

# Analiza utjecaja degradacije modula na performanse fotonaponskih elektrana

---

Dukić, Matej

Master's thesis / Diplomski rad

2024

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:944470>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-23**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



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

**Sveučilišni diplomski studij**

**ANALIZA UTJECAJA DEGRADACIJE MODULA NA  
PERFORMANSE FOTONAPONSKIH ELEKTRANA**

**Diplomski rad**

**Matej Dukić**

**Osijek, 2024. godina.**

**Obrazac D1: Obrazac za ocjenu diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju**

**Ocjena diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju**

<b>Ime i prezime pristupnika:</b>	Matej Dukić
<b>Studij, smjer:</b>	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
<b>Mat. br. pristupnika, god.</b>	D-1442, 07.10.2022.
<b>JMBAG:</b>	0165084081
<b>Mentor:</b>	prof. dr. sc. Damir Šljivac
<b>Sumentor:</b>	dr. sc. Matej Žnidarec
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	prof. dr. sc. Zvonimir Klaić
<b>Član Povjerenstva 1:</b>	dr. sc. Matej Žnidarec
<b>Član Povjerenstva 2:</b>	prof. dr. sc. Hrvoje Glavaš
<b>Naslov diplomskog rada:</b>	Analiza utjecaja degradacije modula na performanse fotonaponskih elektrana
<b>Znanstvena grana diplomskog rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak diplomskog rada:</b>	U uvodnom dijelu rada je potrebno napraviti pregled literature iz područja degradacije performansi fotonaponskih modula. Izmjeriti performanse fotonaponskih modula instaliranih u različitim fotonaponskim elektranama. Izraditi simulacijski model fotonaponske elektrane u softveru PVSOL te na osnovu provedenih ispitivanja modula usporediti utjecaj očekivane i izmjerene degradacije modula na performanse cjelokupnog sustava. Sumentor -voditelj: dr.sc. Matej Žnidarec Tema za studenta: Matej Dukić
<b>Datum ocjene pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:</b>	19.09.2024.
<b>Ocjena pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:</b>	Izvrstan (5)
<b>Datum obrane diplomskog rada:</b>	27.9.2024.
<b>Ocjena usmenog dijela diplomskog rada (obrane):</b>	Izvrstan (5)
<b>Ukupna ocjena diplomskog rada:</b>	Izvrstan (5)
<b>Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije diplomskog rada čime je pristupnik završio sveučilišni diplomski studij:</b>	01.10.2024.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O IZVORNOSTI RADA**

Osijek, 01.10.2024.

Ime i prezime Pristupnika:	Matej Dukić
Studij:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	D-1442, 07.10.2022.
Turnitin podudaranje [%]:	5

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Analiza utjecaja degradacije modula na performanse fotonaponskih elektrana**

izrađen pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Damir Šljivac

i sumentora dr. sc. Matej Žnidarec

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis pristupnika:

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Zadatak diplomskog rada</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2. Metodologija istraživanja</b> .....	<b>1</b>
<b>2. PREGLED PODRUČJA TEME</b> .....	<b>3</b>
<b>3. FOTONAPONSKI SUSTAVI</b> .....	<b>5</b>
<b>3.1. Uvod u fotonaponsku energiju</b> .....	<b>5</b>
<b>3.2. Pozitivne i negativne karakteristike</b> .....	<b>5</b>
<b>3.3. Fotonaponski efekt</b> .....	<b>7</b>
<b>3.4. Fotonaponske ćelije</b> .....	<b>7</b>
<b>3.5. Fotonaponski moduli</b> .....	<b>8</b>
3.5.1. Bypass(zaobilazna) dioda .....	8
3.5.2. Vrste fotonaponskih modula .....	9
<b>3.6. Fotonaponski sustavi</b> .....	<b>11</b>
3.6.1. Umreženi sustavi .....	14
3.6.2. Otočni sustavi .....	15
3.6.3. Utjecaj na okoliš .....	17
3.6.4. Priključak i utjecaj na elektroenergetsku mrežu .....	17
<b>3.7. Degradacija fotonaponskih modula</b> .....	<b>18</b>
3.7.1. Uzroci degradacije modula .....	18
<b>4. ISPITIVANJE PERFORMANSI FOTONAPONSKIH MODULA</b> .....	<b>21</b>
<b>4.1. Instrument Metrel MI 3108</b> .....	<b>21</b>
<b>4.2. Ispitivanje na lokaciji 1</b> .....	<b>22</b>
4.2.1. Postupak ispitivanja .....	22
4.2.2. Tehničke specifikacije modula ET-M572200WW 200W .....	24
4.2.3. Rezultati ispitivanja .....	24
4.2.4. Očekivana i stvarna degradacija modula .....	25
<b>4.3. Ispitivanje na lokaciji 2</b> .....	<b>26</b>
4.3.1. Tehničke specifikacije modula BISOL BMU-250 .....	26
4.3.2. Rezultati ispitivanja .....	27
4.3.3. Očekivana i stvarna degradacija .....	27

