doktorskoj disertaciji je analiziran uticaj temperature vazduha i brzine vetra na efikasnost fotonaponskih panela. Izvršena je analiza korelacije estimirane temperature fotonaponskog panela pomoću dva modela i merene temperature fotonaponskog panela. Korišćeni su modeli za estimaciju temperature fotonaponskog panela pri čemu jedan model ne uvažava, dok drugi uvažava uticaj brzine vetra na temperaturu panela. Pokazano je da je bolja korelacija estimirane temperature fotonaponskog panela prema modelu koji uvažava uticaj brzine vetra na temperaturu panela i merene temperature fotonaponskog panela, čime je potvrđena tvrdnja da na temperaturu ćelije pored solarne iradijacije, dominantno utiče i vetar. Temperatura fotonaponske ćelije je jako važan parametar koji utiče na efikasnost same fotonaponske ćelije, pa je od velikog značaja da se što preciznije estimira ovaj parametar u cilju sagledavanja realne proizvodnje. Izvršena je analiza efikasnosti realne fotonaponske elektrane u vremenskom periodu od godinu dana, pri čemu je pokazano kako se menja efikasnost konverzije u zavisnosti od temperature. Analiza je pokazala da je merena efikasnost manja od teorijske, odnosno estimirane efikasnosti. Što je viša temperatura ambijenta, efikasnost panela tokom eksploatacionog perioda opada, a samim tim i njegova proizvodnja. Analize koje su sprovedene u pogledu uticaja varijacije ambijentalne temperature na efikasnost fotonaponskih panela imaju važan praktični značaj, jer omogućavaju realnije sagledavanje nesigurnosti u proceni efikasnosti fotonaponskih sistema usled promene ambijentalnih uslova.

9. LITERATURA

- [1] „Energija u Srbiji 2010.“, Ministarstvo za infrastrukturu i energetiku Republike Srbije, 2010.
- [2] A. Gore, Our Choice: A Plan to Solve the Climate Crisis, November 2009
- [3] Uredba o uslovima i postupku sticanja statusa povlašćenog proizvođača električne energije, Službeni glasnik Republike Srbije, br. 8/2013.
- [4] G. Master, Renewable and Efficient Electric Power Systems, Stanford University, John Wiley & Sons, New Jersey, 2004 ISBN 0-471-28060-7.
- [5] Directive 2009/28/EC of the European parliament and of the council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC
- [6] Directive 2003/30/EC of the European parliament and of the council of 8 May 2003 on the promotion of the use of biofuels or other renewable fuels for transport
- [7] I. Babić, M. Petrović, Razvoj pravnog okvira za veće korišćenje obnovljivih izvora energije u Srbiji od 2013. do 2020. godine, KGH Klimatizacija, grejanje, hlađenje, vol. 42, br. 2, str. 47-50, Maj 2013. ISSN: 0350-1426
- [8] Zakon o energetici Republike Srbije, Službeni glasnik Republike Srbije, br. 57/11, 80/11- ispravka i br. 93/12
- [9] Ministarstvo rudarstva i energetike Republike Srbije, Strategija razvoja energetike u Srbiji do 2015. godine
- [10] D. Mikičić, A. Kunosić, Ž. Đurišić, Atlas - Energetski potencijal Sunca, Elektrotehnički fakultet, jun 2006
- [11] M. G. Carvalho, EU energy and climate change strategy, Energy 40 (2012), pp. 19-22
- [12] T. Pavlović, B. Čabrić, Fizika i tehnika solarne energetike, Građevinska knjiga, Beograd, prvo izdanje 1999; drugo izmenjeno i dopunjeno izdanje 2007, ISBN 86-395-0505-5
- [13] V. Quaschnig, „Understanding Renewable Energy Systems“, London 2005
- [14] D. Gajić, Fizika Sunca, Prosveta, Niš, 2005, ISBN 86-83481-29-8

