Simulacija utjecaja zasjenjenja na proizvodnju električne energije fotonaponske elektrane

Radmanović, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:096625

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

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

Sveučilišni studij

Simulacija utjecaja zasjenjenja na proizvodnju električne energije fotonaponske elektrane

Diplomski rad

Ivan Radmanović

Osijek, 2017.

Sadržaj

1. UVOD 1

1.1 Zadatak diplomskog rada 1

2. OBNOVLJIVI IZVORI IZ SOLARNE ENERGIJE 2

2.1 Povijest solarne energije 2

2.2 Solarna energija u svijetu 4

2.3 Instalirana snaga FN sustava 7

2.4. Obnovljivi izvori u RH 9

3. FOTONAPONSKI MODULI I FOTONAPONSKI SUSTAVI 13

3.1 Poluvodička dioda (PN-spoj) 13

3.2 Solarne ćelije 16

3.2.1 Monokristalna – Si ćelija 18

3.2.2. Polikristalna – Si ćelija 19

3.2.3 Amorfna – Si ćelija 20

3.2.4. Solarne ćelije tankog filma od bakar – indij – diselenida (CIS) 21

3.3. Sustavi priključeni na mrežu „On grid“ sustavi 22

3.4. Samostojeći sustavi – „Off Grid“ 24

4. UTJECAJ ZASJENJENJA NA FOTONAPONSKE SUSTAVE 28

4.1. Sunčevo zračenje i zasjenjenje 28

4.2. Učinak zasjenjenja 30

5. PROGRAMSKI PAKET „Photovoltaic planning software PV*SOL“ 32

5.1. Parametri solarne elektrane 32

5.2 Rezultati simulacije za slučaj bez zasjenjenja 34

5.3 Rezultati simulacije za slučaj zasjenjenja dimnjakom 36

5.4. Rezultati simulacije za slučaj zasjenjenja drvetom 39

5.5 Rezultati simulacije za slučaj zasjenjenja susjednim objektom (zgrada) 42

6. ZAKLJUČAK 47

LITERATURA 48

SAŽETAK 50

ABSTRACT 51

ŽIVOTOPIS 52

1. UVOD

Tema ovog diplomskog rada je simulacija utjecaja djelomičnog zasjenjenja na proizvodnju električne energije solarne elektrane. Osim teorijskog objašnjenja izabranih fotonaponskih ćelija, u programskom paketu „Photovoltaic planning software PV*SOL“ simuliran je utjecaj zasjenjenja na proizvodnju električne energije. Kako bi korisnost elektrane bila što veća, potrebno je dobro istražiti položaj postavljanja elektrane, nagiba kuta postavljanja fotonaponskih ćelija, izbor izmjenjivača, te također istražiti kako će okoliš koji okružuje elektranu utjecati na zasjenjenje solarne elektrane. U ovom diplomskom radu, uz pomoć simulacije, grafički i slikovito prikazano je kako zasjenjenje utječe na proizvodnju električne energije.

1.1 Zadatak diplomskog rada

U diplomskom radu predviđeno je teorijski objasniti utjecaj djelomičnog zasjenjenja fotonaponskog modula na strujno-naponske karakteristike modula ovisno o tehnologiji izrade modula i načinu spoja ćelija unutar modula. Potrebno je simulirati model solarne elektrane u programskom paketu „ PVSOL“, te grafički i numerički analizirati dobivene rezultate.

2. OBNOVLJIVI IZVORI IZ SOLARNE ENERGIJE

U ovom poglavlju opisani su početci obnovljivih izvora iz solarne energije, njihova korisnost, dostupnost te raširenost u svijetu. U današnje vrijeme solarna energija može se iskoristiti na više načina. Jedan od načina korištenja solarne energije, između ostaloga, je i za proizvodnju električne energije.

2.1 Povijest solarne energije

Solarna energija kakvu danas poznajemo aktualna je posljednjih 60-ak godina, ali otkrića koja su pomogla pri razvitku energije iz ovakvih izvora stari su i do 200 godina. Pomoću otkrića o svojstvima vodljivosti različitih materijala i otkrića o svojstvima svjetlosti dovela su do toga da sunčevu energiju možemo koristiti kao solarni izvor svjetlosti.

Francuski znanstvenik Edmond Becquerel prvi je znanstvenik koji je otkrio fotonaponski efekt 1839.godine. Njegovo otkriće fotonaponskog efekta smatra se početcima korištenja energije iz solarnih izvora. Njegova definicija fotonaponskog efekta glasila je da je to proizvodnja električne struje u slučaju kada se dvije ploče (zlata ili platine) urone u kiselinu, neutralnu ili lužnatu otopinu te izlože na nejednolik način Sunčevu zračenju. [1]

U vremenu od 1873. - 1876. godine, engleski inženjer elektrotehnike Willoughby Smith otkrio je fotovodljivost selena. 1876.godine William Grylls Adams i Richard Evans otkrili su da kemijski element selen ima mogućnost proizvodnje električne energije u slučaju kada je izložen sunčevom zračenju. Jedno od bitnijih njihovih otkrića glasilo je da čvrsti materijali imaju mogućnost pretvorbe svjetlosti u električnu energiju direktno bez pomoći pokretnih dijelova ili bez topline. Nedostatak selena je što nema mogućnost proizvodnje dovoljno električne energije za napajanje, a da je to tehnički ili ekonomski izvedivo. [2]

Davne 1883.godine, američki znanstvenik Charles Fritts napravio je najveći iskorak u istraživanju selena i iskorištavanju sunčeve energije. 1883.godine konstruirana je prva solarna ćelija. Solarna ćelija napravljena je na način da je selen postavljen na metalnu ploču, te ga je prekrio polu prozirnim zlatnim

listićima. Prema izvještajima znanstvenika Fritts-a, ovaj modul imao je mogućnost proizvodnje struje koja je imala konstantnu vrijednost. Prednost ovakvih modula bila je što za proizvodnju struje nije bila potrebna samo sunčeva energija, nego ima mogućnost korištenja svjetlosti iz žarulja. Fritts je predvidio da će se jednog dana, uz pomoć sunčeve svjetlosti, napajati trošila.

Njemački fizičar Heinrich Hertz, 1887.godine, prvi je puta promatrao fotoelektrični učinak, gdje se pri djelovanju svjetlosti na čvrstu površinu (obično metala) ispuštaju elektroni s navedene površine radi stvaranja električne energije. Ovim promatranjem, Hertz je ustvrdio da proces proizvodi puno više energije pri osvjetljavanju uljtraljubičastim svjetlom, nego li na intenzivnije vidljivom svjetlu. Navedeni fotoelektrični učinak bio je od pomoći Albertu Einsteinu za unaprjeđenje učinka i dobivanje Nobelove nagrade za isti. Moderne fotoćelije funkcioniraju na principu fotoelektričnog efekta za pretvaranje solarne energije u električnu.

Fizičari Bell laboratorija 1953.godine otkrili su da je siliciji učinkovitiji od selena. Stvorena je prva praktična solarna ćelija sa 6% korisnosti. Ovo otkriće pomoglo je pri proizvodnji solarnih ćelija koje mogu napajati električna trošila. 1956.godine Western Electric započinje s prodajom komercijalnih licenci za svoje silicijske fotonaponske (FN) tehnologije. Preveliki troškovi proizvodnje silicijskih solarnih ćelija spriječili su proizvod da se proširi na šire i isplativije tržište.

Nakon godina eksperimentiranja za poboljšanje korisnosti i komercijalizacije solarne energije, 1958.godine, vlada koristi solarnu energiju u svrhu istraživanja svemira. Prvi satelitski pogon, Vanguard 1, okružio je zemlju 197 000 puta u 50 godina koliko je u Zemljinoj orbiti. Nakon lansiranja Vanguard-a 1 ulaže se više novaca u istraživanje za smanjenje troškova i povećanje proizvodnje.

Cijene nafte porasle su 1970.godine, te je porasla potražnja za solarnom energijom. Exxon Corporation financirao je istraživanja za stvaranje solarnih ćelija od silicija lošije kvalitete i jeftinijih materijala. Smanjili su troškove sa 100 $/W na 20-40$/W. 1977.godine osnovan je Nacionalni laboratorij za obnovljive izvore energije (NREL).

Arco Solar 1982.godine izgradio je prvi solarni park u Hesperi-i u Kaliforniji. Park je imao maksimalnu snagu od 1 MW, odnosno 1000 kWh. Park ove snage napajao je žarulju snage 100W narednih 10h. Arco Solar je 1983.godine izgradio drugi solarni park u Carizo Plains u Kaliforniji. Novoizgrađeni park bio je park maksimalne snage 5,2 MW. Cijena nafte je pala, te se smanjila potreba za solarnim parkovima.

Nacionalni laboratorij iz 1994.godine razvio je novu solarnu ćeliju iz galijevskog – indijskog fosfida i galijskog arsenida. Korisnost novonastalog spoja bila je 30%. Do kraja stoljeća, laboratorij je stvorio tanke filmske solarne ćelije kojima je korisnost bila 32%.

Kako je došlo do povećanja korisnosti solarnih ćelija, solarna energija postala je sve popularnija. DIY solarni paneli širili su se tržištem, povećavajući proizvodnju svake godine.

U današnje vrijeme solarne ćelije mogu se printati uz pomoć 3D printera. Učinkovitost im iznosi 20%, a jedan niz ćelija ima mogućnost proizvodnje 50W/m^2. Posebnu korist od ovakvih traka imaju populacije zemalja u razvoju, jer su ćelije jeftine i fleksibilne za proizvodnju.

Veliki napredak dogodio se 2016.godine kada je istraživački tim sa Sveučilišta u Kaliforniji, Berkley i Australsko Nacionalno Sveučilište otkrilo nova svojstva nano – materijala. Magnetska hiperbolička disperzija govori da kada se materijal zagrije u mogućnosti je osvjetljavati.[2]

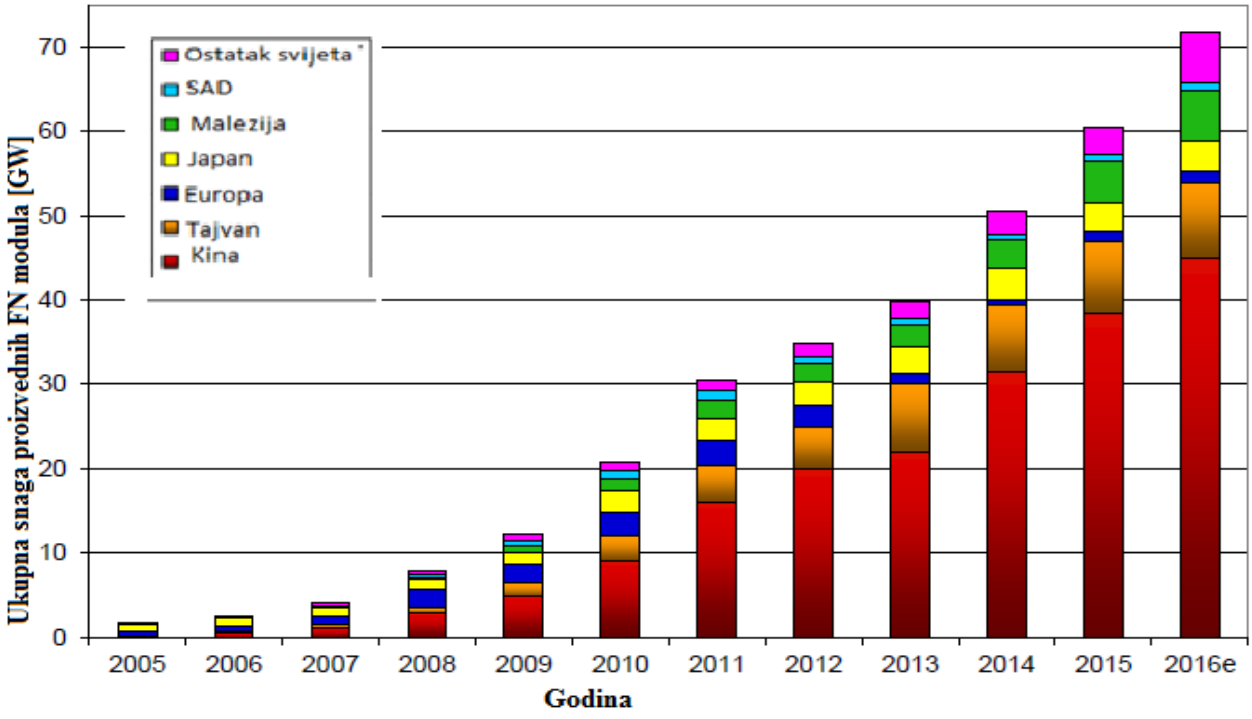
2.2 Solarna energija u svijetu

Kako je već i rečeno, solarna energija sve se više koristi za proizvodnju električne energije. Solarni paneli sve su raširenji po cijelom svijetu, a ponajviše u Europi. Kina svojom jeftinom proizvodnjom utječe na sve veću raširenost fotonaponskih ćelija i jeftiniju proizvodnju izmjenjivača.

Za solarnu energiju posljednjih 6 godina za redom izdvaja se 56% iz ukupne svote za investicija u obnovljive izvore. Točnije, za solarnu energiju izdvojilo se 146 milijardi eura. Tijekom posljednjih 15 godina, proizvodni kapacitet solarnih FN sustava povećao se uz pomoć CAGR-a, za više od 40 % što čini najbržu rastuću industriju u svijetu. Do 2006. godine proizvodnja solarnih ćelija najveća je u Europi i Japanu. Nakon brzog porasta godišnje proizvodnje u Kini i Tajvanu od 2006.godine do 2014.godine dolazi do brzog povećanja proizvodnih kapaciteta i u ostalim Azijskim zemljama, poput Indije, Malezije, Filipina, Tajlanda i Vijetnama. [3] Razvoj tržišta nije se širio istom brzinom kao i proizvodnja iz FN sustava, što je dovelo do velikih količina energije iz solarnih panela. Ne razvojem tržišta, došlo je do povećanja cijene električne energije iz FN sustava. U 2015.godini, po prvi puta, ulaganja u razvoj obnovljivih izvora energije bila su veća nego investiranja u već razvijene obnovljive izvore. Istovremeno su u Europi ulaganja u obnovljive izvore energije smanjena, dok su nova ulaganja porasla u svim dijelovima svijeta. Prema trenutnim događanjima na tržištu takvo stanje ostati će

nepromijenjeno, osim u slučaju promjene europske politike. Prema trenutnim tržišnim predviđanjima, instalirana snaga iz solarne energije, krajem 2015.godine iznosila je 235 GW. Predviđanja tržišta su da će se instalirana snaga dobivena iz solarne energije udvostručiti do kraja 2018.godine. Krajem 2016.godine predviđalo se da će instalirana snaga iz solarne energije premašiti 310 GW, što je dovoljno za opskrbu 1,5% svjetskih potreba za električnom energijom. Udio EU zadovoljava 4% potreba za električnom energijom. U 2016.godini došlo je do smanjenja cijene električne energije iz solarnih panela sa 30 USD/MWh na 24.2 USD/MWh za područje Abu Dhabi-a. Posljednjih par desetljeća rast potrošnje električne energije iz fotonaponskih panela uglavnom su potaknute javnim poticajima, ali je vidljiv pomak u snižavanju troškova za proizvodnju električne energije iz fotonaponskih izvora.

Globalna instalirana snaga FN modula za 2015. godinu kretala se u rasponu između 56 GW do 61 GW, dok su procjene za 2016. godinu bile da će se instalirana snaga proizvedenih FN modula kretati u rasponu od 65 GW do 75 GW. [3]



Slika 2.2.1 Ukupna snaga proizvedenih FN modula u svijetu od 2005.-2016.godine [3]

U 2015. godini ulaganja u svijetu u obnovljive izvore energije dosegla su rekordnu visinu. Ulaganja u projekte obnovljivih izvora energije, bez velikih hidroelektrana, dosegli su 260 milijardi eura, što je više za čak 5% nego u 2014. godini. U 2011. godini ulaganja su iznosila 214 milijardi

eura, a najzaslužnijim za to bili su različiti poticajni „zeleni programi“ kao i ekspanzija postavljanja fotonaponskih panela na krovove njemačkih i talijanskih kuća. Šest godina za redom solarna energija najprivlačnija je za nove investicije u obnovljivim izvorima. Ulaganja u vrijednosti od 146 milijardi eura činila su 56% svih novih ulaganja u obnovljive izvore energije. Nakon smanjenja ukupnih ulaganja u solarnu energiju u 2011. i 2013. godini, ponovno dolazi do povećanja ulaganja u 2014. godini za (+21%) i 2015. godini (+12%). Proporcionalno rastu ulaganja, rasla su i postrojenja fotonaponskih sustava sa 26,9 GW u 2011. na 51,7 GW u 2015.godini. Također jedan od bitnih čimbenika koji su utjecali na rast bili su i smanjenje cijena fotonaponskih sustava. [3]

Vodeća zemlja po ulaganju u obnovljive izvore energije bila je Kina s ulaganjima od 93,5 milijardi eura, što u postotcima iznosi rast od 17%. SAD je bila zemlja s ulaganjem od 40,1 milijardu eura, što iznosi rast od 19%, te Japan s ulaganjima od 32,9 milijardi eura. Suprotno razvoju u drugim svjetskim regijama, investicije u obnovljive izvore energije u Europi u 2015. godini pala su za 21% na 44,4 milijarde eura. U usporedbi s 2011. godinom, iznos pada bio je i veći, odnosno 60%. Glavni uzročnici ovakvog pada bilo je drastično smanjivanje poticaja na fotonaponske sustave, pa čak i retroaktivna smanjivanja projekata u nekim državama članicama, te gospodarska kriza u južnoj Europi. Svjetla točka u ovom trendu smanjivanja bila je Velika Britanija, koja je u 2015.godini povećala ulaganja u obnovljive izvore energije za 25%, što u valutnoj vrijednosti iznosi 20,1 milijardu eura.