- [15] D. Popović, Nuklearna energetika, Naučna knjiga, 1978, Beograd
- [16] R. Messenger, J. Ventre, Photovoltaic systems engineering, CRC Press, Taylor & Francis Group, USA, 2010.
- [17] D. Chiras, R. Aram, K. Nelson, Power from the sun-achieving energy independence, New society publishers, Canada, 2009.
- [18] M. Đurić, A. Čukarić, Ž. Đurišić, Elektrane. Elektrotehnički fakultet, Beograd 2004.
- [19] B. Parida, S. Iniyar, R. Goic, A review of solar photovoltaic technologies, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15 (2011), 3, pp. 1625-1636.
- [20] L. El Chaar, L.A. Iamont, N.El Zein, Review of photovoltaic technologies, Renewable and Sustainable Energy Reviews, volume 15, issue 5, June 2011, pp. 2165-2175
- [21] G. K. Singh, Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: A review, Energy, Volume 53, May 2013, pp. 1-13
- [22] G. N. Tiwari, S. Dubey, Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications, RSC Energy Series No. 2, 2009, ISBN: 978 1 84973 020 4
- [23] G.N. Tiwari, R.K. Mishra, S.C. Solanki, Photovoltaic modules and their applications: A review on thermal modelling, Applied Energy, Vol. 88 (2011), pp. 2287–2304.
- [24] T. Ma, H. Yang, L. Lu, Solar photovoltaic system modeling and performance prediction, , Renewable and Sustainable Energy Reviews, 36 (2014), pp. 304–315
- [25] C. J. Sarasa-Maestre, R. Dufo-Lopez, J. L. Bernal-Agustin, Photovoltaic remuneration policies in the European Union, Energy Policy 55 (2013), pp. 317-328
- [26] M.Raugei, P. Frankl, Life cycle impacts and costs of photovoltaic systems: Current state of the art and future outlooks, Energy 34 (2009), pp. 392-399
- [27] F. Dincer, The analysis of photovoltaic electricity generation status, potential and policies of the leading countries in solar energy, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011), pp. 713-720

- [28] K. H. Solangi, M. R. Islam, R. Saidur, N.A. Rahim, H. Fayaz, A review on global solar energy policy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011), pp. 2149-2163
- [29] I. Babić, J. Mikulović, Ž. Đurišić, Model za određivanje optimalnih nagibnih uglova fotonaponskih panela, *ENERGIJA, EKONOMIJA, EKOLOGIJA*, br. 3-4, str. 32-35, mart 2012. ISSN: 0354-8651
- [30] T. Maatallah, Souheil El Alami, S. Ben Nasrallah, Performance modeling and investigation of fixed, single and dual-axis tracking photovoltaic panel in Monastir city, Tunisia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (2011) 8, pp. 4053–4066.
- [31] H. Mousazadeh, A. Keyhani, A. Javadi, H. Mobile, K. Abrinia, A. Sharifi, A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (2009), 8, pp. 1800-1818.
- [32] I. Falconett, KNagasaka, Comparative analysis of support mechanisms for renewable energy technologies using probability distributions, *Renewable Energy* 35, 2010.
- [33] M.N. El-Kordy, M.A. Badr, K.A. Abed, S. M.A. Ibrahim, Economical evaluation of electricity generation considering externalities, *Renewable Energy* 25 (2002), pp. 317–328.
- [34] S. Jenner, F. Groba, J. Indvik, Assessing the strength and effectiveness of renewable electricity feed-in tariffs in European Union countries, *Energy Policy* 52 (2013), pp. 385-401
- [35] L. Dusonchet, E. Telaretti, Economic analysis of different supporting policies for the production of electrical energy by solar photovoltaics in western European Union countries, *Energy Policy* 38 (2010), pp. 3297-3308
- [36] R. Madlener, S. Stagl, Sustainability-guided promotion of renewable electricity generation, *Ecological Economics* 53 (2005), pp. 147– 167
- [37] A. Campoccia, L. Dusonchet, E. Telaretti, G. Zizzo, Comparative analysis of different supporting measures for the production of electrical energy by solar PV and Wind systems: Four representative European cases, *Solar Energy* 83 (2009), pp. 287-297

- [38] R. Haas, Market deployment strategies for photovoltaics: an international review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 7 (2003), pp. 271-315
- [39] R. Haas, G. Resch, C. Panzer, S. Busch, M. Ragwitz, A. Held, Efficiency and effectiveness of promotion systems for electricity generation from renewable energy sources - Lessons from EU countries, *Energy* 36 (2011), pp. 2186-2193
- [40] S. Z. Shirazi, S. M. Z. Shirazi, Review of Spanish renewable energy policy to encourage investment in solar photovoltaic, *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 4, 062702 (2012)
- [41] R. Schleicher-Tappaser, How renewables will change electricity markets in the next five years, *Energy Policy* 48 (2012) 64-75
- [42] J. Viehmann, Risk premiums in the German day-ahead Electricity Market, *Energy Policy* 39 (2011) 386–394
- [43] A. Klein, E. Merkel, B. Pfluger, A. Held, M. Ragwitz, G. Resch, S. Busch, Evaluation of different feed-in tariff design options – Best practice paper for the International Feed-In Cooperation, The Report of a research project funded by the German Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU) - 3rd edition, update by December 2010
- [44] S. Schlueter, A long-term/short-term model for daily electricity prices with dynamic volatility, *Energy Economics* 32 (2010), pp. 1074–1081
- [45] Ž. Đurišić, J. Mikulović, I. Babić, Impact of wind speed variations on wind farm economy in the open market conditions, *Renewable Energy* 46 (2012), pp. 289-296
- [46] R. H. Inman, T. C. Pedro, C. F. M. Coimbra, Solar forecasting methods for renewable energy integration, *Progress in energy and combustion science*, 39 (2013) 6, pp. 535-576
- [47] P. Falbo, M. Fattore, S. Stefani, A new index for electricity spot markets, *Energy Policy* 38 (2010), pp. 2739–2750
- [48] H. Chao, Efficient pricing and investment in electricity markets with intermittent resources, *Energy Policy* 39 (2011), pp. 3945-3953
- [49] C.K. Woo, I.Horowitz, J.Moore, A.Pacheco, The impact of wind generation on the electricity spot-market price level and variance: The Texas experience, *Energy Policy* 39 (2011), pp. 3939–3944

- [50] N. J.Cutler, N.D.Boerema, I.F.MacGill, H.R.Outhred, High penetration wind generation impacts on spot prices in the Australian national electricity market, *Energy Policy* 39 (2011), pp. 5939–5949
- [51] A.Cruz, A. Munoz, J.L. Zamora, R. Espínola, The effect of wind generation and weekday on Spanish electricity spot price forecasting, *Electric Power Systems Research* 81 (2011), pp. 1924– 1935
- [52] <http://www.eex.com/en/>
- [53] M. Obradović, Ž. Đurišić, M. Zindović, Development of a 188 MW wind farm "Bavaništansko Polje" in Serbia, *Proc. of European Wind Energy Conference (EWEC 2009)*, Marseille, France, March 2009
- [54] I. Babić, Ž. Đurišić, Impact of daily variation of solar radiation on photovoltaic plants economy at the open market: A case study "Bavanište" (Serbia), *Thermal Science*, 2015, Vol. 19, No. 3, pp. 837-844 (doi:10.2298/TSCI141025009B)
- [55] I. Babić, Ž. Đurišić, Impact of Diurnal Variation of Solar Radiation on Photovoltaic Power Plants Economy in the Open Market Conditions', *Proc. of 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2014)*, Amsterdam, Netherlands, 22. -26. September, 2014
- [56] I. Babić, Ž. Đurišić, Uticaj dnevne i sezonske varijacije solarnog zračenja na ekonomičnost fotonaponskih elektrana, *ENERGIJA, EKONOMIJA, EKOLOGIJA* br. 3-4, str. 253-257, mart 2013. ISSN: 0354-8651
- [57] N. Rajaković, D. Tasić „Distributivne i industrijske mreže”, 2008.
- [58] N. Rajaković „Analiza elektroenergetskih sistema I”, 2008.
- [59] I. Babić, M. Žarković, Distribuirana proizvodnja električne energije sa primerom vetroagregata, *ENERGIJA, EKONOMIJA, EKOLOGIJA* br. 3-4, str. 259-264, mart 2013. ISSN: 0354-8651
- [60] N. Rajaković, Ž. Đurišić, Distribuirana proizvodnja električne energije – definicije i podele, *Energija*, br. 2, Jun 2005.
- [61] F. P. Vahl, R. Ruther, N. C. Filho, The influence of distributed generation penetration levels on energy markets, *Energy Policy* 62 (2013), pp. 226-235