Predviđanja tržišta za 2016.godinu razlikovala su se po izvorima koji su ih objavljivali. Prema Bloom-bergu tržište fotonaponskih proizvoda sačinjavalo bi se od 56 GW, Greentech Media predviđao je globalnu potražnju od 66,7 GW. Najnesigurnije tržište okarakteriziralo se kao kinesko tržište, iz razloga što je infrastruktura bila prestara, odnosno nije mogla popratiti tehnološki rast i rast korisnosti ćelija i modula fotonapona. Tehnologije koje su razvijene u današnje vrijeme pružaju pouzdan proizvod, koji garantira pretvorbu solarne energije u narednih 25-30 godina.

Pouzdanost je jedan od glavnih razloga zašto se sve više koriste i razvijaju tehnologije za dobivanje energije iz fotonaponskih panela. Sve učestaliji prekidi opskrbom električnom energijom iz konvencionalnih izvora, kao i porast cijene električne energije iz konvencionalnih izvora energije, tjera gospodarstva da ulažu na svojim gospodarstvima u nekonvencionalne izvore.

Više od 90% trenutne proizvodnje električne energije iz fotonaponskih panela, za tehnologiju izrade fotonapona koristili su silicijsku tehnologiju. Procijenjeni proizvodni kapaciteti silicija za 2016. godinu iznosili su između 415 000 tona do 426 000 tona. Pretpostavka je bila da će elektronička

industrija od ukupne količine iskoristit 28 000 tona. Potencijalna proizvodnja solarnih ćelija dodatno će ovisiti o upotrijebljenom materijalu po Wp (engl. *Watt-pick*). Trenutni svjetski prosjek iznosi oko 4,9 g/Wp.

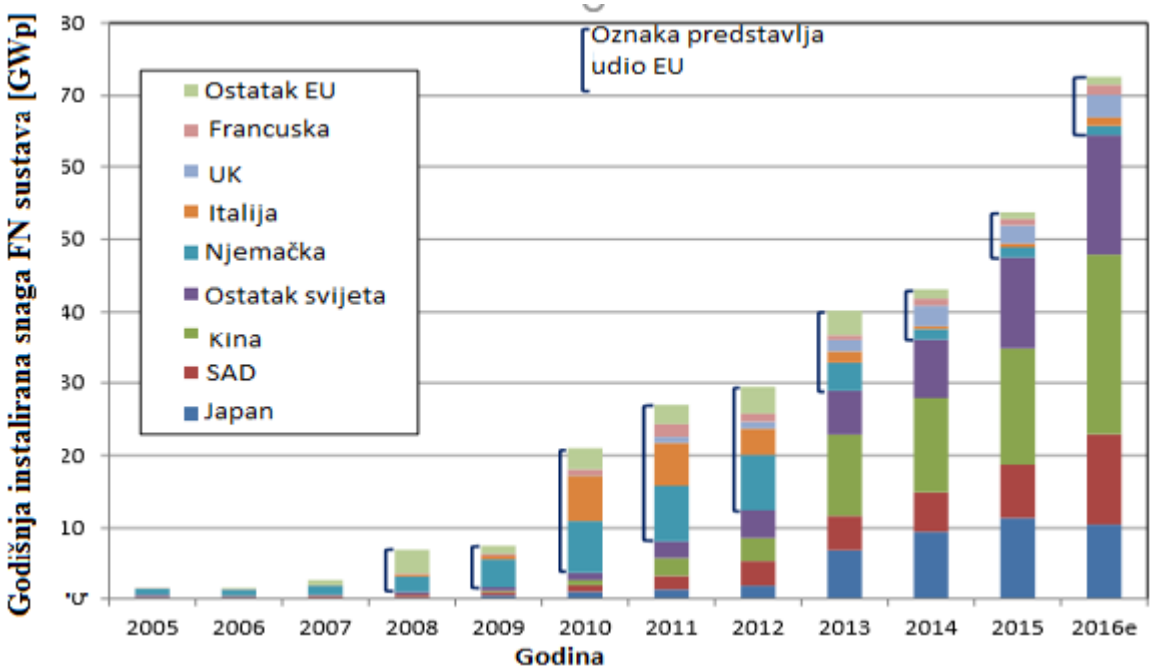
U zemljama s razvijenom infrastrukturom za električnu mrežu sve je veći udio električne energije dobivene iz fotonapona, stoga postoje naznake sve veće važnosti za ekonomskom integracijom. Analogno tome, sve više pažnje posvećeno je pitanjima kao što su:

- Razvijanje novih poslovnih modela za prikupljanje, prodaju i distribuciju električne energije dobivene iz fotonaponskih sustava
- Prilagodba regulatornih i zakonskih postupaka kako bi se osigurao pošten i zajamčen pristup mreži električne energije, te pristup legalno i legitimnom tržištu električnom energijom. [3]

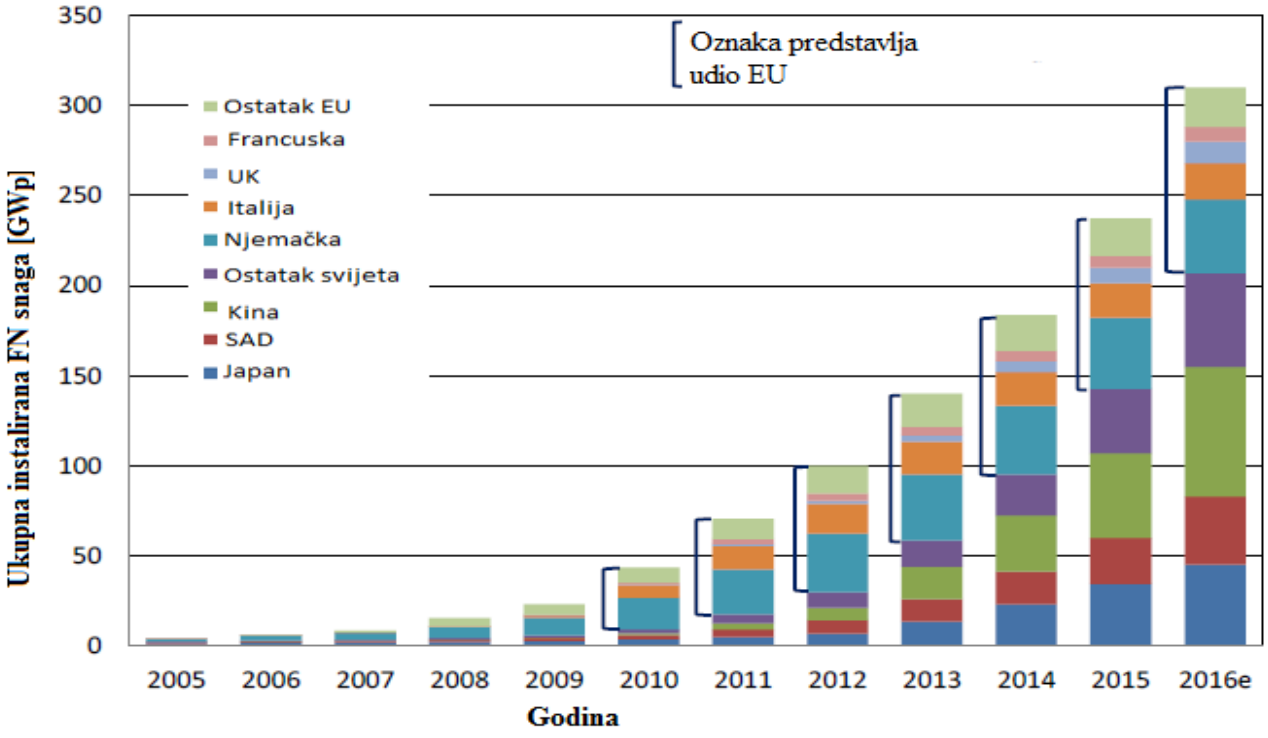
2.3 Instalirana snaga FN sustava

Solarne fotonaponske instalacije povećavaju se iz godine u godinu, tako je instalirana snaga iz fotonaponski sustava, u vremenu od 2012.godine do 2015.godine, doživjela povećanje sa 29,5 GW na 53,7 GW.

Kina je u 2015.godini napravila iskorak, te tako prema kumulativnoj instaliranoj nominalnoj snazi pretekla Njemačku, predviđalo se da će u 2016.godini jednak napredak napraviti i Japan. Krajem 2015.godine, Europska unija sa 95 GW instalirane snage dobivene iz fotonapona, činila je 40% ukupne električne snage dobivene iz solarne energije. Točnije, ukupna snaga proizvedenih FN modula iznosila je 95 GW, od 235 GW ukupne instalirane snage FN modula u svijetu. [3]



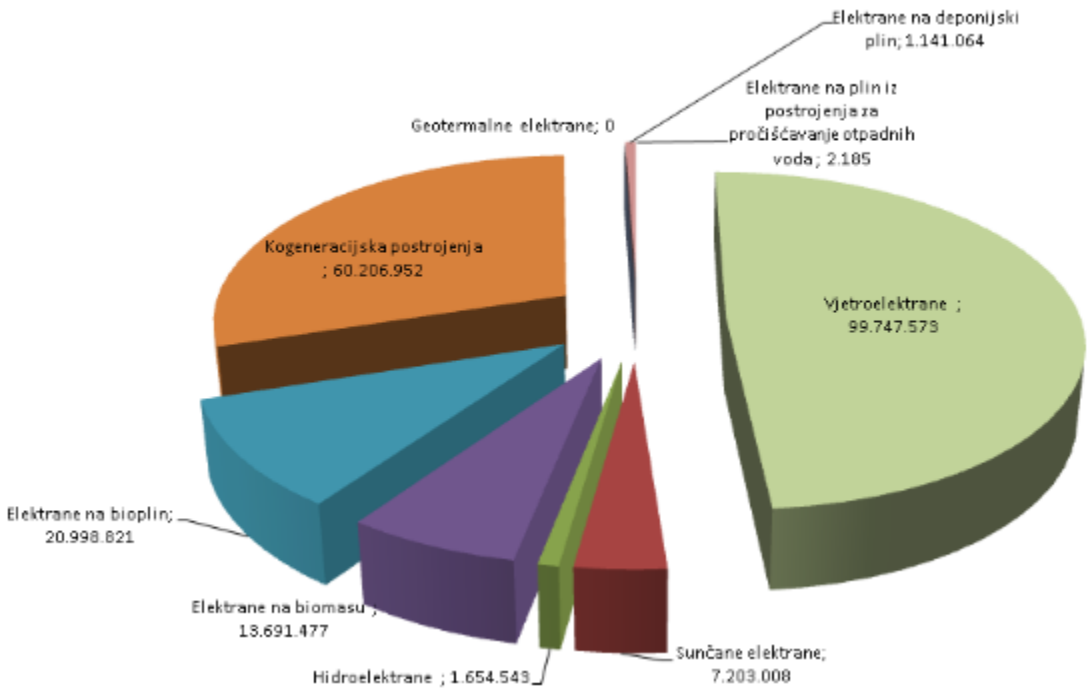
Slika 2.3.1. Godišnja instalirana snaga fotonaponskih sustava od 2005. do 2016.godine [3]



Slika 2.3.2. Ukupno instalirana snaga iz fotonaponskih sustava od 2005. do 2016.godine[3]

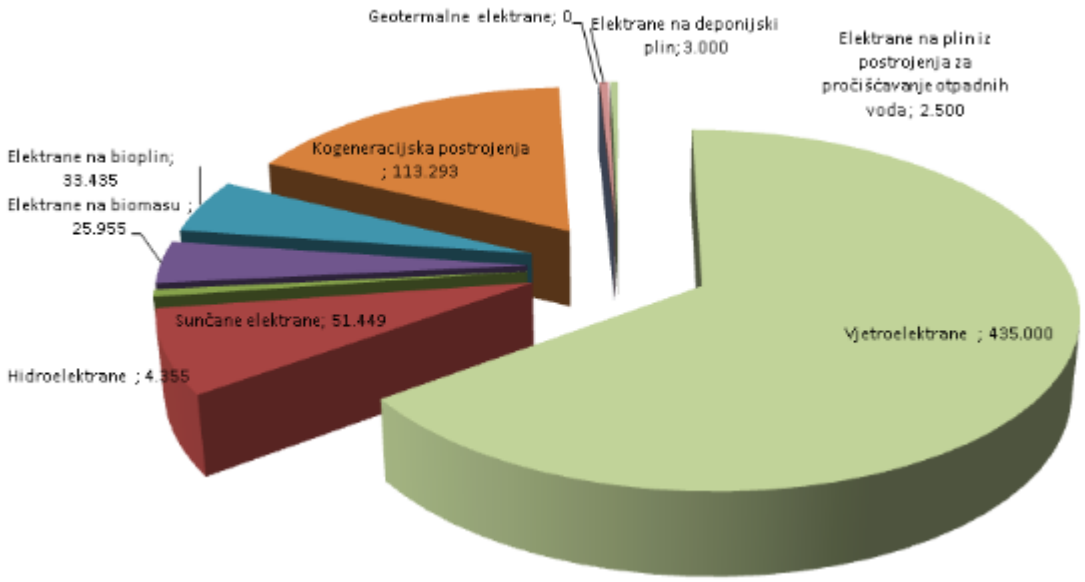
2.4. Obnovljivi izvori u RH

Republika Hrvatska bogata je obnovljivim izvorima energije. Instalirani izvori električne energije u Hrvatskoj su hidroelektrane, vjetroelektrane, elektrane na biomasu, elektrane na bioplin, geotermalne elektrane, solarne elektrane. Hrvatski operator tržišta električnom energijom (HROTE) nadležan je za sklapanje ugovora o otkupu električne energije s nositeljima projekata/povlaštenim proizvođačima koji su taj status stekli u skladu s procedurama definiram podzakonskim aktima koji reguliraju područje proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije. [4]



Slika 2.4.1 Grafički prikaz proizvodnje povlaštenih proizvođača za mjesec travanj 2017.godine, [4]

Na slici 2.4.1 prikazani su svi izvori električne energije povlaštenih proizvođača u RH, te je snaga izražena u kWh. Sa slike 2.4.1. može se zaključiti kako je iz sunčevih elektrana, za mjesec travanja, dobiveno 7 203 008 kWh.

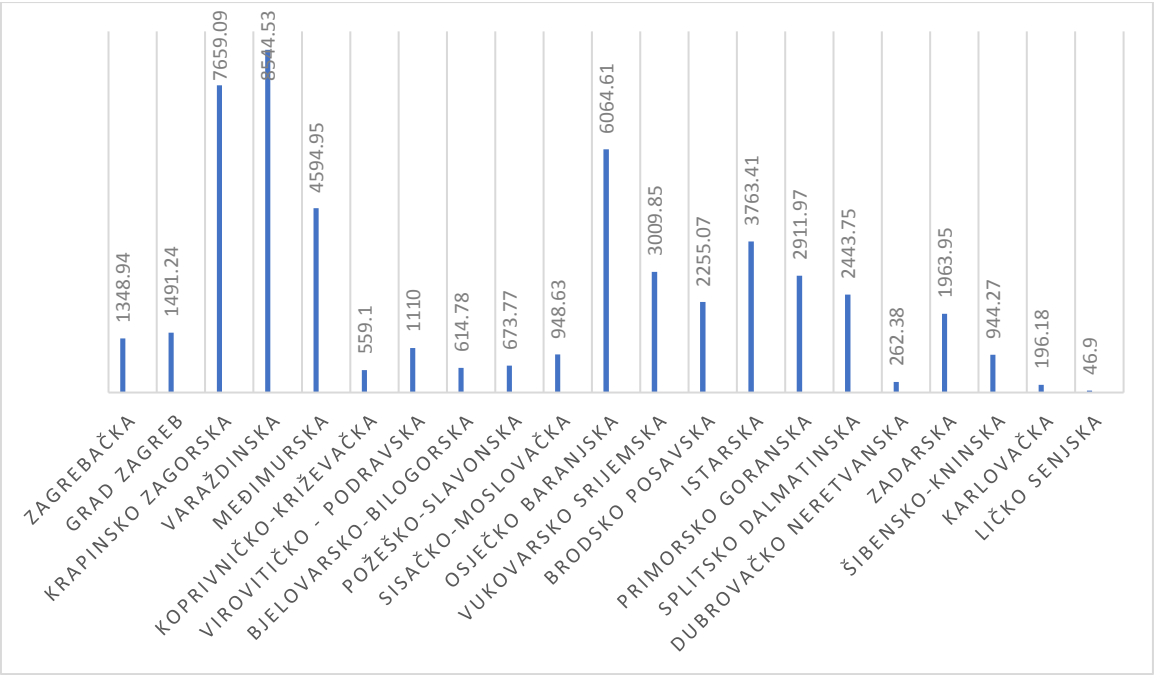


Slika 2.4.2 Grafički prikaz instalirane snage povlaštenih proizvođača za mjesec travanj 2017.godine [4]

Na slici 2.4.2. grafički je prikazana dostupna instalirana snaga povlaštenih proizvođača u RH za mjesec travanja u 2017.godini. Sa slike može se iščitati kako povlašteni proizvođači u RH raspolažu sa instaliranom snagom dobivenom iz sunčeve elektrane u iznosu od 51 449 kWh.