- [62] D. Q. Hung, N. Mithulananthan, R.C. Bansal, Analytical strategies for renewable distributed generation integration considering energy loss minimization, *Applied Energy* 105 (2013), pp.75-85
- [63] M.A.Choundhry, H. Khan, Power loss reduction in radial distribution system with multiple distributed energy resources through efficient islanding detection, *Energy* 35 (2010), pp. 4843-4861
- [64] A.A.Bayod-Rujula, Future development of the electricity systems with distributed generation, *Energy* 34 (2009), pp. 377-383
- [65] U.S. Solar Resource Maps, Available: <http://www.nrel.gov/gis/solar.html>.
- [66] M. Suri, T. A. Huld, E. D. Dunlop, H. A. Ossenbrink, Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries, *Solar Energy*, 81 (2007), pp. 1295–1305.
- [67] K. Mohammadi, A. Mostafaeipour, M. Sabzpooshani, Assessment of solar and wind energy potentials for three free economic and industrial zones of Iran, *Energy*, 67 (2014), pp. 117-128
- [68] V. Sharma, S. S. Chandel, Performance analysis of a 190kWp grid interactive solar photovoltaic power plant in India, *Energy*, 55 (2013), pp. 476-485.
- [69] I. R. Pillai, R. Banerjee, Renewable energy in India: Status and potential, *Energy*, 34 (2009), pp. 970-980
- [70] A. Bahadori, C. Nwaoha, S. Zendehboudi, G. Zahedi, An overview of renewable energy potential and utilization in Australia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21 (2013), pp. 582–589
- [71] D. Zhang, Q. Chai, X. Zhang, J. He, L. Yue, X. Dong, S. Wu, Economical assessment of large-scale photovoltaic power development in China, *Energy*, 40 (2012), pp. 370-375
- [72] A. La Tour, M. Glachant, Y. Meniere, Predicting the costs of photovoltaic solar modules in 2020 using experience curve models, *Energy*, 62 (2013), pp. 341-348
- [73] M. Bazilian, I. Onyeji, M. Liebreich, I. MacGill, J. Chase, J. Shah, D. Gielen, D. Arent, D. Landfear, S. Zhengrong, Re-considering the economics of photovoltaic power, *Renewable Energy*, 53 (2013), pp. 329–338

- [74] A. Strzalka, N. Alam, E. Duminil, V. Coors, U. Eicker, Large scale integration of photovoltaics in cities, *Applied Energy*, 93 (2012), pp. 413–421
- [75] Connecting the Sun: Solar photovoltaic son the road to large-scale grid integration, European Photovoltaic Industry Association – EPIA, Available: <http://www.connectingthesun.eu> accessed September 2012.
- [76] W. Hsieh, C. Lin, C. Chen, C. T. Hsu, Impact of PV generation to voltage variation and power losses of distribution systems, *Power Systems, IEEE Transactions on*, 27 (2012), pp. 1090-1097
- [77] A. G. Marinopoulos, M. C. Alexiadis, P. S. Dokopoulos, Energy losses in a distribution line with distributed generation based on stochastic power flow, *Electric Power Systems Research*, 81 (2011), pp. 1986–1994.
- [78] M. Delfanti, D. Falabretti, M. Merlo, Dispersed generation impact on DN losses, *Electric Power Systems Research*, 97 (2013), pp. 10–18.
- [79] M. Thomson, D.G. Infield, Impact of widespread photovoltaics generation on distribution systems. *IET Renewable Power Generation*, 2007; 1, (1), pp. 33-40
- [80] R. A. Jarb, Minimum loss operation of distribution networks with photovoltaic generation. *IET Renewable Power Generation*, 2014; 8, (1), pp. 33-44
- [81] J. V. Paatero, P. D. Lund, Effects of large-scale photovoltaic power integration on electricity DNs, *Renewable Energy*, 32 (2007), pp. 216–234
- [82] A. Zidan, E. El-Saadany, Distribution system reconfiguration for energy loss reduction considering the variability of load and local renewable generation, *Energy*, 59 (2013), pp. 698-707
- [83] L. Yanfu, Z. Enrico, Uncertainty analysis of the adequacy assessment model of a distributed generation system, *Renewable Energy* 41 (2012), pp. 235-244
- [84] M. Žarković, D. Šošić, G. Dobrić, Fuzzy based prediction of wind distributed generation impact on distribution network: Case study Banat region Serbia, *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 6 (2014)
- [85] W. Hu, Z. Chen, B. Bak-Jensen, Y. Hu, Fuzzy adaptive particle swarm optimization for power loss minimization in distribution systems using optimal load response, *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2014, 8, (1), pp. 1–10