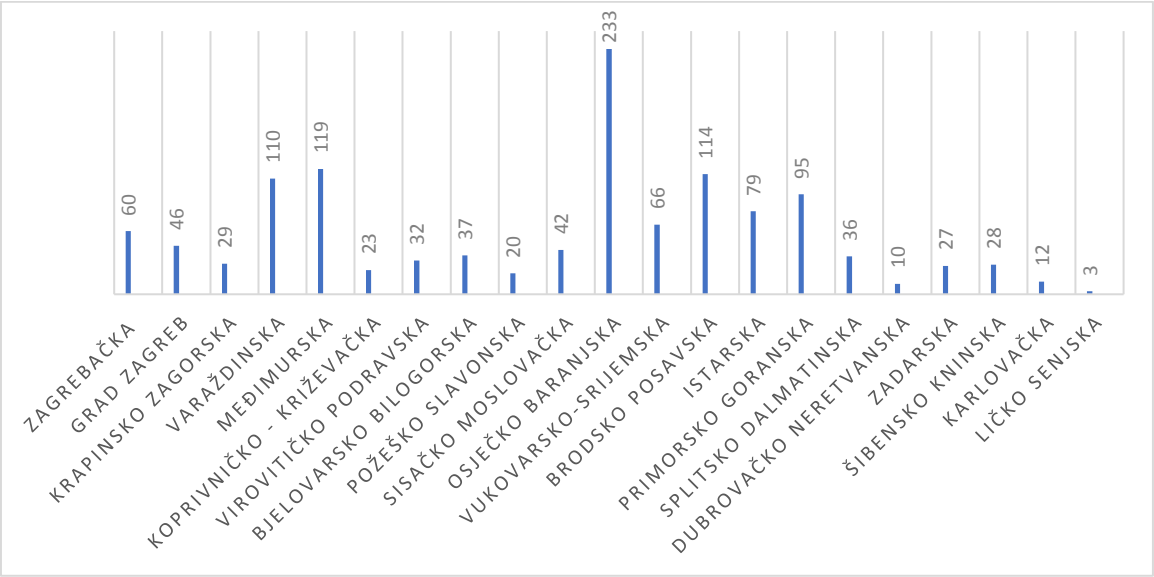
Instalirana snaga dobivena iz sunčeve energije instalirana je u 1 221 postrojenju. Fotonaponska elektrana „Ambarine“ ima najveću pojedinačnu instaliranu snagu u vrijednosti od 500 kW. Vlasnik fotonaponske elektrae „ Ambarine“ je tvrtka „ FLAMTRON d.o.o“.

RH svake godine povećava udio instalirane snage sunčevih elektrana, stoga HROTE posjeduje potpisane ugovore o otkupu električne energije iz 9 postrojenja koja nisu puštena u pogone, te povećanje već planirane instalirane snage sunčevih elektrana za 2 002 kW. [4]



Graf 2.4.3. Grafički prikaz snaga sunčevih elektrana po županijama [5]

Na grafu 2.4.3. prikazana je instalirana snaga sunčevih elektrana po županijama RH. Vrijednosti su izražene u kilowatt-ima [kW]. Može se vidjeti kako najviše instalirane snage iz solarnih elektrana ima u Varaždinskoj županiji, dok najmanje ima u Ličko-Senjskoj županiji.[5]



Graf 2.4.4. Grafički prikaz ukupnog broja sunčevih elektrana posebno za svaku županiju [5]

Na grafu 2.4.4 prikazana je ovisnost broja elektrana po županijama RH. Najviše instaliranih elektrana ima u Osječko-baranjskoj županiji, dok najmanje u Ličko-senjskoj. U Osječko-baranjskoj županiji ima najviše instaliranih elektrana, no Osječko-baranjska županija ne predvodi i po instaliranoj snazi elektrana. [5]

3. FOTONAPONSKI MODULI I FOTONAPONSKI SUSTAVI

U 3. poglavlju opisani su „on grid“ i „off grid“ sustavi, njihove prednosti i nedostatci, te način spajanja. Poluvodička dioda, model solarne ćelije, te su detaljno opisani moduli s obzirom na vrstu kristala od kojih su izrađeni.

3.1 Poluvodička dioda (PN-spoj)

PN-spoj nastaje kada se jednom dijelu kristala čistog poluvodiča dodaju trovalentne (akceptorske) primjese, tako da nastane p-tip poluvodiča, a drugim dijelu petero-valentne (donorske) primjese, te nastaje n-tip poluvodiča. Kao posljedica gradijenta koncentracije, na samo granici između PN spoja, nastaje difuzija elektrona iz n-područja prema p-području i šupljina iz p-područja prema n-području. [6]

Bitno svojstvo PN-spoja predstavlja njegovo ispravljačko djelovanje, tj. lakše vodi struju kada je p-područje pozitivno a n-područje negativno, tada je napon u propusnom smjeru, a suprotno tome napon je u zapornom smjeru. Dakle, PN-spoj radi kao dioda i propušta struju samo u jednom smjeru.[6]

U slučaju da se na PN-spoj priključi izvor vanjskog napona u propusnom smjeru tako da je p-područje okarakterizirano kao pozitivan pol, a na n-strani negativni pol, dolazi do protjecanja struje elektrona iz n-područja u smjeru p-područja i šupljina iz p-područja u smjeru prema n-području. [6]

Koncentracija šupljina na p-području ne mora biti jednaka koncentraciji elektrona na n-području. U slučaju da je n-područje znano jače obogaćeno primjesama od p-područja dolazi do znatno jače struje elektrona preko PN - spoja nego struja šupljina kada je dioda vezana u propusnom smjeru tako da dolazi do znatne količine elektrona u p-područje. [6]

Veza između vanjskog napona U i jakosti struje I_d kroz PN – spoj, tzv. I-U karakteristika diode, može se prikazati jednadžbom:

$$I_d = I_z(e^{\frac{eU}{kT}}) \qquad (3.1\text{-}1)\ [6]$$

Gdje je:

I_d – struja diode (jakost struje kroz PN-spoj), A

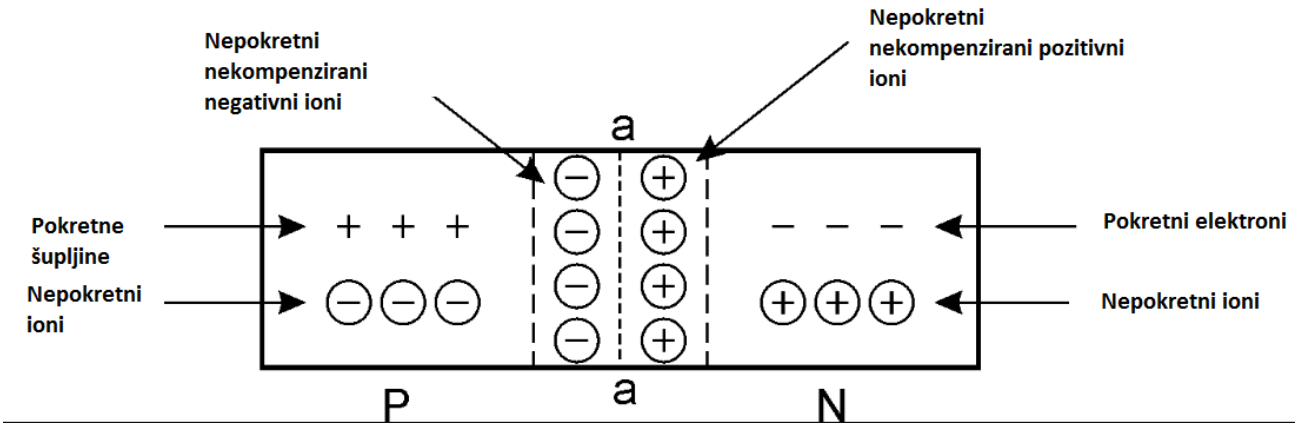
I_z – struja zasićenja, A

e – elementarni naboj, (1,602176462 * $10^{-19}C$)

U – električni napon, V

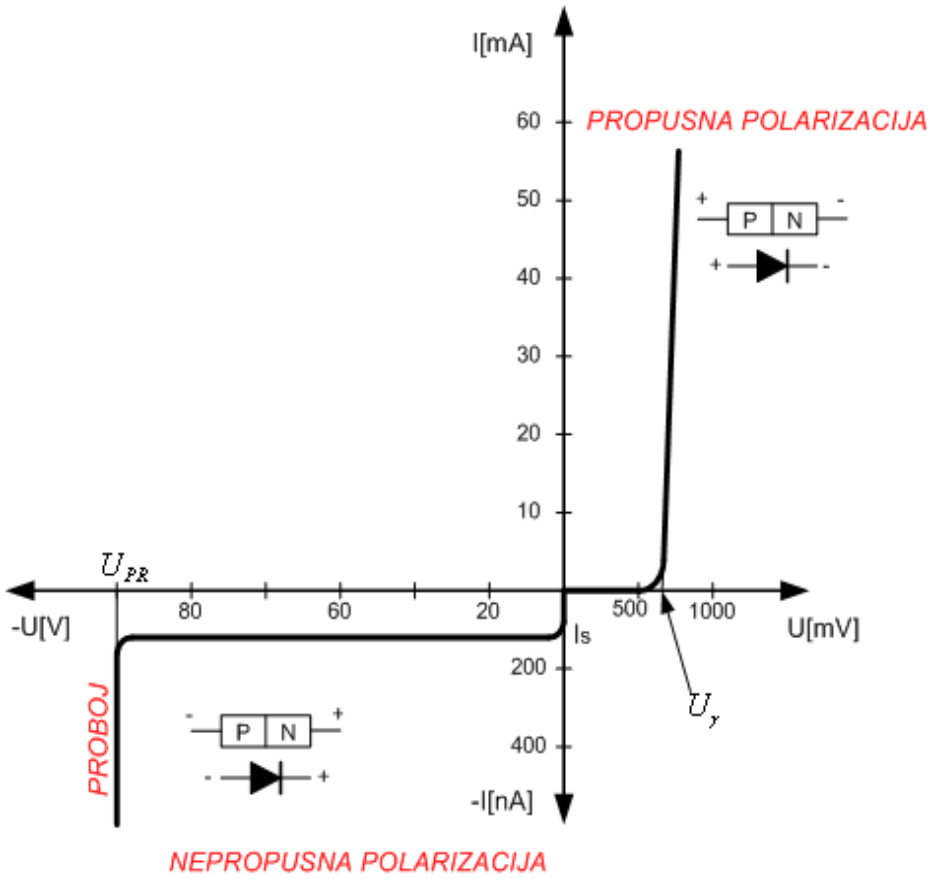
k – Boltzmannova konstanta, (1,3806 * $10^{-23}J/K$)

T – termodinamička temperatura, K



Slika 3.1.1 Shematski prikaz PN spoja [7]

Na P strani spoja postoji visoka koncentracija slobodnih šupljina, a na N strani visoka koncentracija slobodnih elektrona, ako se spoj promatra pri normalnoj temperaturi (300 K). Tako pokretljivi većinski nosioci naboje miješaju se s materijalom na suprotnoj strani spoja. Struja miješanja predstavlja kretanje nosioca naboja iz područja visoke koncentracije u područje niže koncentracije. Ova struja se još naziva i struja polja. Nastanak struje miješanja stvara uvjete kako bi PN spoj imao ispravljačka svojstva. [7]



Slika 3.1.2. Strujno naponska karakteristika PN diode[8]

Struja kao funkcija narinutog napona kroz P-N (ispravljačku) diodu je određena Shockley-evom jednadžbom:

$$I = I_s \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1\right) \qquad \cdot(3.1\text{-}2)\ [8]$$

Napon koljena U_γ: ako se približno linearni dio karakteristike aproksimira pravcem, napon na kojem pravac siječe apscisu je U_γ – najčešće se uzima kao konstantnih $U_\gamma = 0.7$ V [8]

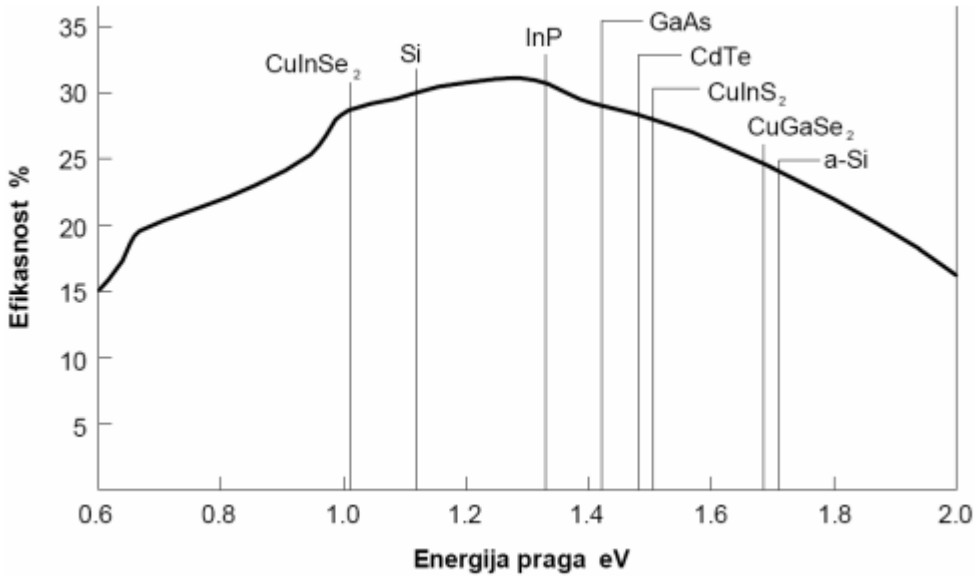
3.2 Solarne ćelije

Solarna ćelija ili „fotonaponska ćelija“ je uređaj koji pretvara fotone iz sunčeve svjetlosti u električnu energiju. U osnovi, fotoćelija mora ispuniti fotonaponski efekt. Područje istraživanja vezanih uz solarne ćelije nazivaju se fotonaponski sustavi. Povijesno gledano, solarne ćelije koristile su se na mjestima gdje nije bila dostupna električna energija iz mreže. Sateliti koji kruže oko zemlje, potrošačkim sustavima poput ručnih kalkulatora, ručnih satova, daljinskih radio-telefona. Solarne ćelije smatraju se jednom od ključnih tehnologija prema održivoj opskrbi energijom.

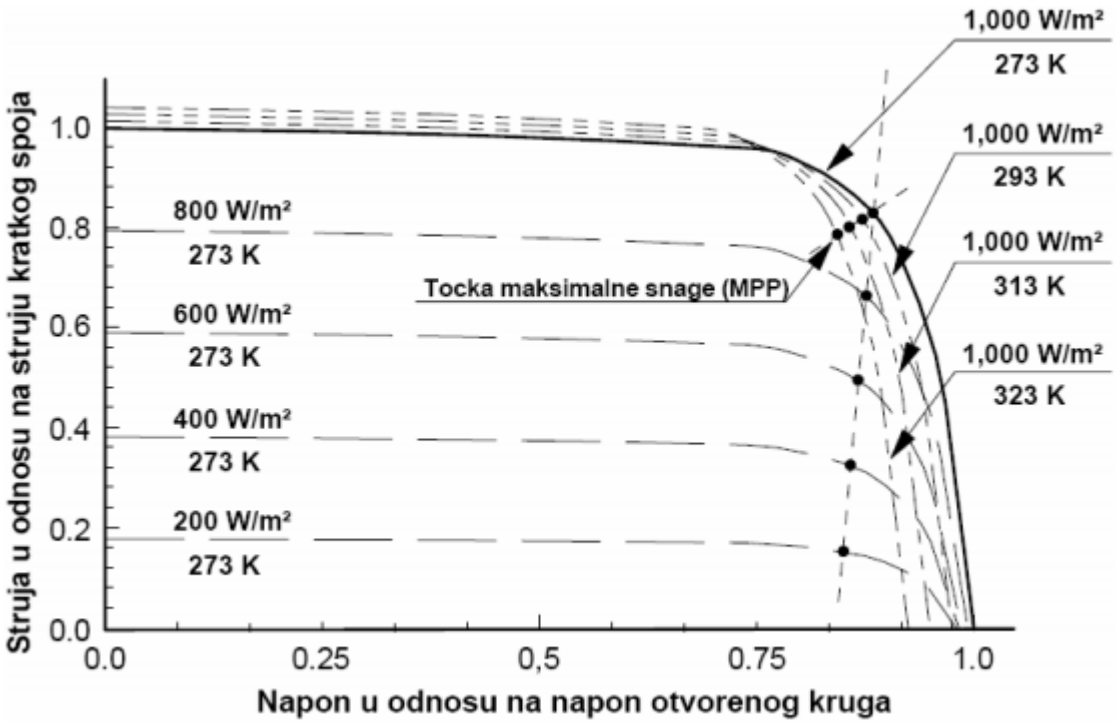
Parametri koji opisuju praktične izvedbe fotonaponskih ćelija su napon otvorenog kruga, stupanj djelovanja te struja kratkog spoja. Stupanj djelovanja fotonaponske ćelije opada sa porastom temperature.

Tablica 3.2. 1. Temeljni parametri solarnih ćelija [8]

Vrsta ćelije	U_{ok}/V	$J_{ks}, mA/cm^2$	η
monokristalna – Si ćelija	0,65	30	0,17
Polikristalna – Si ćelija	0,60	26	0,15
Amorfna – Si ćelija	0,85	15	0,09
CdS/ Cu_2S	0,5	20	0,10
CdS/CdTe	0,7	15	0,12
GaAIAs / GaAs	1	30	0,24
GaAs	1	20	0,27



Slika 3.2.1. Teorijska efikasnost raznih poluvodičkih materijala i prosječne uvjete [9]



Slika 3.2.2. Strujno naponska karakteristika Si FN ćelije u ovisnosti o snazi Sunčeva zračenja i temperaturi [10]

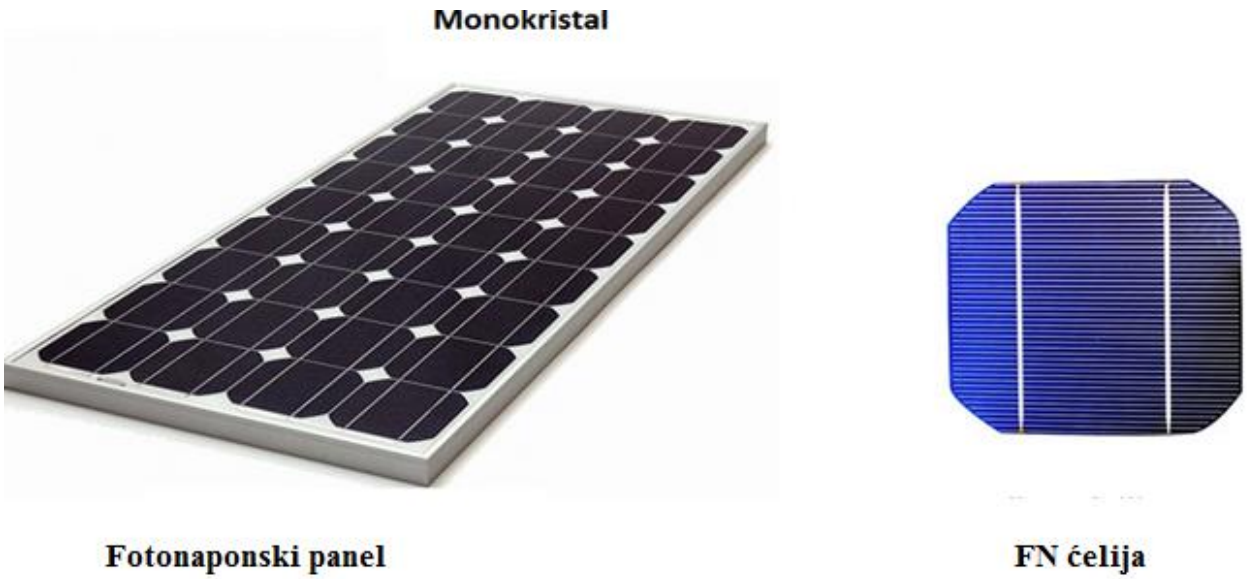
Strujno naponska karakteristika FN ćelija ne razlikuje se previše od strujno naponske karakteristike poluvodičke diode. Sa slike 3.2.2. vidi se kako pomicanje točke snage direktno ovisi o sunčevom zračenju i temperaturi.

3.2.1 Monokristalna – Si ćelija

Monokristalna fotonaponska električna solarna ploča dugi niz godina bila je najbolji izbor pri odabiru fotonaponskih ploča. Monokristalne ćelije su među najstarijima, najpouzdanijima i najučinkovitijim načinima za proizvodnju električne energije. Svaki modul napravljen je od jednog silikonskog kristala i učinkovitiji je od novijih i jeftinijih tehnologija polikristalnog i tankog filmskog PV panela, ali je poprilično skup. Prepoznatljivi su po crnoj ili svijetlo plavoj boji.

Najučinkovitija monokristalna fotonaponska električna ploča izrađena je u SAD-u, proizvođača „SunPower“. Učinkovitost ploče je 22,5%. Znanstveno je dokazano kako u teoriji najveća korisnost kristalnih solarnih ćelija iznosi 29%. Realna očekivanja su kako se korisnost fotonaponskih ploča kreće od 24% do 25%.

Pojedinačni kristalni solarni paneli, prema nekim izvorima, mogu trajati i do 50 godina. Znanstveno je dokazano, kako se godišnje, korisnost panela smanjuje 0,5%. Iako je trajnost ovih panela dugoročna, njihova korisnost se u prosjeku nakon 25 godina toliko smanji da paneli postaju ekonomski neiskoristivi, te ih je potrebno zamijeniti.



Slika 3.2.3. Prikaz monokristalnog fotonaponskog panela i sunčeve ćelije

Ploče izrađene od monokristalnih silikonskih kristala nisu najpovoljniji odabir, iz razloga što je proces izrade jedan od najsloženijih i najskupljih. Dobra silicijska sirovina je skupa, a trošak izrade jedinstvenog čistog kristala je vremenski dugotrajan. Novo razvijene tehnologije su poprilično jeftinije uspoređujući se sa monokristalnom tehnologijom.

3.2.2. Polikristalna – Si ćelija

Polikristalni solarni paneli najčešći su odabir kupaca iz razloga što su najjeftiniji. Na tržištu su okarakterizirani kao proizvod prosječne kvalitete. Polikristalne ćelije prepoznatljive su po vidljivim zrnima „efekt metala“. Polikristalne ćelije uglavnom su kvadratnog oblika, te im površina podsjeća na mozaik zbog više različitih kristala koji sačinjavaju modul. Polikristalne ćelije su znatno jeftinije od monokristalnih ćelija zbog načina izrade silicija.

Polikristalne ćelije jednostavnije su za proizvodnju i manji su troškovi proizvodnje, te ih to čini poželjnima za kupce s malim i srednjim krovnim površinama. Vijek trajanja im je približno jednak kao i kod monokristalnih ćelija, odnosno u prosjeku 25 godina.

Korisnost polikristalnih ćelija manja je nego li kod monokristalnih ćelija, te im je to jedan od bitnijih nedostataka. Polikristalne ćelije su poprilično lomljive, te ih je teško zaštitit od ne predvidivih udaraca.



Slika 3.2.4. Prikaz polikristalnog fotonaponskog panela i sunčeve ćelije

3.2.3 Amorfna – Si ćelija

Amorfne Si ploče, površine ćelije od 1 m^2, u mogućnosti su pretvoriti 1000 W/m^2 sunčevog zračenja u 50 W električne energije. Debljina sloja iznosi manje od 1 µm, proporcionalno tome i troškovi proizvodnje znatno su smanjeni. Amorfna ili tanko slojna ćelija nastaje kada se tanki film silicija stavi na staklo ili neku drugu podlogu. Stupanj korisnosti Amorfnih Si ćelija znatno je manji u usporedbi sa polikristalnim i monokristalnim ćelijama. Amorfne ćelije najčešće se koriste za uređaje kojima je potrebna mala snaga poput džepnih računala, satova ili kao element fasade na zgradama. [11]

Tablica 3.2.1. Očekivana istraživanja u području korištenja tankog filma silicija (TFSi) [11]

Materijal: tanki film silicija	2008.-20013. (kratkoročno)	2013. — 2020. (srednjeročno)	2020. – 2030. (dugoročno)
Cijena modula, €/w_p (bez PDV-a)	<0,95 za 100 Mw_p	<0,65 za 200 Mw_p	<0,4 za 500 Mw_p
Stupanj djelovanja modula, %	> 10 staklena podloga	> 12 nesavitljivo	> 15 nesavitljivo
Cijena modula, €/w_p (bez PDV-a)	< 0,75 za 50 Mw_p	< 0,5 za 100 Mw_p	< 0,3 za 500 Mw_p
Stupanj djelovanja modula, %	> 9 savitljiva podloga	> 11 savitljiva	> 13 savitljiva
Stupanj djelovanja ćelije, %	> 15	>17	> 19

3.2.4. Solarne ćelije tankog filma od bakar – indij – diselenida (CIS)

Cis moduli od tankog filma temelje se na bakar – indij – diselenidu i proizvode se u dimenzijama 1,2 m * 0,6 m. Moduli sačinjeni od CIGSS imaju najbolju djelotvornost ćelije i modula od svih anorganskih tehnologija tankog filma. [11]

Tablica 3. Očekivana istraživanja u području korištenja tankog filma (CIGSS) [11]

Materijal: tanki film (CIGSS)	2008.-20013. (kratkoročno)	2013. — 2020. (srednjeročno)	2020. – 2030. (dugoročno)
Cijena modula, €/w_p (bez PDV-a)	<1,2 za 50 - 100 Mw_p	<0,8 za > 100 Mw_p	<0,4
Stupanj djelovanja modula, %	14	14 - 15	16 – 18
Stupanj djelovanja ćelije, %	> 18	>20	> 23

3.3. Sustavi priključeni na mrežu „On grid“ sustavi

Tijekom 1990.godina tržište je odlučno krenulo fotonaponske elektrane i instalacije na zgradama koristiti kao izvor električne energije priključen na električnu mrežu. Do 2000.godine „on grid“ sustavi su, na globalnom tržištu, korišteni više nego „off grid“ sustavi.



Slika 3.3.1 Sustav solarne elektrane spojen na mrežu[12]

Na slici 3.3.1 prikazani su elementi fotonaponskih instalacija korištenih za domaćinstvo. Najčešće snaga polja je od 1 do 5 kWp. Prikazani sustav povezan je sa lokalnom mrežom električne energije. Glavna prednost prikazanog sustava je da u slučaju kada domaćinstvo ne potroši svu proizvedenu električnu energiju, ostatak električne energije plasira se u lokalnu električnu mrežu. Još jedna prednost ovakvog sustava je što domaćinstvo, u slučaju nemogućnosti proizvodnje električne energije iz fotonaponskih panela, može dobiti električnu energiju iz lokalne mreže. [13]

Brojkama koje su naznačene na slici 3.3.1 označene su sljedeće funkcije fotonaponskog sustava:

1.) Fotonaponska kutija koja module povezuje u željenoj kombinaciji.
2.) Zaštitni dio – ovaj dio sastoji se od DC prekidača, koji služi kao zaštita za fotonaponsko polje, te štiti sustav od udara munje.

3.) Pretvarač – predstavlja temeljni dio fotonaponskog sustava. Zadaća pretvarača je da iz fotonaponskog sustava koji proizvodi istosmjernu struju, pretvori u izmjenični struju sa željenim vrijednostima napona i frekvencije.
4.) Mjerni sat – uloga mjernog sata je pokazivanje vrijednosti proizvedene električne energije iz fotonaponskog sustava na mreže. Mjerna jedinica je kWh.
5.) Kutija s osiguračima – služi za zaštitu domaćinstva od naglih naponskih i strujnih oscilacija.
6.) Trošila – električna trošila u domaćinstvu kao što je rasvjeta, televizija, grijanje.
7.) i 8.) Priključna kućica – povezuje domaćinstvo kabelima. [13]

Pretvarači moraju biti u mogućnosti pretvoriti snagu fotonaponskog sustava preko širokog spektra sunčeve svjetlosti. Pretvarači najčešće koriste praćenje maksimalne točke snage (engl. *maximum power point tracking* MPPT kako bi optimizirali iskorištenje električne energije. U većim fotonaponskim sustavima, koji koriste više pretvarača, moguće je u trenutku izlaska sunca svu proizvedenu snagu preusmjeriti na jedan pretvarač. U slučaju kada se zračenje sunca povećava, proizvedena snaga se optimizacijom raspoređuje i na ostale pretvarače. Kako sunce zalazi, smanjuje se broj korištenih pretvarača. Optimizirati pretvarače zahtjevan je intelektualan posao, posebno u slučajevima kada se radi o sustavima velikih kapaciteta. Malo elektroničkih naprava imaju sposobnost da iz tako velikih sustava zadržavaju veliku korisnost, na širokom rasponu vrijednosti snaga.[13]

Pretvarači se mogu podijeliti u četiri osnovne grupe:

1.) SREDIŠNJI – kompletna proizvedena snaga iz fotonaponskih panela pretvara se u izmjenični napon, te se proizvedena električna energija prenosi direktno u električnu mrežu.
2.) STRING – ova vrsta pretvarača povezana je s jednim nizom modula s klasičnim rasponom snaga od 1 do 3 kWp. Težina navedenog pretvarača kreće se oko 5 kg po kWp.
3.) VIŠENAMJENSKI – pretvarači pretvaraju snagu iz više modulskih nizova s različitima vršnim snagama, orijentacijama te zanemaruju utjecaj zasjenjenja.
4.) POJEDINAČNI – sve veći broj proizvođača nudi fotonaponske module s integriranim pretvaračima, čineći svaki modul svoj izmjenični izvor napajanja[13]

Za normalno funkcioniranje fotonaponskog sustava potrebni su različiti elementi koji povezuju fotonaponske panele i krutu mrežu. Troškovi, dugoročna pouzdanost, jednostavnost održavanja, a ponekad i jednostavnost izgleda, neki su od bitnih čimbenika koji se razmatraju pri odabiru fotonaponskih sustava. Navedeni parametri uglavnom se nazivaju komponentama ravnoteže sustava (engl. *balance of system* BOS). Kako cijene solarnih modula i ćelija sustavno opadaju, te su jako blizu cilju proizvođača da cijena po wattu iznosi jedan dolar. Trošak komponenata BOS može drastično utjecati na ukupne troškove fotonaponskog sustava, osim ako je pažljivo kontroliran. [13]

3.4. Samostojeći sustavi – „Off Grid“

Samostojeći sustavi koriste se na područjima gdje je potrebna opskrba električnom energijom, ali ne postoji mogućnost korištenja lokalne električne mreže. Postoji mogućnost korištenja diesel generatora, ali za njihovu upotrebu potrebni su određeni derivati. Trošak derivata konstantno se povećava, a priključak za napajanje iz lokalne električne mreže je preskup. Najbolja alternativa je instaliranje samostojećih „Off grid“ sustava. [13]



Slika 3.4.1. Prikaz samostalnog sustava za seosko domaćinstvo[13]

Prema slici 3.4.1. može se zaključiti da su strane krova seoskog domaćinstva okrenute prema istoku i zapadu. Navedene strane svijeta nisu prikladne za postavljanje fotonaponskih panela, iz razloga što bi im korisnost bila vrlo mala. U ovom slučaju fotonaponski moduli postavljeni su na susjedno polje, te okrenuti prema južnoj strani i nagnuti pod optimalnim kutom. [13]

Fotonaponski paneli međusobno su povezani, te izmjenični napon teče kroz podzemne kablove u domaćinstvo. Napon baterija najčešće je 12 V ili 24 V, no za veće sustave postoji mogućnost korištenja i baterija većeg kapaciteta.

Na slici 3.4.1. pod oznakom (5) nalazi se pretvarač, koji je spojen na bateriju. Fotonaponski sustav uz pomoć pretvarača proizvodi izmjenični napon u vrijednosti od 230 V i frekvencije 50 Hz, te opskrbljuje kućanstvo preko osigurača (6), koji omogućuje normalno korištenje kućanskih izmjeničnih aparata (7).

Kada bi se usporedila slika 3.4.1. i slika 3.3.1. lako je za uočiti kako jedinu razliku predstavlja što na slici 3.3.1 kao sustav skladištenja ne postoji baterija, nego postoji lokalna električna mreža. Prednost sustava sa slike 3.3.1. je što u slučaju nedostatka električne energije iz fotonaponskih

panela, trošila imaju mogućnost neograničenog napajanja iz lokalne električne mreže. U sustavu sa slike 3.4.1. u slučaju prestanka proizvodnje iz fotonaponskih panela, kućanski aparati imaju mogućnost napajanja samo onoliko koliki je kapacitet baterije. [13]

Veliki problem pri projektiranju samostojećeg fotonaponskog sustava predstavlja odabir baterije optimalnog kapaciteta. Potrebno je jako dobro isplanirati koliko je električne energije potrebno skladištiti da bi sustav funkcionirao bez problema. Ako se sustav pretjerano uveća stvaraju se nepotrebni troškovi, a ako se ne kupe baterije dovoljnog kapaciteta sustav ne radi svojom korisnošću.

Kristalno silicijski modul sačinjen od 36 ćelija povezanih u seriju ima mogućnost proizvodnje napona otvorenog kruga od oko 20 V i maksimalna točka snage na oko 17 V u slučaju jake sunčeve svjetlosti.

Neke od jednostavniji izvedbi samostojećih fotonaponskih sustava su :

1.) Bez baterije za pohranjivanje ili pretvarača – direktno napajanje istosmjernom električnom energijom kada je fotonaponski panel obasjan sunčevom svjetlošću. Kada je panel obasjan sunčevom svjetlošću, istosmjerni napon pokreće istosmjerni motor koji napaja polja vodom.
2.) S baterijom za pohranjivanje, bez pretvarača – u ovom slučaju potrošači su trošila male snage i male potrošnje. Najčešće se radi o solarnim kalkulatorima, ručnim satovima.
3.) S pretvaračem, bez baterije za pohranjivanje – ova vrsta sustava korisna je kada je potreban izmjenična struja u bilo koje doba dana. [13]

Samostojeći fotonaponski sustavi obuhvaćaju širok spektar namjene sa snagama od izuzetno malih vrijednosti do vrijednosti snaga mjerenih u kW. Do 1990.godine samostojeći fotonaponski sustavi bili su izvrstan izvor zarade proizvođačima samostojećih fotonaponskih sustava. Napretkom tehnologije i dolaskom na tržište „On grid“ sustava proizvodnja samostojećih fotonaponskih sustava naglo je pala.

Pouzdana pohrana energije ključna je za većinu samostojećih fotonaponskih sustava. Bez dovoljno kapaciteta za pohranu energije, samostojeći sustav postaje nestabilan i nema se iz čega napajati. Ako se potrebni kapacitet za pohranu energije detaljno isplanira, samostojeći fotonaponski sustavi imaju mogućnost dostatnog napajanja trošila.

Mnoge nove vrste akumulatorskih baterija, u posljednje vrijeme, došle su na tržište. Nikal – kamdij, nikal – metal – hibrid i litijev ion neke su od novoproizvedenih vrsta akumulatorskih baterija. Sadašnji samostojeći fotonaponski sustavi koriste tradicionalne akumulatorske baterije. Prva asocijacija na tradicionalne akumulatorske baterije je 12 V baterija koja se koristi u automobilskoj industriji. Bitna razlika između akumulatora korištenog u automobilima i akumulatora korištenog za samostojeće fotonaponske sustave je u radnom vijeku trajanja.

Kod akumulatorskih baterija za samostojeće fotonaponske sustave dolazi do prolaska malih vrijednosti struja, što omogućuje dulje korištenje akumulatora, odnosno veći broj punjenja i pražnjenja akumulatorske baterije.

Kapacitet akumulatorske baterije navodi se u amper satima (Ah). U slučaju kada potpuno napunjena akumulatorska baterija 12 V može dati 20 A tijekom 10 sati rada, kapacitet baterije je 200 Ah. Napon akumulatorske baterije je 12 V, ukupna pohranjena energija u akumulatorsku bateriju iznosi 2400 Wh.