- [86] D. Šošić, M. Žarković, G. Dobrić, Fuzzy-based Monte Carlo simulation for harmonic load flow in distribution networks, *IET Generation, Transmission & Distribution* (2014)
- [87] G. J. Anders, *Probability Concepts in Electric Power Systems*, (John Wiley and Sons, New York, 1990, 1st edn.)
- [88] J. Trifunović, J. Mikulović, Ž. Đurišić, M. Kostić, Reductions in electricity losses in the distribution power system in case of the mass use of compact fluorescent lamps, *Electric Power Systems Research*, 81 (2011), pp. 465-477
- [89] D. Teodorović, S. Kikuchi, *Uvod u teoriju fuzzy skupova i primene u saobraćaju*, II izdanje, Beograd 1994, YUISNBN 86-80897-42-6
- [90] M. Žarković, I. Škokljević, Energy economy in regulated and market based power system: case study in Serbia, *Turkish Journal of Electric Engineering & Computer Science* (2014)
- [91] H. Gharavi, F. Mohammadi, H. Gharoei, S. Ghanbari-Tichi, R. Salehi, Optimal fuzzy multi-objective design of a renewable energy system with economics, reliability, and environmental emissions considerations, *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 6 (2014)
- [92] A. Mohapatra, P. R. Bijwe, B. K. Panigrahi, Optimal Power Flow with Multiple Data Uncertainties, *Electric Power Systems Research*, 2013, 95, pp. 160–167
- [93] H. Mohkami, R. Hooshmand, A. Khodabakhshian, Fuzzy optimal placement of capacitors in the presence of nonlinear loads in unbalanced distribution networks using BF-PSO algorithm, *Applied Soft Computing*, 2011, 11,(4), pp. 3634-3642
- [94] B. Amigun, D. Petrie D, J. Gorgens, Economic risk assessment of advanced process technologies for bioethanol production in South Africa: Monte Carlo analysis. *Renewable Energy* 2011; 36, pp. 3178–3186
- [95] K. Morin, Modeling the impact of a carbon tax: a trial analysis for Washington State. *Energy Policy* 2012; 48, pp. 627–639
- [96] Ministarstvo rudarstva i energetike Republike Srbije , Program za realizaciju strategije razvoja energetike za Republiku Srbiju za period 2007-2012 , 2007

- [97] T. Pavlovic, D. Milosavljevic, I. Radonjic, L. Pantic, A. Radivojevic, M. Pavlovic, Possibility of electricity generation using PV solar plants in Serbia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20 (2013), pp. 201–218.
- [98] D. Djurdjevic, Perspective sand assessments of solar PV power engineering in the Republic of Serbia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (2011), pp. 2431–2446.
- [99] A. Luque, S. Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, 2003 John Wiley & Sons, Ltd ISBN: 0-471-49196-9.
- [100] I. Babić, Ž. Đurišić, J. Mikulović, Uticaj disperzovanih fotonaponskih sistema na gubitke u distributivnoj mreži, 31. Savetovanje CIGRE, Srbija 26. - 30. maj 2013. Zlatibor, Referat C6 01, ISBN: 978–86–82317–72–2
- [101] Landolt-Börnstein, *Energy Technologies, Subvolume C: Renewable Energy*, Editor: K. Heinloth, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 2006.
- [102] R.A.F. de Groot, V.G. van der Veen, A.B. Sebitosi, Comparing solar PV (photovoltaic) with coal-fired electricity production in the centralized network of South Africa, *Energy* 55 (2013), pp. 823-837
- [103] Lj. Stamenić, Korišćenje solarne fotonaponske energije u Srbiji, Jefferson Institute, decembar 2009
- [104] I. Babić, Ž. Đurišić, M. Žarković, Analysis of impact of building integrated photovoltaic systems on distribution network losses, *Journal of Renewable and Sustainable Energy* Vol. 7, no. 4 (2015) (<http://dx.doi.org/10.1063/1.4927063>)
- [105] Ž. Đurišić, *Obnovljivi izvori energije, projektovanje fotonaponskih sistema*, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Energetski odsek, Beograd 2009
- [106] G. Dobrić, Master rad: Analiza energetske efikasnosti fotonaponskih sistema u realnim uslovima eksploatacije, Elektrotehnički fakultet, Beograd 2010.
- [107] J. Đurić, Master rad: Uticaj ambijentalne temperature na efikasnost PV panela, Elektrotehnički fakultet, Beograd
- [108] E. Skoplaki, J.A. Palyvos, On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficacy/power correlations, *Solar Energy* 83 (2009), pp. 614-624

- [109] R. Bharti, J. Kuitche, M.G. TamizhMani, Nominal Operating Cell Temperature (NOCT): Effects of module size, loading and solar spectrum, Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2009 34th IEEE, 1657-1662, 2009
- [110] M. Koehl, M. Heck, S.Wiesmeier, J. Wirth, Modeling of the nominal operating cell temperature based on outdoor weathering, Solar Energy Materials and Solar Cells, 95 (7), 1638-1646, 2011
- [111] www.sail.msk.ru/lectures/part_1.ppt
- [112] M. C. Alonso Garcia, J.L. Balenzategui, Estimation of photovoltaic module yearly temperature and performance based on Nominal Operation Cell Temperature calculations, Renewable Energy, 29 (12), 2004, pp. 1997-2010
- [113] P. Trinuruk, C. Sorapipatana, D. Chenvidhya, Estimating operating cell temperature of BIPV modules in Thailand, Renewable Energy, 34(11), 2009, pp. 2515-2523
- [114] <http://www.grejanje.com/strana.php?pID=172>
- [115] Solar Generation 6, Executive summary October 2010, EPIA
- [116] M.A.Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, E. D. Dunlop, Solar cell efficiency tables (Version 45), Progress in Photovoltaics, 23 (1), 2015, pp. 1-9
- [117] G.X.Liang, P. Fan, J.T.Luo, D.Gu, Z.H. Zheng, A promising unisource thermal evaporation for in situ fabrication of organolead halide perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ thin film, Progress in Photovoltaics, 2015, DOI: 10.1002/pip.2632
- [118] K. Stamplecoskie, J. S. Manser, P. V. Kamat, Dual nature of the excited state in organic-inorganic lead halide perovskites, Energy & Environmental Science, 8 (2015) pp. 208-215
- [119] Global market outlook for photovoltaics 2014-2018, EPIA
- [120] A. Jäger-Waldau, Selected Highlights of the Conference, Proc. of 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2014), Amsterdam, Netherlands, 22. -26. September, 2014
- [121] <http://www.iea.org/>
- [122] V. Mijailović, Distribuirani izvori energije, Akademska misao, 2011, 978-86-7466-398-1
- [123] R. Walraven, Calculating the position of the Sun, Solar Energy, 20 (1978) pp. 393-397

- [124] F. Gulli, A. Lo Balbo, The impact of intermittently renewable energy on Italian wholesale electricity prices: Additional benefits or additional cost, *Energy Policy*, 83 (2015) pp. 123-137
- [125] A. Veiga, P. Rodilla, I. Herrero, C. Batlle, Intermittent RES-E, cycling and spot prices: The role of pricing rules, *Electric Power Systems Research*, 121 (2015) pp. 134-144
- [126] D. Azofra, E. Martinez, E. Jimenez, J. Blanco, F. Azofra, J.C. Saenz-Diez, Comparison of the influence of the photovoltaic and wind power on the Spanish electricity prices by means of artificial intelligence techniques, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42 (2015) pp. 532-542
- [127] I. H. Rowlands, B.P. Kemery, I. Beausoleil-Morrison, Optimal solar-PV tilt angle and azimuth: An Ontario (Canada) case-study, *Energy Policy* 39 (2011) pp.1397-1409
- [128] Serbian Ministry of Mining and Energy, Programme for Realization of Energy Development Strategy for Republic of Serbia for period 2007–2012, Serbia 2007
- [129] Global market outlook for photovoltaics until 2014, 2014, EPIA
- [130] K. Wurzburg, X. Labandeira, P. Linares, Renewable Generation and Electricity Prices: Taking Stock and New Evidence for Germany and Austria, *Economics for Energy*, WP FA03/2013
- [131] <https://www.energy-charts.de/price.htm>
- [132] S. Clo, G. D'Adamo, The dark side of the sun: How solar power production affects the market value of the solar and gas sources, *Energy Economics*, 49 (2015) pp. 523-530
- [133] S. Clo, A. Cataldi, P. Zoppoli, The merit-order effect in the Italian power market: The impact of the solar and wind generation on national wholesale electricity prices, *Energy Policy*, 77 (2015) pp. 79-88
- [134] <https://www.epexspot.com/en/>
- [135] J. Rhodes, C. Upshaw, W. Cole, C. Holcomb, M. Webber, A multi-objective assessment of the effect of solar PV array orientation and tilt on energy production and system economics, *Solar Energy*, 108 (2014), pp. 28-40
- [136] <http://pvwatts.nrel.gov/>