Regulator napunjenosti koristi se za regulaciju struje iz fotonaponskog sustava u bateriju, i od baterije do različitih električnih aparata. Uloga regulatora napunjenosti je da regulira prekomjerno punjenje kada proizvodnja električne energije iz fotonaponskih panela premašuje potražnju.

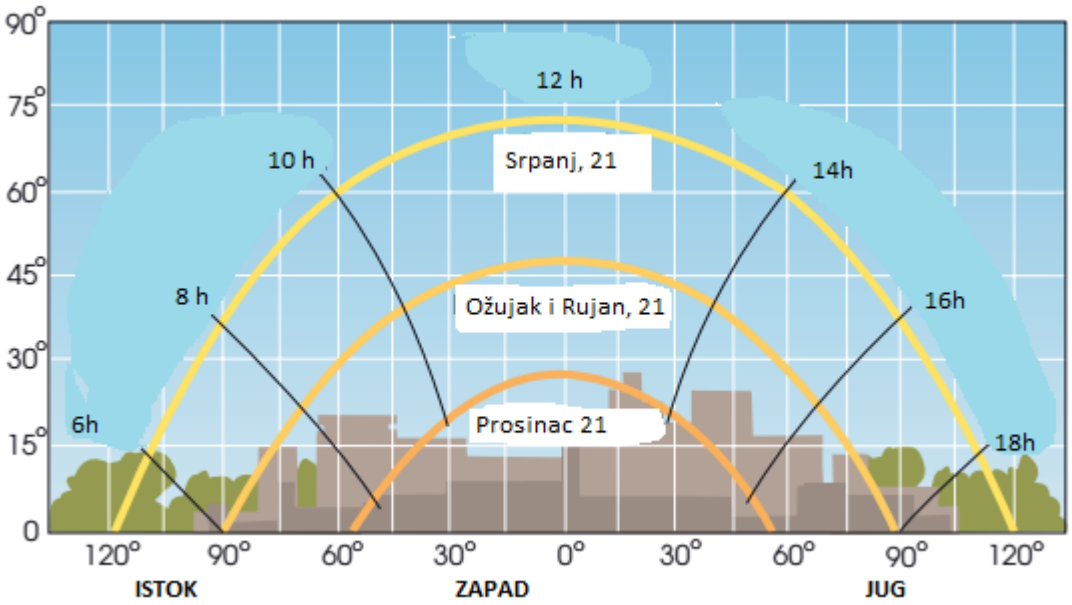
4. UTJECAJ ZASJENJENJA NA FOTONAPONSKE SUSTAVE

U fotonaponskim sustavima tehnologija je napredovala u svakom pogledu. Proizvode se jeftinije ćelije, a povećana im je korisnost. Korištenjem solarne energije direktno se utječe na smanjenje zagađenja okoliša. Fotonaponski sustavi su napredovali u svakom segmentu, jedini problem koji je teško rješiv upravo je utjecaj zasjenjenja. Zasjenjenje može imati veliki utjecaj na korisnost solarnih fotonaponskih ploča. Dolazi se do zaključka da je zasjenjenje najbolje izbjeći, no to u praksi nije izvedivo.

4.1. Sunčevo zračenje i zasjenjenje

Kako bi fotonaponska elektrana bila što isplativija, od velike je važnosti na koje područje će se elektrana postaviti, kako bi iskoristila što više sunčeve energije. Mora se uzeti u obzir kako se sunce kreće kroz određena godišnja doba. Kut azimuta, udaljenost sunca od zemlje ovisi o godišnjem dobu. Fotonaponski sustavi najčešće se postavljaju na južnu stranu krova kuće ili nekog drugog područja postavljanja.

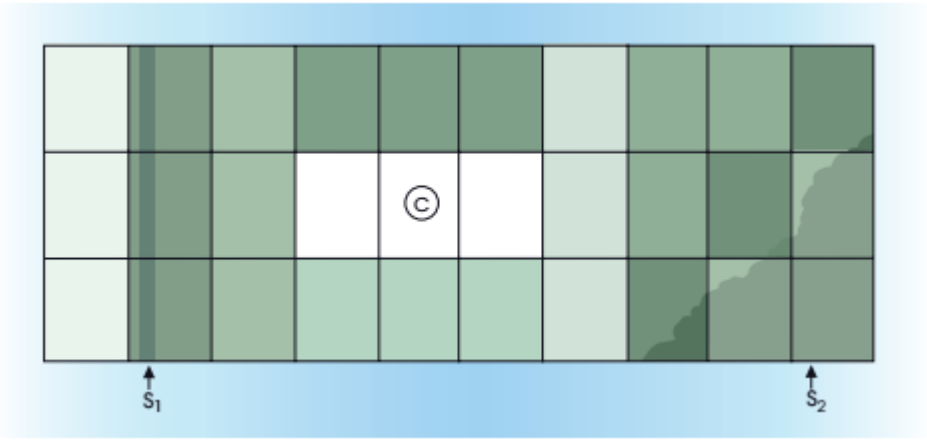
Prilikom postavljanja fotonaponskog sustava vrlo je važno izbjeći utjecaj zasjenjenja što je više moguće, iz više razloga. Kako bi elektrana radila punim kapacitetom bitno je kako fotonaponske ćelije nisu zasjenjene. Prilikom utjecaja zasjenjenja postoji mogućnost od nastajanja „vruće točke“ na modulu. Prašina, izmet ptica, slojevi snijega na fotonaponskim modulima izazivaju trenutni utjecaj zasjenjenja, te se mogu kontrolirati urednim održavanjem fotonaponskih panela. Trajnim zasjenjenjima treba posvetiti puno više pažnje, zato što je njihov utjecaj puno veći. Stupanj osunčanosti ovisi o godišnjem dobu, položaj okolnih zgrada različito osjenjuje fotonaponsku elektranu ovisno o kojem se dijelu dana radi, kao što različito osjenjuje i položaj okolnog drveća. [13]



Slika 4.1.1 Prikaz utjecaja zasjenjenja po periodima kroz dan ovisno o mjesecima u godini[13]

Utjecaj zasjenjenja komplicira se i u slučaju kada zasjenjuju elementi poput dimnjaka, TV antene, satelitski odašiljači. U svakom slučaju lakše je rješiv problem kada zasjenjuje dimnjak, nego kada je razlog zasjenjenja susjedna zgrada. Kada se zasjenjenje ne može izbjeći, veliku ulogu ima projektant fotonaponskog sustava koji će optimizirati fotonaponsku elektranu.

U slučaju kada dođe do zasjenjenja više panela, najbolja opcija je ako su paneli iz istog niza. Vizualni prikaz navedenoga može se vidjeti na slici 4.1.2. gdje je prikazano 10 paralelnih nizova od 30 panela, te svaki niz sačinjava 3 modula. [13]



Slika 4.1.2. Raspored nizova panela za smanjenje utjecaja zasjenjenja[13]

Na slici 4.1.2 sa lijeve strane sustava može se uočiti zatamnjena uska pruga, a do smanjenja zasjenjenja dolazi tako da se moduli rasporede vertikalno. Kako se sunce pomiče, tako dolazi i do pomicanja sjene. Druga sjena nastala utjecajem drveta, u obliku trokuta zasjenjuje desni donji dio fotonaponskog sustava. Uz pretpostavku da ne dolazi do pomicanja drveća, te da drvo uvijek zasjenjuje donji desni dio FN-a, moduli mogu biti spojeni u nizove u obliku trokuta.

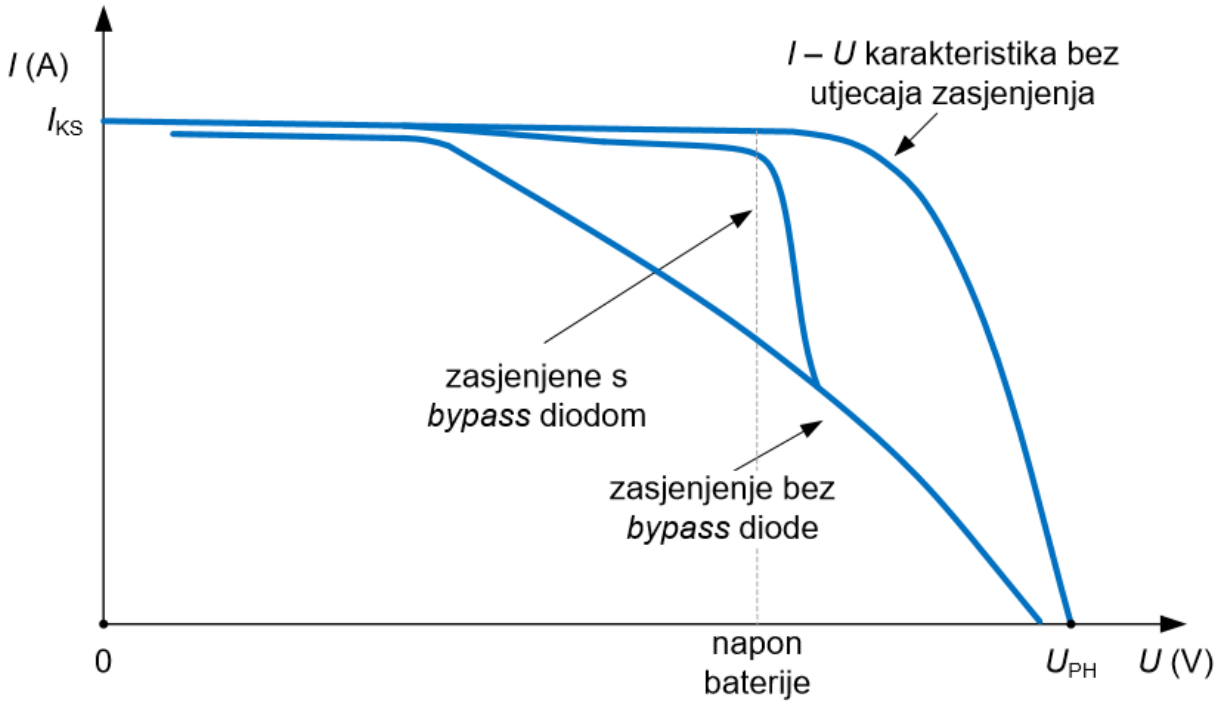
Kako bi se djelomično riješio problem zasjenjenja fotonaponskog sustava, proizvođači su projektirali i proizveli optimizatore snage kojima je uloga smanjenje zasjenjenja. Naravno postavljanje ovakvih uređaja poskupljuje cijenu samog modula, a samim time i cijenu fotonaponkog sustava.

4.2. Učinak zasjenjenja

Kako je već i navedeno, zasjenjenje može imati ogroman utjecaj na korisnost solarnih fotonaponskih ploča. Ako i mali dio solarne fotonaponske ploče bude pod utjecajem zasjenjenja, dolazi do velikog smanjenja korisnosti cijelog fotonaponskog panela. Razlog što je fotonaponski panel toliko podložan utjecaju zasjenjenja, i u slučaju ako je samo mali dio fotonaponskog panela zasjenjen, je upravo taj što se fotonaponski panel sastoji od serijski spojenih fotonaponskih ćelija. Iz navedenog se može zaključiti, da u slučaju kada se izlazna snaga pojedine ćelije značajno smanji, izlazna snaga cijelog sustava spojenog u seriju svodi se na razinu struje koja prolazi kroz ćeliju na kojoj se apsorbira najmanje svjetlosti.

Problem djelomičnog zasjenjenja nije samo u tome što znatno smanjuje korisnost fotonaponskog panela. U slučaju kada je fotonaponska ćelija zasjenjena, postoji mogućnost da ćelija prestane proizvodi električnu energiju, te postane trošilo. Ako sustav nije dovoljno dobro zaštićen, postoji mogućnost da ga utjecaj zasjenjenja uništi.[14]

Utjecaj zasjenjenja može se djelomično ublažiti dodavanjem premosne diode. Proizvođači dodaju jednu premosnu diodu po modulu da bi zaštitili FN niz ili dodaju nekoliko dioda unutar jednog modula, po jednu za svaku grupu od nekoliko ćelija. [15]



Slika 4.2.1 Utjecaj zaobilazne diode na I-U karakteristiku FN modula [15]

Izuzev zaobilazne diode, može se koristiti i blokirajuća dioda – u slučaju kada je niz modula spojen paralelno. Uloga blokirajuće diode je da sprječava povratnu struju (struja mraka) kroz module koji ne funkcioniraju ispravno. [15]

5. PROGRAMSKI PAKET „Photovoltaic planning software PV*SOL“

Kako bi se dobili što točniji rezultati i detaljniji matematički, te grafički prikaz u ovom diplomskom radu, za izračun korišten je računalni program „PV*SOL“. Kako je utjecaj zasjenjenja izuzetno važan kod proračuna izlazne snage elektrane, najbolji način izračuna je uz pomoć navedenog računalnog programa. PV*SOL je proizvod Njemačke programerske tvrtke.

PV*SOL je računalni program uz pomoć kojega je omogućeno grafički u 3 – D izvedbi prikazati zgrade na kojima je elektrana instalirana, omogućeno je sve objekte crtati individualno. Rezultati zasjenjenja prikazani su grafički, brojčano i tablično. Omogućen je odabir područja u kojem se objekt nalazi. Nakon odabira geografskog područja elektrane, moguće je odabrati parametre ,poput temperature, vjetra, godišnje osunčanosti, za odabrano geografsko područje. Elementi elektrane mogu se birati prema osobnom nahođenju. Izvedbu ćelija, snagu modula, način spajanja modula, kut postavljanja modula, samo su neke od opcija koje korisnik programa može koristiti.

Uz pomoć programskog paketa PV*SOL, simulirano je četiri slučaja zasjenjenja. U prvom slučaju simulirana je elektrana bez utjecaja zasjenjenja, u drugom slučaj objekt zasjenjenja predstavljao je dimnjak, u trećem slučaju predmet zasjenjenja predstavljalo je drvo sa krošnjom, te u četvrtom slučaju objekt koji je zasjenjivao fotonaponsku elektranu bila je zgrada.

5.1. Parametri solarne elektrane

Parametri solarne elektrane osnovni su podaci koji govore kakvi su materijali korišteni za izradu elektrane. Brojčane vrijednosti, izražene u mjernim jedinicama, korištenih elemenata.

Tablica 5.1.1 Prikaz podataka korištenog FN modula

FN modul:	Mono 200W	**Mehanički podaci**	
Proizvođač:	PV*SOL	Širina	990 mm
ELEKTRIČNI PODACI		Visina	1640 mm
Tip ćelije	Si monocrystaline	Dubina	30 mm
Prikladno samo za transformatorski izmjenjivač	Ne	**U/I parametri pri STC**	
Broj ćelija	60	Nazivna snaga	200W
Broj bypass dioda	3	Struja KS-a	7,98A

Tablica 5.1.2 Prikaz općih podataka izmjenjivača korištenog za simuliranje FN sustava

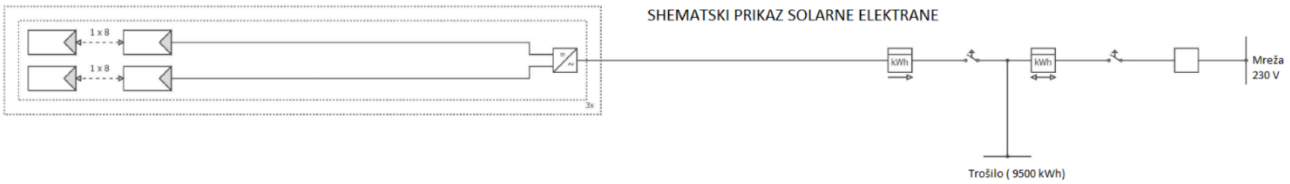
Izmjenjivač: Sunny Boy 3000TLUS-22 (208V)	
Proizvođač	SMA America, Inc.
Električni podaci	
DC-nazivna snaga	3,2kW
Maks. DC-snaga	3,2kW
Stand-By potrošnja	10W
Broj ulaznih faza	1
S transformatorom	Ne
AC-nazivna snaga	3 kW
Maks. AC-snaga	3 kW
Noćna potrošnja	0,15 W
Maks. ulazna struja	30 A
DC-nazivni napon	400 V
Broj DC-ulaza	4
Područje snage < 20% nazivne snage	95%
MPP-Tracker	
Maks. ulazna struja po MPP-trackeru	15 A
Min. MPP-napon	175 V

Tablice 5.1.1. i 5.1.2. prikazuju osnovne podatke o izmjenjivaču i fotonaponskom modulu. Navedeni podaci bitni su kako bi se znalo koji paneli su postavljani, koji izmjenjivači su postavljani, te kako bi se imao bolji uvid u simulirane rezultate.

Tablica 5.1.3. Podaci o mjestu postavljanja FN sustava i opći podaci FN panela

KONSTRUKCIJA FOTONAPONSKOG SUSTAVA	
Klimatsko područje	Slavonski Brod
Vrsta uređaja	Mrežno povezan fotonaponski generator s trošilima
POTROŠNJA	
Ukupna potrošnja	9500 kWh
Vršno opterećenje	2,6 kW
Položaj fotonaponskih modula	Južna krovna zona
Broj, vrsta modula i snaga pojedinačnog modula	48 * monokristalnih modula, 200W
Proizvođač	PV*SOL
Nagib	44°
Orijentacija	Jug 180°

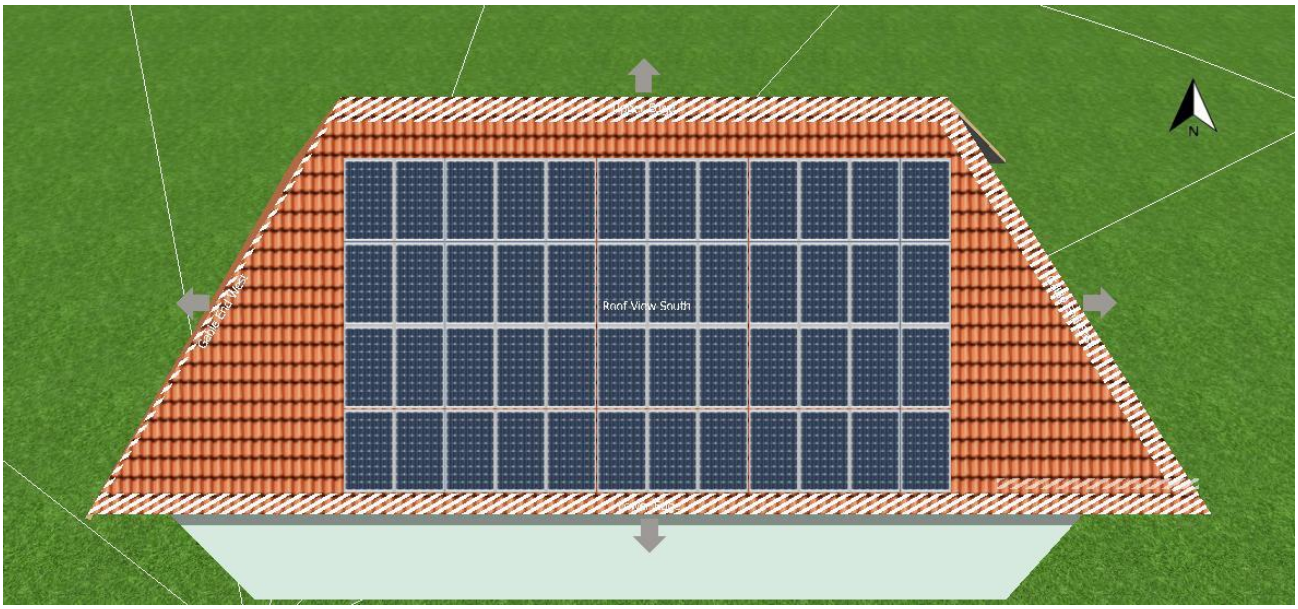
Prikazani podaci u tablici 5.1.3. prikazuje osnovne parametre elektrane, način polaganja FN modula, potrošnju FN elektrane.



Slika 5.1.1 Shematski prikaz instalirane solarne elektrane

5.2 Rezultati simulacije za slučaj bez zasjenjenja

U prvom slučaju simulirana je elektrana kada nema utjecaja djelomičnog zasjenjenja. Na slici 5.2.1. vide se postavljeni moduli na krov objekta, broj modula, te orijentacija postavljanja modula.

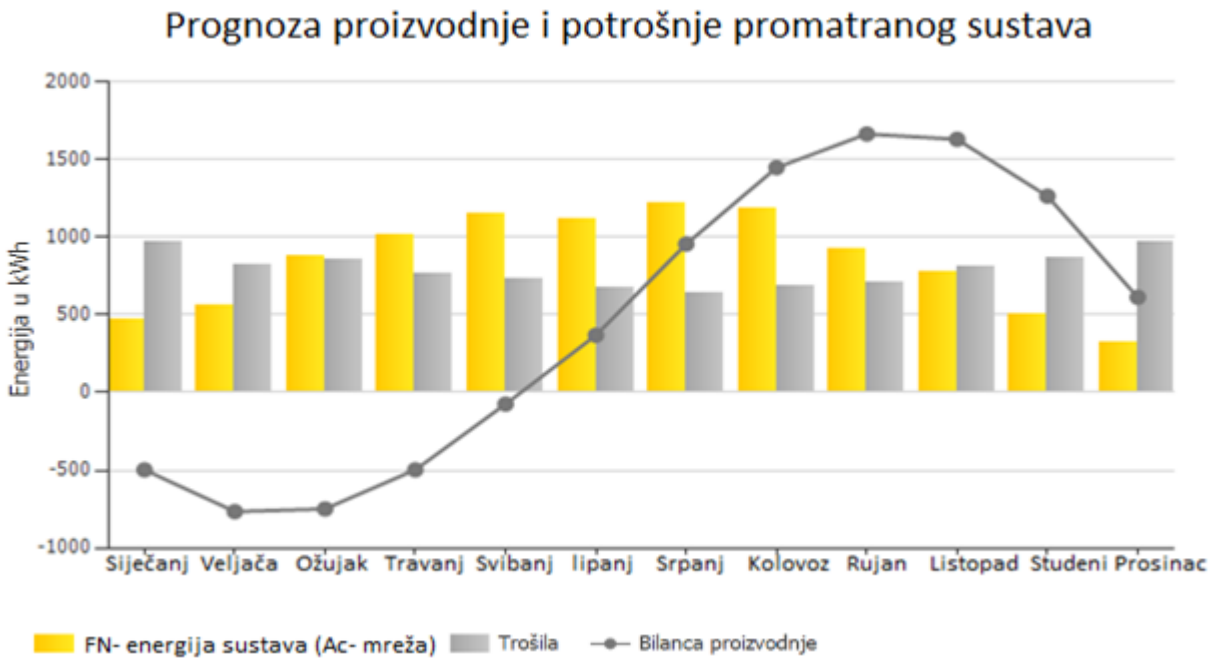


Slika 5.2.1 Prikaz solarnih panela postavljenih na krov objekta

Tablica 5.2.1. Rezultati simulacije za slučaj kada nema utjecaja zasjenjenja

DOBIT	
FN – energija sustava(AC mreža)	10242 kWh
Ukupna potrošnja sustava	9500 kWh
Vlastita potrošnja namirena iz FN sustava	3291 kWh
Vlastita potrošnja namirena iz mreže	6209 kWh
Isporučena energija u mrežu	6951 kWh
Ukupna bilanca sustava na kraju godine	742 kWh
Stupanj djelovanja	80,5 %
Udio vlastite potrošnje	32,1 %
Godišnji gubici zbog zasjenjenja	0,5 %/godina
Izbjegnute CO_2 emisije	6,145 g/kg
FINANCIJSKA DOBIT	
Ukupni troškovi investicije	14.400,00 €
Dobit od ukupnog kapitala	10,86 %
Trajanje amortizacije	9 godina
Troškovi proizvodnje električne energije	0,07 €c /kWh

Tablica 5.2.1. prikazuje rezultate simulacije kada nema utjecaja zasjenjenja. Iz rezultata se vidi kako elektrana radi optimalno, najprofitabilnije, te se može zaključiti da je ovo najisplativija izvedba elektrane.



Slika 5.2.2. Grafički prikaz prognoze proizvodnje i potrošnje promatranog sustava

U prvoj simulaciji simuliran je rad fotonaponske elektrane bez utjecaja zasjenjenja. Prikazani rezultati govore kako je korisnost elektrane očekivana. Utjecaj zasjenjenja ne postoji, stoga je i korisnost elektrane maksimalna.

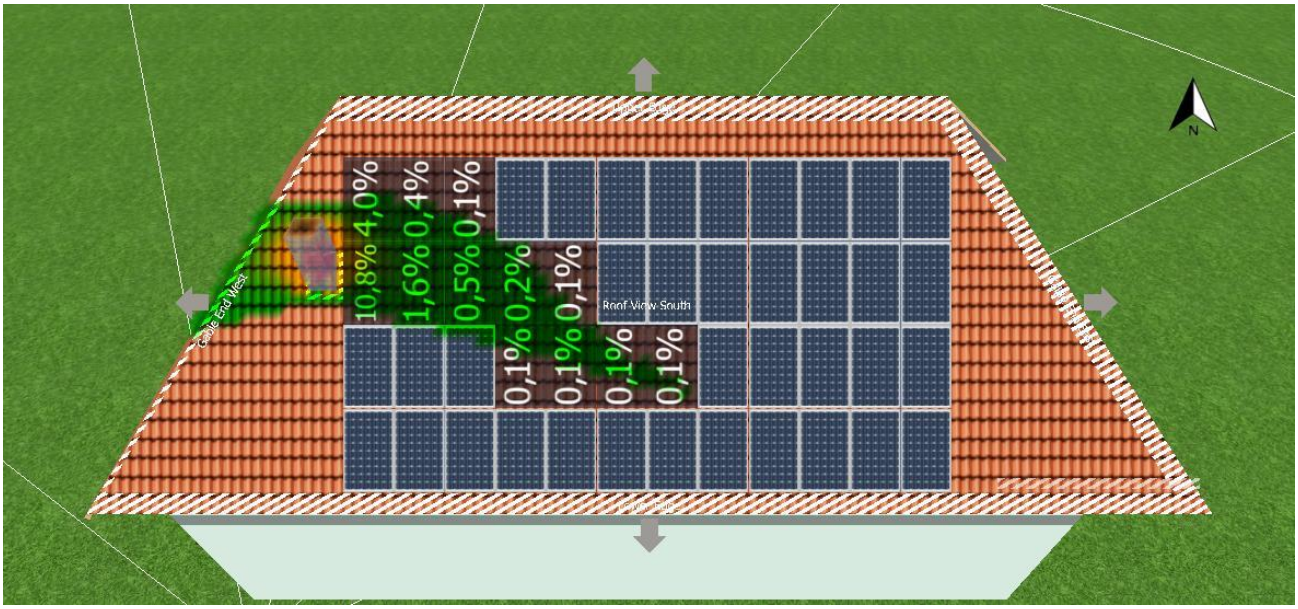
5.3 Rezultati simulacije za slučaj zasjenjenja dimnjakom

U slučaju kada se simulirao utjecaj zasjenjenja dimnjaka na slici 5.3.1. prikazan je utjecaj zasjenjenje dimnjaka na fotonaponski sustav izražen u postotcima (%) . Za razliku od prvog slučaja gdje nije bilo utjecaja zasjenjenja, u drugom slučaju vidi se kako dimnjak visine 1 m zasjenjuje fotonaponske panela.

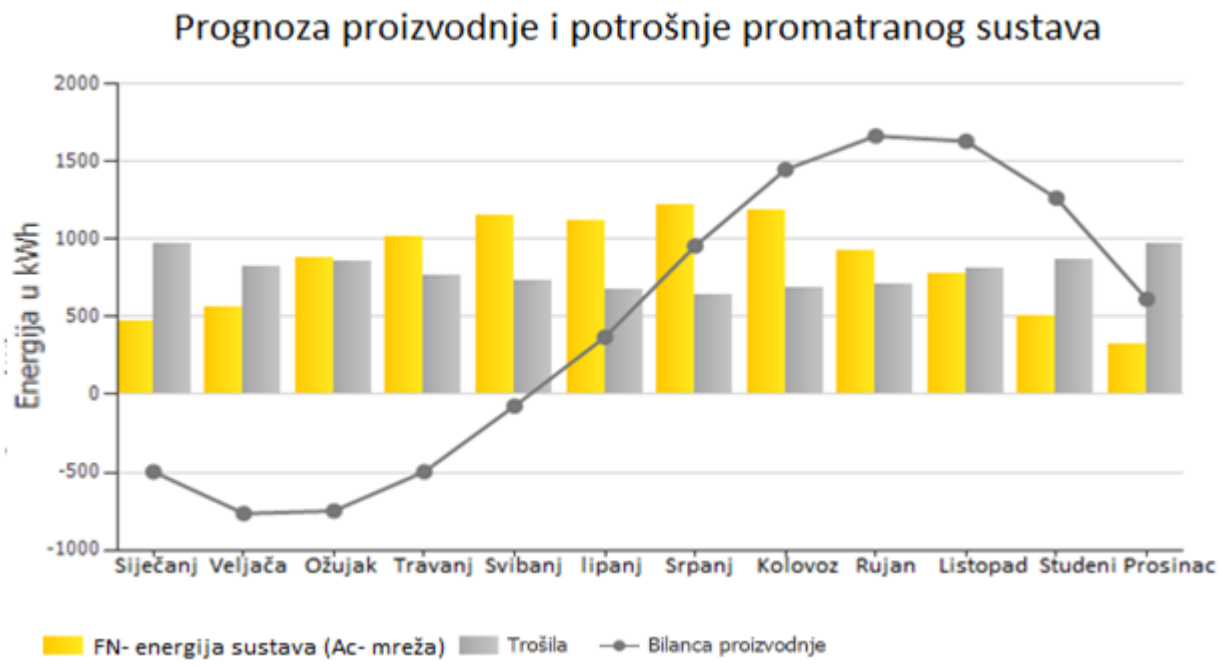
Tablica 5.3.1 Rezultati simulacija za slučaj zasjenjenja dimnjakom

DOBIT	
FN – energija sustava(AC mreža)	10138 kWh
Ukupna potrošnja sustava	9500 kWh
Vlastita potrošnja namirena iz FN sustava	3284 kWh
Vlastita potrošnja namirena iz mreže	6216 kWh
Isporučena energija u mrežu	6854 kWh
Ukupna bilanca sustava na kraju godine	638 kWh
Stupanj djelovanja	79,7 %
Udio vlastite potrošnje	32,4 %
Godišnji gubici zbog zasjenjenja	1,5 %/godina
Izbjegnute CO_2 emisije	6,083 g/kg
FINANCIJSKA DOBIT	
Ukupni troškovi investicije	14.400,00 €
Dobit od ukupnog kapitala	10,86 %
Trajanje amortizacije	9 godina
Troškovi proizvodnje električne energije	0,08 €c/kWh

Iz tablice 5.3.1. vidi se kako je rad elektrane neznatno smanjen, te je ovo nepovoljniji rezultat nego u simulaciji bez zasjenjenja. Utjecajem zasjenjenja vrijednost isporuke energije u mrežu smanjena je, te samim time smanjuje se i profitabilnost FN elektrane



Slika 5.3.1. Prikaz utjecaja zasjenjenja dimnjaka na fotonaponske panele izražen u postotcima (%)



Slika 5.3.2. Grafički prikaz prognoze proizvodnje i potrošnje pri utjecaju zasjenjenja dimnjakom

Simulirana je izvedba fotonaponske elektrane kada je utjecaj zasjenjenja postojan. Objekt (dimnjak) koji zasjenjuje panele nalazi se na krovu kuće. Sa slike 5.3.1. vidi se kako nisu zasjenjeni

svi paneli fotonaponskog sustava. Utjecaj zasjenjenja najveći je na panelima koji su najbliži dimnjaku, što je udaljenost dimnjaka veća zasjenjenost panela se smanjuje odnosno u potpunosti nestaje.

5.4. Rezultati simulacije za slučaj zasjenjenja drvetom

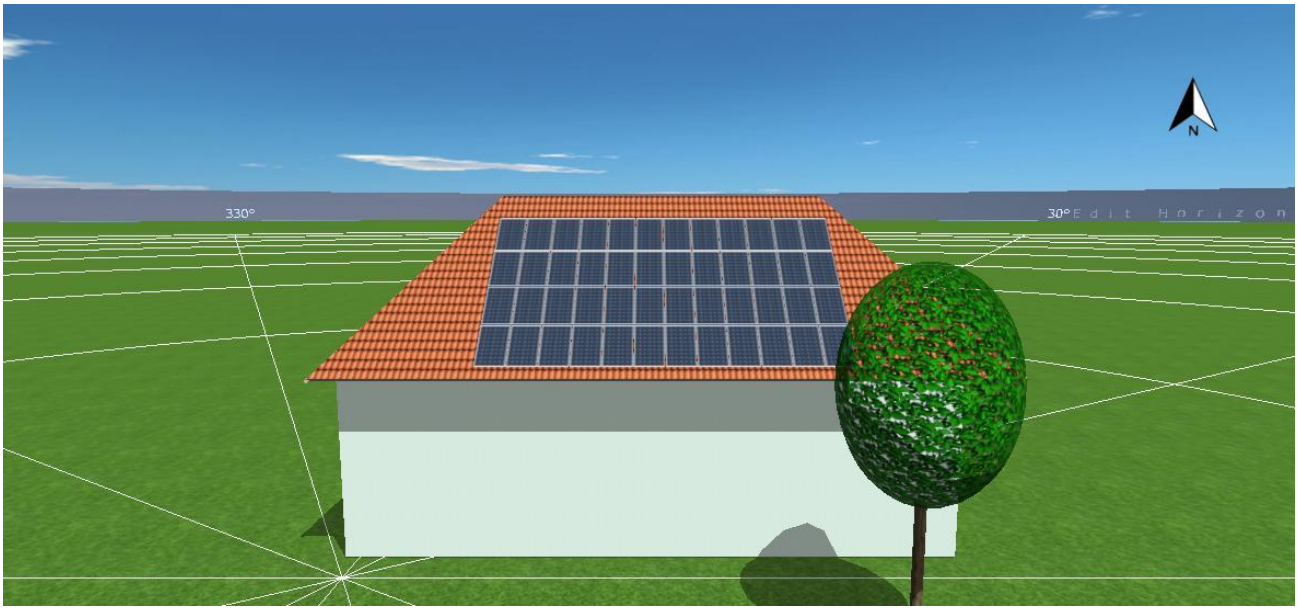
Simuliran je rad elektrane kada su fotonaponski paneli pod utjecajem zasjenjenja drveta. Krošnja drveta je nepravilnog oblika, pa se može zaključiti kako sjena na panelima nije pravilnog oblika. Sjena nepravilnih oblika dodatno otežava projektiranje same elektrane te način spajanja panela.