- [137] A.P.Dobos, PVWatts Version 5 Manual, Technical Report, NREL/TP-6A20-62641, September 2014
- [138] Fotonaponska elektrana, Upravljanje procesima, Institut MIHAJLO PUPIN, IMP-Automatika
- [139] A.M. Ismail, R. Ramirez-Iniguez, M. Asif, A. B. Munir, F. Muhammed-Sukki, Progress of solar photovoltaic in ASEAN countries: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48 (2015), pp. 339-412
- [140] M.J. Grubb, The integration of renewable electricity sources, *Energy Policy*, 19 (1991), pp. 670-688
- [141] P. Denholm, R.M. Margolis, Evaluating the limits of solar photovoltaics (PV) in traditional electric power systems, *Energy Policy*, 35 (2007), pp. 2852-2861
- [142] M. Karimi, H. Mokhils, K. Naidu, S. Uddin, A.H.A. Bakar, Photovoltaic penetration issues and impacts in distribution network – A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53 (2016), pp. 594-605
- [143] M. Harter, A. Ortner, A.Hiesl, R. Haas, East to west – The optimal tilt angle and orientation of photovoltaic panels from an electricity system perspective, *Applied Energy*, 160 (2015), pp. 94-107
- [144] L. Hirth, The market value of variable renewables: The effect of solar wind power variability on their relative price, *Energy Economics*, 38 (2013), pp. 218-236
- [145] D. Das, D. P. Kothari, A. Kalam, Simple and efficient method for load flow solution of radial distribution networks, *Electrical Power and Energy Systems*, 5 (1995), pp. 335-346
- [146] M. Charkravorty, D. Das, Voltage stability analysis of radial distribution networks, *Int J Electr Power Energy System*, 23 (2001), pp.129–135
- [147] D. Shirmohammadi, H.W. Hong, A. Semlyen, G. X. Luo, A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks”, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2, (1988)
- [148] G.X. Luo, A. Semlyen, Efficient load flow for large weakly meshed networks”, *IEEE Transactions on Power Systems*, 4 (1990)

- [149] Z. JunFang, Y. Qiang, S. Rui, Q. HongXia, D. XinZhou, The harmonic load flow calculation of distribution network with distributed power, *Advanced Power System Automation and Protection (APAP)*, 3 (2011), pp. 2088-2092
- [150] D. Đorđević, M. Anđelković, Analiza uticaja masovnog korišćenja solarnih panela na gubitke električne energije u niskonaponskoj mreži, *Infoteh - Jahorina*, vol. 14, str. 260-265, mart 2015
- [151] <http://147.91.50.246/PowerWeb/faces/impSolarPowerPlant.xhtml>
- [152] R. Stamatović, A. Car, Analiza proizvodnje krovne fotonaponske elektrane, 32. Savetovanje CIGRE, Srbija 22. maj 2015. Zlatibor, ISBN: 978-86-82317-72-2

10. BIOGRAFIJA

Iva M. Babić je rođena 31. avgusta 1980. godine u Beogradu, opština Savski venac, Republika Srbija, od oca Miroljuba i majke Tatjane. Osnovnu školu „Radoje Domanović“ je završila 1995. godine u Beogradu sa odličnim uspehom. Nosilac je diplome „Vuk Stefanović Karadžić“. Petu beogradsku gimnaziju, prirodno-matematički smer, je završila 1999. godine sa odličnim uspehom. Tokom osnovnog i srednjeg obrazovanja ostvarila je zapažene rezultate na takmičenjima iz oblasti matematike, fizike, hemije, biologije, informatike, engleskog i francuskog jezika. Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Energetski odsek, upisala je školske 1999/2000. godine. Diplomirala je jula 2007. godine na istom fakultetu, na Smeru za elektroenergetske sisteme. Doktorske akademske studije na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, modul Elektroenergetske mreže i sistemi je upisala 2008. godine. U toku studija položila je sve ispite predviđene studijskim planom i programom izabranog modula sa prosečnom ocenom 10.00.