Tablica 5.4.1 Prikaz rezultata simulacije za slučaj zasjenjenja drvetom

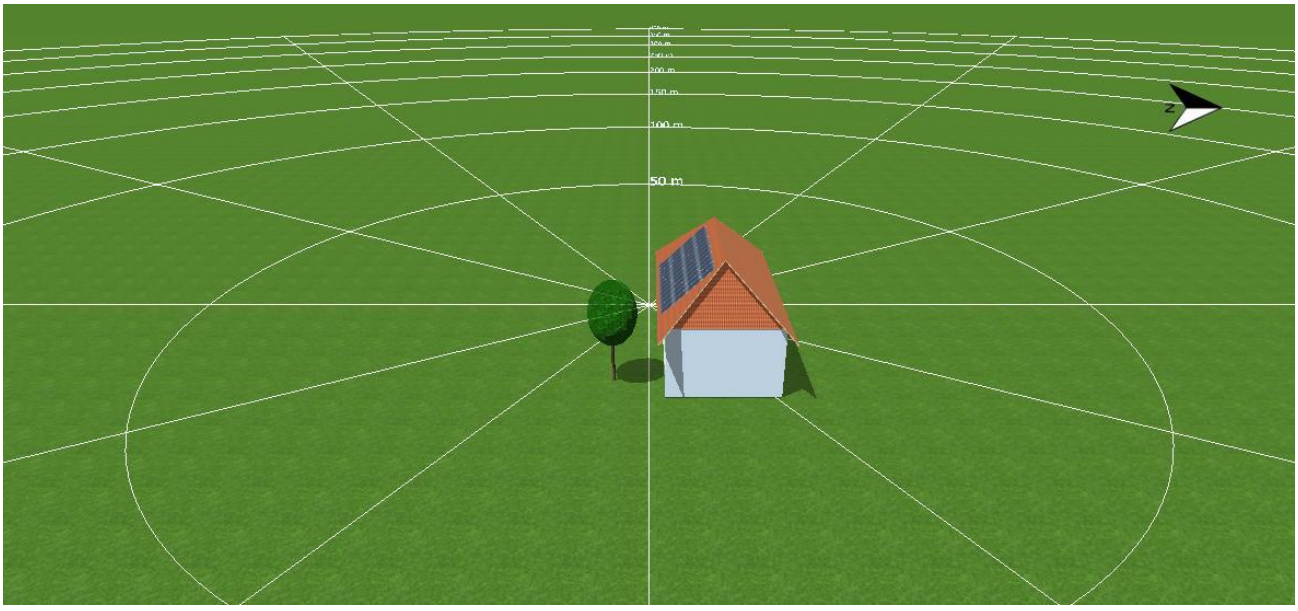
DOBIT	
FN – energija sustava (AC mreža)	10071 kWh
Ukupna potrošnja sustava	9500 kWh
Vlastita potrošnja namirena iz FN sustava	3273 kWh
Vlastita potrošnja namirena iz mreže	6227 kWh
Isporučena energija u mrežu	6798 kWh
Ukupna bilanca sustava na kraju godine	571 kWh
Stupanj djelovanja	79,1 %
Udio vlastite potrošnje	32,5 %
Godišnji gubici zbog zasjenjenja	2,1 %/godina
Izbjegnute CO_2 emisije	6,043 g/kg
FINANCIJSKA DOBIT	
Ukupni troškovi investicije	14.400,00 €
Dobit od ukupnog kapitala	10,86 %
Trajanje amortizacije	9 godina
Troškovi proizvodnje električne energije	0,09 €c/kWh

U tablici 5.4.1. prikazani su rezultati simulacije u slučaju zasjenjenja drvetom. Do sada su simulirana tri slučaja zasjenjenja, te se iz prikazane tablice može zaključiti kako je ovo najnepovoljniji

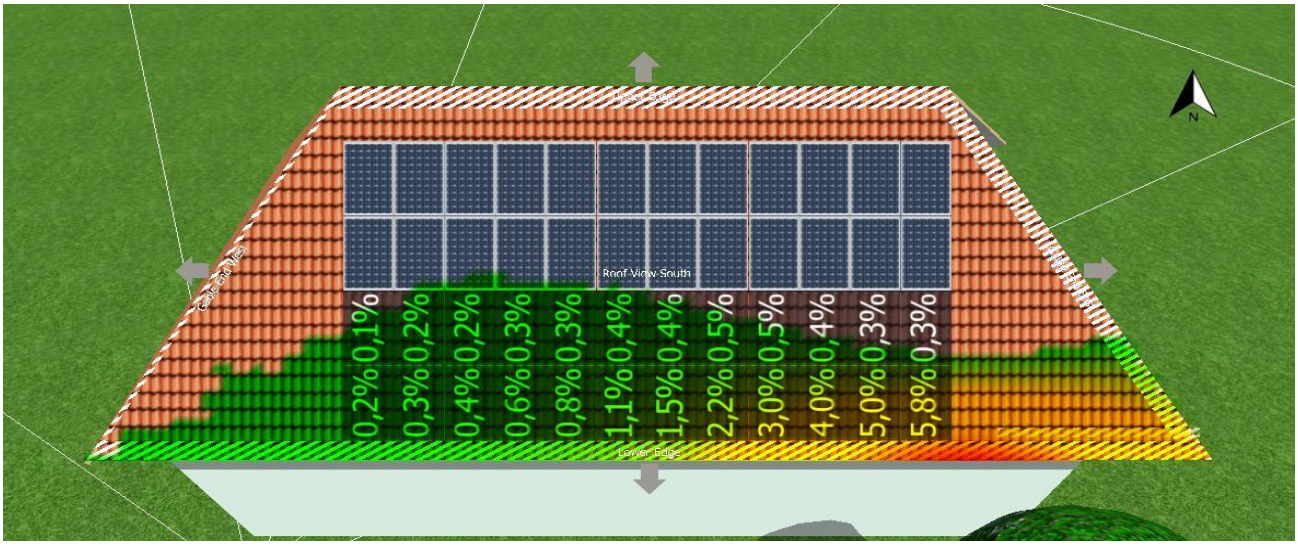
slučaj. Troškovi proizvodnje električne energije su se povećali, godišnji gubici zasjenjenja, te je stupanj djelovanja elektrane ispod 80%.



Slika 5.4.1 Vizualni prikaz položaja drveta s krošnjom u odnosu na objekt s instaliranim fotonaponskim sustavom

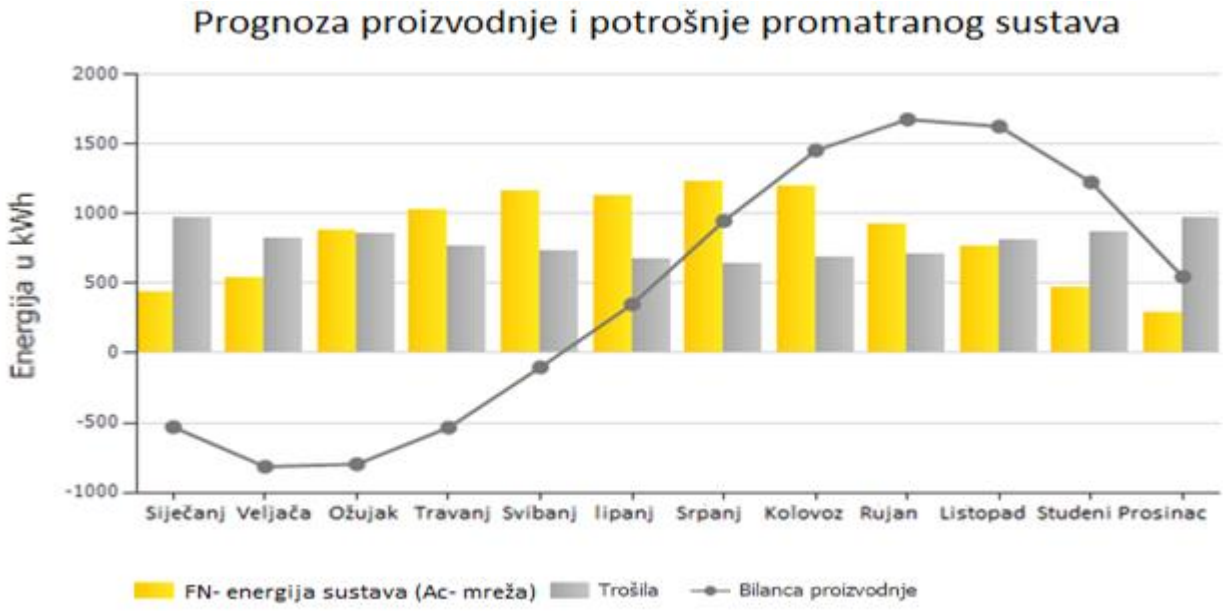


Slika 5.4.2. Vizualni prikaz položaja drveta s krošnjom u odnosu na objekt s instaliranim fotonaponskim sustavom iz drugog kuta gledanja



Slika 5.4.3 Prikaz utjecaja zasjenjenja drveta s krošnjom na fotonaponske panele izražen u postotcima (%)

Slika 5.4.3. grafički i postotno prikazuje utjecaj zasjenjenja na FN – panele. Krošnja drveta zasjenjuje više od polovine postavljenih panela, te je rad elektrane znatno ograničen. Što su paneli bliže krošnji drveta, utjecaj zasjenjenja je veći.



Slika 5.4.5. Grafički prikaz prognoze proizvodnje i potrošnje promatranog sustava kroz mjesece u godini

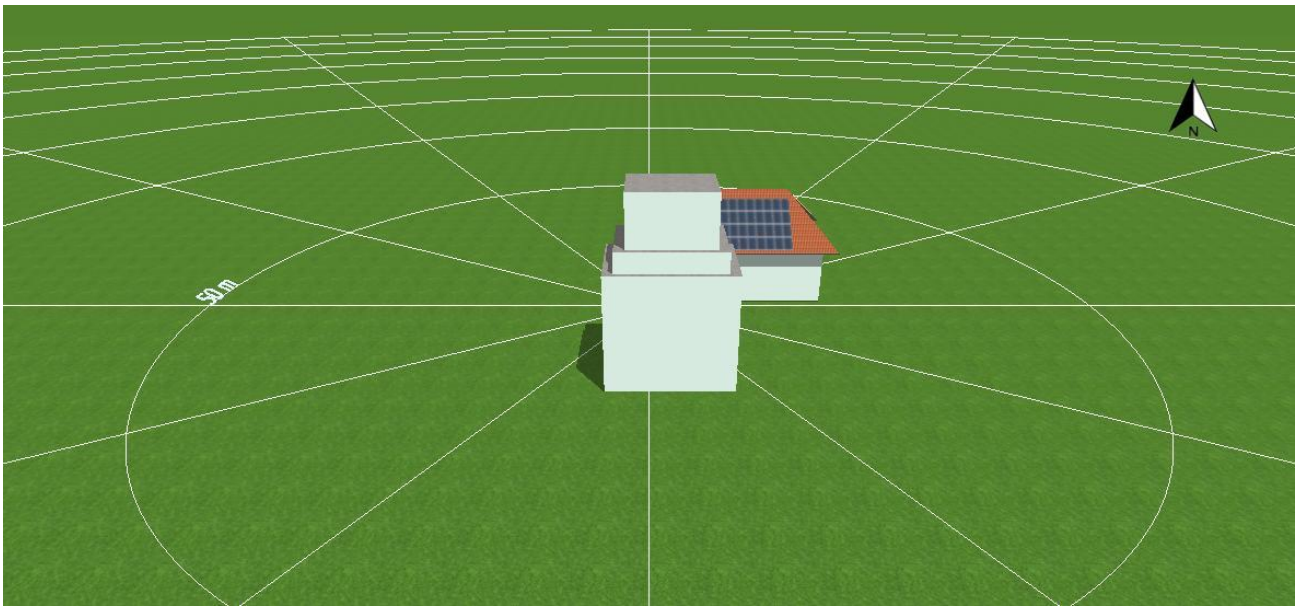
5.5 Rezultati simulacije za slučaj zasjenjenja susjednim objektom (zgrada)

Simulacija zasjenjenja susjednim objektom (zgrada) pokazuje kako je to najnepovoljnije mjesto za izgradnju elektrane. Na zasjenjenje susjednim objektom (zgradom) ne može se nikako utjecati, zato što nema mogućnosti ni načina kako pomaknuti zgradu.

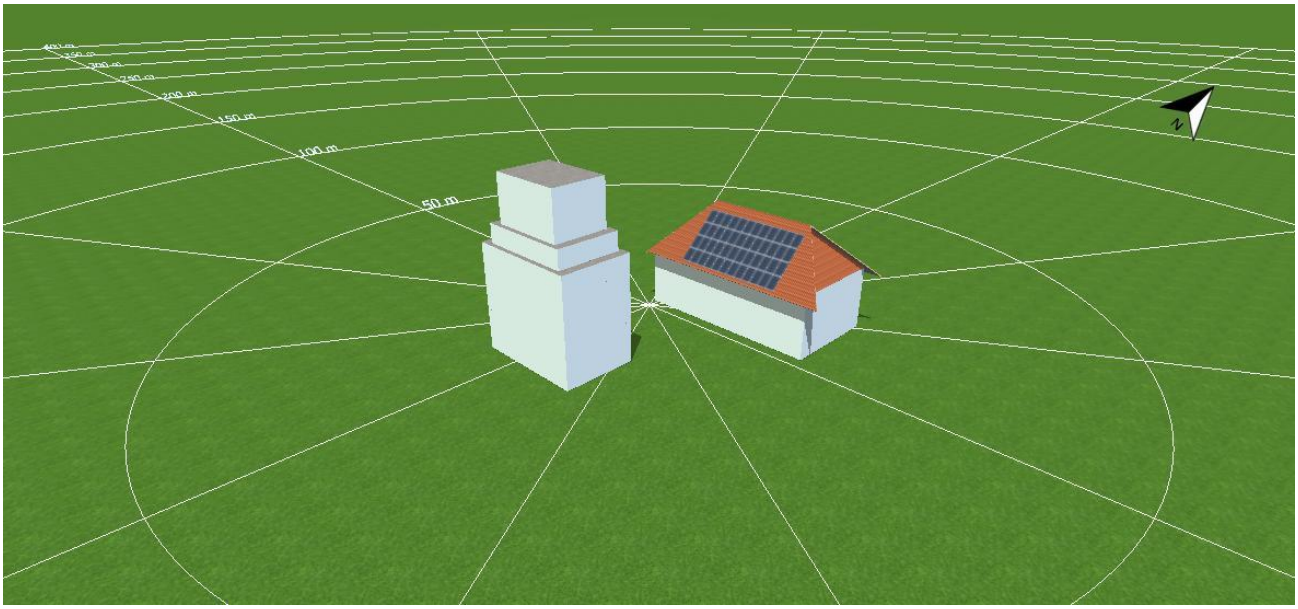
Tablica 5.5.1. Prikaz rezultata simulacije za slučaj zasjenjenja susjednim objektom (zgrada)

DOBIT	
FN – energija sustava (AC mreža)	9371kWh
Ukupna potrošnja sustava	9500 kWh
Vlastita potrošnja namirena iz FN sustava	3185 kWh
Vlastita potrošnja namirena iz mreže	6315 kWh
Isporučena energija u mrežu	6186 kWh
Ukupna bilanca sustava na kraju godine	-129 kWh
Stupanj djelovanja	74,2 %
Udio vlastite potrošnje	34 %
Godišnji gubici zbog zasjenjenja	8,9 %/godina
Izbjegnute CO_2 emisije	5,623 g/kg
FINANCIJSKA DOBIT	
Ukupni troškovi investicije	14.400,00 €
Dobit od ukupnog kapitala	10,63 %
Trajanje amortizacije	9,1 godina
Troškovi proizvodnje električne energije	0,10 €c/kWh

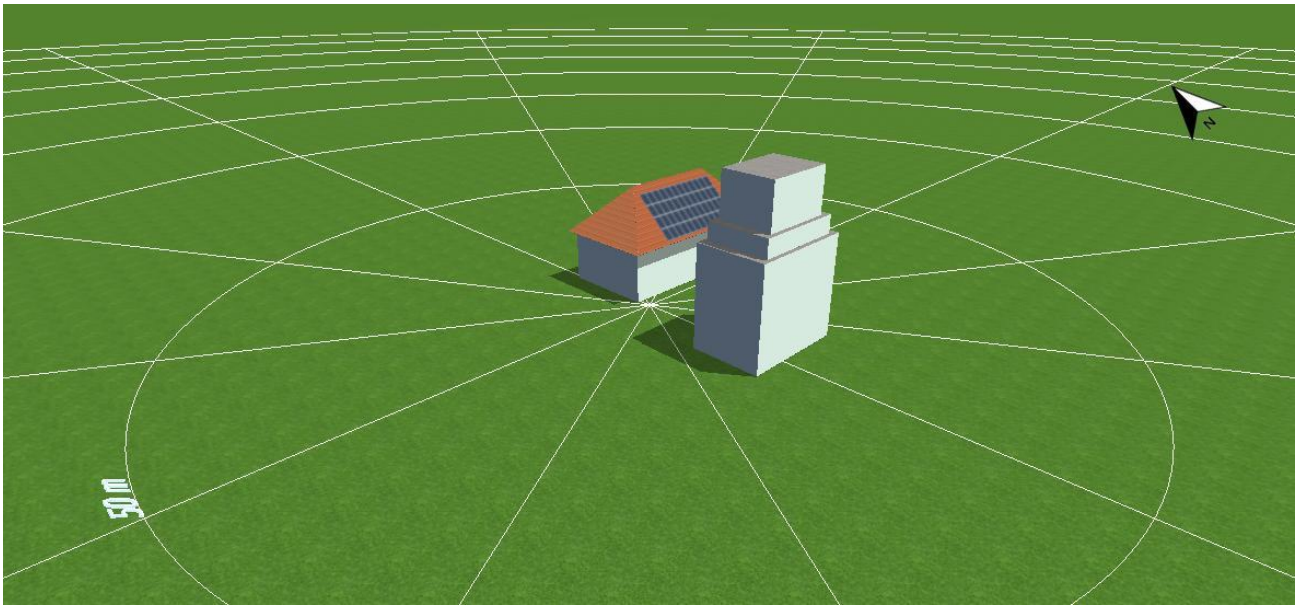
Tablica 5.5.1. prikazuje kako je došlo do najznačajnijeg utjecaja zasjenjenja, te je stupanj djelovanja FN elektrane 74,2%. U slučaju kada opada korisnost FN elektrane, rastu i troškovi proizvodnje električne energije, a kako dolazi do rasta troškova proizvodnje električne energije produljuje se i trajanje amortizacije.



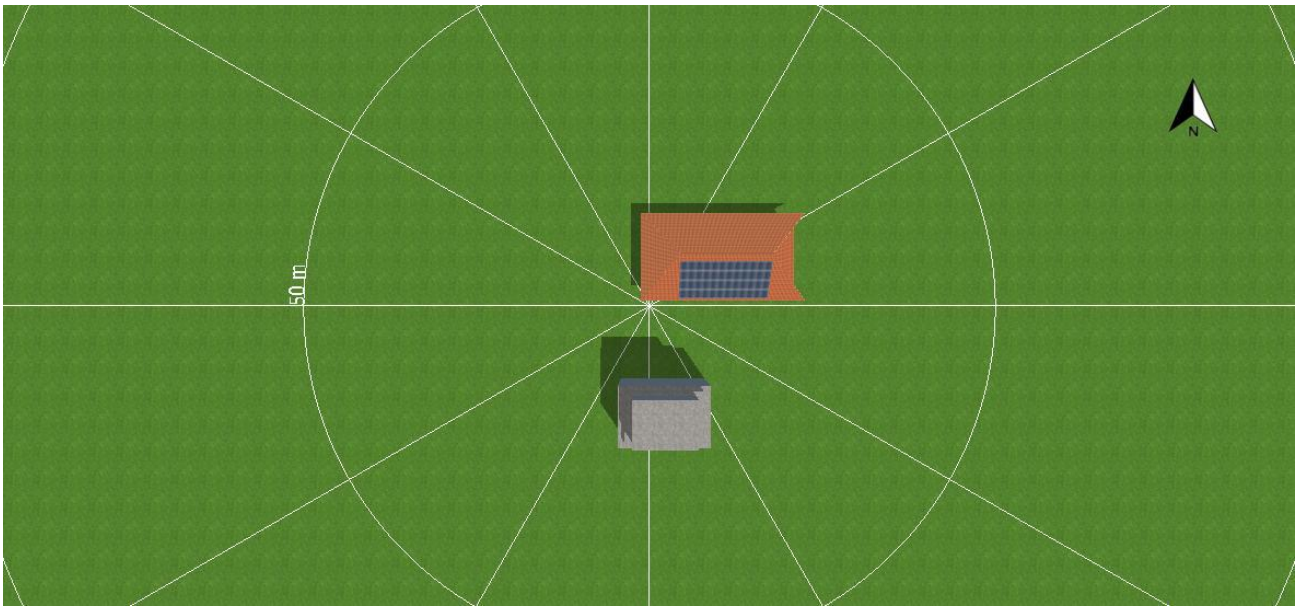
Slika 5.5.1. Vizualni prikaz položaja susjednog objekta (zgrada) u odnosu na objekt s instaliranim fotonaponskim sustavom iz prvog kuta gledanja



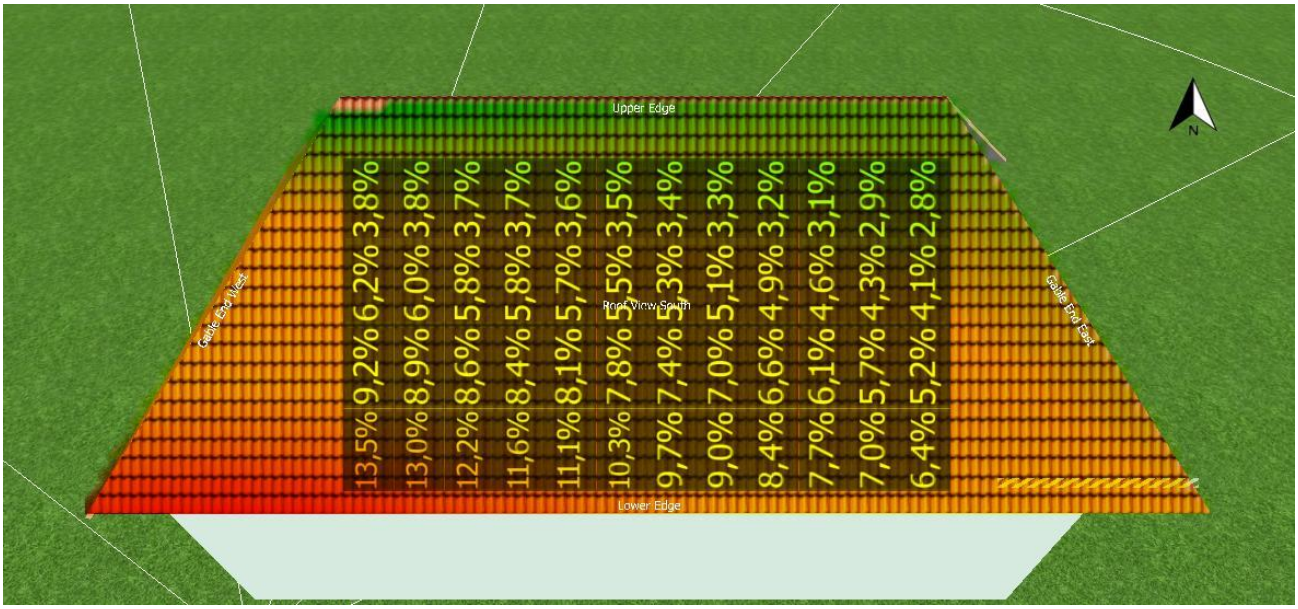
Slika 5.5.2. Vizualni prikaz položaja susjednog objekta (zgrada) u odnosu na objekt s instaliranim fotonaponskim sustavom iz drugog kuta gledanja



Slika 5.5.3 Vizualni prikaz položaja susjednog objekta (zgrada) u odnosu na objekt s instaliranim fotonaponskim sustavom iz trećeg kuta gledanja

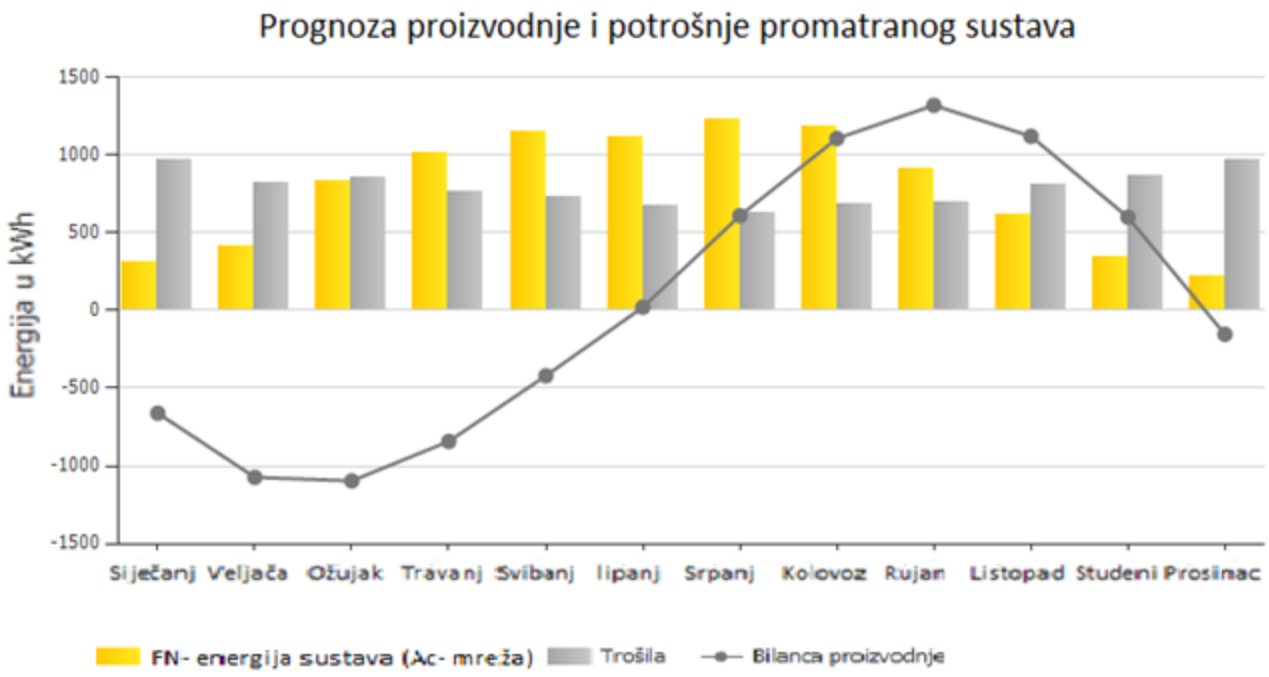


Slika 5.5.4 Vizualni prikaz položaja susjednog objekta (zgrada) u odnosu na objekt s instaliranim fotonaponskim sustavom iz četvrtog kuta gledanja



Slika 5.5.5. Prikaz utjecaja zasjenjenja susjednog objekta (zgrada) na fotonaponske panele izražen u postotcima (%)

Na slici 5.5.5. vidi se kako susjedni objekt (zgrada) zasjenjuje sve postavljene panele. Ovo je najnepovoljniji slučaj, te je profitabilnost elektrane u ovom slučaj znatno smanjen. Određeni dijelovi FN – panela zasjenjeni su preko 13% godišnje, što uvelike utječe n proizvodnju električne energije.



Slika 5.5.6 Grafički prikaz prognoze proizvodnje i potrošnje promatranog sustava kroz mjesece u godini

Iz simuliranih rezultata vidi se kako je utjecaj zasjenjenja zgradom najnepovoljniji slučaj, od sva četiri simulirana slučaja. Zgrada zasjenjuje sve fotonaponske panele.

6. ZAKLJUČAK

Obnovljivi izvori sve više postaju sastavni dio svakog EES-a, te se sve više država odlučuje koristiti električnu energiju iz obnovljivih izvora energije. Jedan od obnovljivih izvora energije je i onaj dobiven iz sunčevog zračenja. Fotonaponski sustavi sve su učestaliji izvor energije u svim državama svijeta, cijena proizvodnje ćelija i panela drastično opada, pa su i same FN elektrane jeftinije. U RH korištenje električne energije iz FN elektrana kreće se uzlaznom putanjom. Država visinom otkupne cijene po kWh proizvedenom iz sunčeve energije potiče stanovništvo da se odlučuju za instaliranje FN elektrane na krovove privatnih kuća.

Fotonaponski sustavi imaju puno prednosti, no jedan od glavnih problema predstavlja im djelomični utjecaj zasjenjenja. Najveća korisnost FN elektrane je kada nema utjecaja zasjenjenja, iako zbog sunčevog kretanja zasjenjenje uvijek postoji, ali nema tolikog utjecaja kao kod utjecaja zasjenjenja dimnjakom, satelitskom antenom, drvetom ili susjednom zgradom.

Simulirani slučajevi prikazuju kako najveći utjecaj zasjenjenja predstavlja zgrada, te se na zasjenjenje uzrokovano takvim objektom teško utječe iz jednostavnog razloga što je nemoguće micati zgradu. Utjecaj zasjenjenja drvetom predstavlja veliki problem zbog nepravilnog oblika krošnje drveta. U poglavlju 4.1. objašnjeno je kako se može smanjiti utjecaj zasjenjenja uzrokovan drvetom, ali i dalje je to poprilično nepovoljan slučaj za FN elektranu. Utjecaj zasjenjenja dimnjakom predstavlja problem iz razloga što paneli koji su u blizini dimnjaka zasjenjuju više od 10%, te se korisnost same elektrane drastično smanjuje. Smanjenjem korisnosti elektrane, smanjuje se i količina proizvedene električne energije, a smanjenjem količine proizvedene električne energije isplativost elektrane se produljuje na dulji vremenski period. Simulacija je prikazala kako najpovoljniji slučaj za fotonaponske elektrane predstavlja onaj bez utjecaja zasjenjenja. U ovom slučaju korisnost elektrane veća je od 80%, te se može zaključiti kako je najisplativije instalirati elektranu na mjesta gdje nema mogućnosti utjecaja susjednih objekata na zasjenjenje fotonaponskih panela.

LITERATURA

[1] Lj. Majdandžić, Solarni sustavi, Graphis, Zagreb, 2010. (377.str.)

[2] A. Baker, A history of solar cells: How technology has envolved, dostupno na: https://www.solarpowerauthority.com/a-history-of-solar-cells/, (pristupljeno: 15.5.2017)

[3] A. Jäger-Waldau, PV Status Report, dostupno na: http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC103426/ldna28159enn.pdf (pristupljeno: 15.4.2017.)

[4] Službena stranica Hrvatskog operatora tržišta električne energije, HROTE,dostupno na: www.hrote.hr (pristupljeno 8.6.2017.)

[5] Županije i nazivi sunčanih elektrana u RH, dostupno na www.hrote.hr (pristupljeno: 1.6.2017.)

[6] Lj. Majdandžić, Solarni sustavi, Graphis, Zagreb, 2010. (375.str.)

[7] Elektronika, PN – spoj, dostupno na: http://www.fpz.unizg.hr/ztos/EE/Elektro6.pdf, (pristupljeno: 28.4.2017.)

[8] Elektronika, U-I karakteristika diode, dostupno na: www.pmfst.unist.hr/~santon/oe1/10_UI%20karakteristika_DC-AC_analiza_Q.ppt, (pristupljeno: 12.4.2017.)

[9] Lj. Majdandžić, Solarni sustavi, Graphis, Zagreb, 2010. (384 str.)

[10] D.Šljivac, Z. Šimić, Obnovljivi izvori energije s osvrtom na gospodarenje, Hrvatska komora, arhitekata i inženjera u graditeljstvu u suradnji s Elektrotehnički fakultet Osijek, Osijek 2008.

[11] I. Debelac, M. Vraničar, Paneli sunčanih ćelija, dostupno na: https://www.fer.hr/_download/forum/Paneli_sun%C4%8Danih_%C4%87elija-seminar.pdf, (pristupio: 9.3.2017.)

[12] Lj. Majdandžić, Solarni sustavi, Graphis, Zagreb, 2010. (396. - 400str.)

[13] P. A. Lynn, Electricity from sunlight: An introduction to Photovoltaics, A John Wiley & Sons, United Kingdom, 2010.

[14] Ekpenyong, E.E and Anyasi F.I, Effect of shading on photovoltaic cell, IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE), (Nov. – Dec. 2013.)

[15] D.Šljivac, Predavanja FN sustavi, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek, 2017.

SAŽETAK

NASLOV: Simulacija utjecaja zasjenjenja na proizvodnju električne energije fotonaponske elektrane

Ključne riječi: sunčeva energija, fotonapon, moduli, ćelije, samostojeći sustavi, sustavi spojeni na mrežu, sunčevo zasjenjenje, djelomični utjecaj zasjenjenja, simulacija utjecaja zasjenjenja, PV*SOL.

U radu su teorijski objašnjeni početci pretvorbe sunčeve energije u električnu energiju. Također objašnjene su vrste ćelija koje se koriste za proizvodnju panela, te objašnjene prednosti i nedostatci odabranih ćelija. Statistički je prikazano u kojim se zemljama svijeta najviše koriste fotonaponski sustavi, gdje se proizvode fotonaponski paneli, što sve utječe na cijenu pojedinog panela. Također je prikazana i količina ukupne instalirane snage iz fotonaponskih sustava u Europskoj uniji i RH. Objašnjeni su „On grid“ i „Off grid“ sustavi, njihove prednosti i nedostatci, te njihova isplativost ovisna o potencijalnom mjestu psotavljanja. Utjecaj zasjenjenja objašnjen je teorijski, te simuliran u programskom paketu „PV*SOL“. Kako bi se što detaljnije prikazao utjecaj zasjenjenja, simulirana su četiri slučaja. U prvom slučaju nije bilo zasjenjenja fotonaponskih panela, u drugom slučaju simuliran je utjecaj zasjenjenja uzrokovan dimnjakom, u trećem slučaju zasjenjenje je uzrokovalo drvo te u četvrtom i posljednjem slučaju simulirano je zasjenjenje od susjednog objekta (zgrade). Rezultati simulacija su analizirani, grafički prikazani te detaljno objašnjeni u samome radu.

ABSTRACT

TITLE: Simulation of the shading effect on electricity production of the photovoltaic power plant

Key words: sun energy, photovoltaic, modules, cells, stand – alone systems, on grid systems, sun shadowing, partial shading effect, shading effect simulation, PV*SOL

This paper deals with the beginnings of the sun energy conversion to electric energy. Cell types used for panel production, also advantages and disadvantages for selected cells are explained. It is statistically shown in which countries of the world the photovoltaic systems are used the most, where photovoltaic panels are produced, what affects on the price of a particular panel. The amount of total installed power from photovoltaic systems in European Union and Republic of Croatia are presented. „On grid“ and „Off grid“ systems, their advantages and disadvantages, profitability depending on potencional place of installation are explained. Shade effects are theoretically processed and simulated in „PV*SOL“ programming package. To describe it in more details four cases are simulated. First case had no photovoltaic panel shading. The second case simulated shading effect caused by a chimney. Third case deals with shadows caused with tree crown, and the fourth case simulated nearby object (a building) shadow. The simulation results were analysed and graphically displayed and explained.

ŽIVOTOPIS

Ivan Radmanović rođen je 25.12.1992. godine u Našicama. Osnovnu školu pohađao je u Našicama, a nakon osnovne škole upisuje Srednju školu Isidora Kršnjavog u Našicama. Zanimanje za tehničku školu pokazuje još od osnovne škole, te se u srednjoj školi opredjeljuje za Elektrotehničku školu, smjer tehničar za elektroniku. U srednjoj školi osigurao je odlazak na smotru elektroničkih radova na županijskoj razini. Cijeli život bavi se rukometom, te pohađa natjecanja iz rukometa u rukometnom klubu, srednjoj školi i trenutno za fakultetsku ekipu. Nakon završetka srednje škole, 2011. godine upisuje stručni studij elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu Osijek i opredjeljuje se za smjer elektroenergetika. Nakon Stručnog studija, upisuje razlikovnu godinu, te 2015.godine upisuje Diplomski sveučilišni studij.