Od aprila 2008. godine do novembra 2011. godine bila je zaposlena u Inovacionom centru Elektrotehničkog fakulteta (ICEF) u Beogradu na mestu saradnika-postdiplomca. Od decembra 2009. godine do decembra 2011. godine bila je član Upravnog odbora Rudnap Group - Meter&Control. Od novembra 2011. godine je zaposlena na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, pri Katedri za Elektroenergetske sisteme na mestu saradnika na projektima.

Na projektima koje je finansiralo Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije, učestvovala je kao saradnik u realizaciji tri naučno-istraživačka projekta iz programa Inovacione delatnosti, kao i dva naučno-istraživačka projekta iz programa Tehnološkog razvoja. Trenutno je angažovana kao saradnik na projektu Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja, evidencionog broja III 42009, pod nazivom „Inteligentne energetske mreže“ (program: Integralna i interdisciplinarna istraživanja, oblast: Energetika i energetska efikasnost). Rukovodilac projekta je prof. dr Nikola Rajaković.

U toku zimskog semestra školske 2011/2012. i školske 2012/2013. godine na Katedri za elektroenergetske sisteme je bila angažovana za izvođenje laboratorijskih vežbi iz predmeta Električna merenja 1 za studente druge godine Energetskog odseka (OG2EM1). U toku letnjeg semestra školske 2011/2012. godine na istoj katedri, bila je angažovana za izvođenje laboratorijskih vežbi iz predmeta Električna merenja 2 za studente druge godine Energetskog odseka (OG2EM2) i iz predmeta Praktikum laboratorijske vežbe iz EES-a za studente četvrte godine Energetskog odseka (OG4PLV).

Tokom doktorskih studija aktivno se bavila naučnoistraživačkim radom što je rezultiralo brojnim referencama. Autor ili koautor je više radova publikovanih u časopisima i na konferencijama nacionalnog, regionalnog i međunarodnog značaja. Ovi radovi su iz oblasti obnovljivih izvora energije (solarna energetika, vetroenergetika, biomasa i biogoriva), autonomnih sistema napajanja, optimalnog planiranja mreže i procene gubitaka, inteligentnih energetskih mreža, energetske efikasnosti i drugih.

Govori engleski i francuski jezik.

Udata je, majka maloletnog deteta.

Prilog 1.

Izjava o autorstvu

Potpisana: Iva M. Babić

broj indeksa: 5050/07

Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom:

Modelovanje uticaja vremenskog profila solarnog zračenja na efekte rada fotonaponskih sistema u elektroenergetskom sistemu

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio/la autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

Potpis doktoranda

U Beogradu, 07.12.2015.

Iva Babić

Prilog 2.

Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora: Iva M. Babić

Broj indeksa: 5050/07

Studijski program: Elektroenergetske mreže i sistemi

Naslov rada: Modelovanje uticaja vremenskog profila solarnog zračenja na efekte rada fotonaponskih sistema u elektroenergetskom sistemu

Mentor: Dr Željko Đurišić

Potpisana Iva M. Babić

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao/la za objavljivanje na portalu **Digitalnog repozitorijuma Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

Potpis doktoranda

U Beogradu, 07. 12. 2015.

Iva Babić

Prilog 3.

Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

Modelovanje uticaja vremenskog profila solarnog zračenja na efekte rada fotonaponskih sistema u elektroenergetskom sistemu

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim priložima predao/la sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio/la.

1. Autorstvo
2. Autorstvo - nekomercijalno
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima

5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci, kratak opis licenci dat je na poleđini lista).

Potpis doktoranda

U Beogradu, 07.12. 2015.

Mica Bašić

1. Autorstvo - Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. Autorstvo – nekomercijalno. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
3. Autorstvo - nekomercijalno – bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.
4. Autorstvo - nekomercijalno – deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.
5. Autorstvo – bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
6. Autorstvo - deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.