<b>5. MODELIRANJE I ANALIZA UTJECAJA DEGRADACIJE FOTONAPONSKIH MODULA NA POVRAT INVESTICIJE .....</b>	<b>29</b>
<b>5.1. PV*SOL premium.....</b>	<b>29</b>
<b>5.2. Postavke u PV*SOL premiumu.....</b>	<b>29</b>
<b>5.3. Model 1.....</b>	<b>33</b>
5.3.1. Godišnja proizvodnja električne energije .....	34
5.3.2. Povrat investicije .....	35
<b>5.4. Model 2.....</b>	<b>36</b>
5.4.1. Godišnja proizvodnja električne energije .....	37
5.4.2. Povrat investicije .....	38
<b>6. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>39</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>41</b>
<b>SAŽETAK.....</b>	<b>43</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>44</b>
<b>ŽIVOTOPIS.....</b>	<b>45</b>

# 1. UVOD

Fotonaponska tehnologija temelji se na sve većoj globalnoj potrebi za održivim izvorima energije. S obzirom na rastuću potrošnju energije i negativan utjecaj fosilnih goriva na okoliš, fotonaponski sustavi postaju ključno rješenje za proizvodnju čiste energije. Sunčeva energija, kao neiscrpan i obnovljiv izvor, ima ogroman potencijal za smanjenje emisija stakleničkih plinova te postizanje energetske ciljeve održivog razvoja. Razumijevanje načela fotonaponske pretvorbe, kao i komponenti fotonaponskih sustava, od presudne je važnosti za daljnji razvoj ove tehnologije i njezinu primjenu u svakodnevnom životu. U prvom dijelu rada obrađuje se fotonaponska pretvorba, fotonaponski modul, fotonaponska elektrana te sama degradacija. Objasnjava se kako se iz sunčevog zračenja dobiva električna energija. Pojam degradacije odnosi se na različite procese ili stanja u različitim kontekstima. Degradacija fotonaponskih modula odnosi se na smanjenje njihove učinkovitosti, nazivne snage i performansi tijekom vremena. Neki od faktora koji utječu na degradaciju uključuju prirodno starenje, UV zračenje, temperaturu, vlagu, mehanička djelovanja i slično. U drugom dijelu diplomskog rada analiziraju se konkretni slučajevi dobiveni mjerenjem na terenu. Uz pomoć programa PV\*SOL Premium izrađuju se fotonaponski sustavi s istim karakteristikama ispitivanih modula. Obradom podataka u programu PV\*SOL Premium dolazi se do zaključka o utjecaju degradacije fotonaponskih modula na suvremene elektrane, njihovu proizvodnju i isplativost. Analiza degradacije fotonaponskih modula ključna je za razumijevanje njihovih dugoročnih performansi i pouzdanosti. Primjena naprednih materijala, tehnika monitoringa i strategija održavanja može značajno smanjiti stope degradacije, osigurati učinkovitost i dugovječnost, čime se povećavaju financijske prilike.

## 1.1. Zadatak diplomskog rada

U uvodnom dijelu rada je potrebno napraviti pregled literature iz područja degradacije performansi fotonaponskih modula. Izmjeriti performanse fotonaponskih modula instaliranih u različitim fotonaponskim elektranama. Izraditi simulacijski model fotonaponske elektrane u softveru PV\*SOL premium te na osnovu provedenih ispitivanja modula usporediti utjecaj očekivane i izmjerene degradacije modula na performanse cjelokupnog sustava.

## 1.2. Metodologija istraživanja

Istraživanje je analizirano prvo teorijski gdje su se obuhvatili fotonaponski procesi, komponente, te uzroci degradacije. Kroz provedena terenska ispitivanja i simulacije analizirala se degradacija fotonaponskih modula i njezin utjecaj na dugoročne performanse fotonaponskih elektrana.

Terenska mjerenja su obavljena na dvije lokacije (Bukovlje i Osijek) korištenjem instrumenta Metrel MI 3108, pri čemu su prikupljeni podaci za daljnju analizu. Rezultati su prilagođeni standardnim testnim uvjetima (STC) radi usporedbe s tvornički definiranim vrijednostima degradacije. Uz terensko ispitivanje, korišten je PV\*SOL premium softver za simulaciju godišnje proizvodnje električne energije i analizu povrata investicije za dva različita modela fotonaponskih modula. Analiza je uključivala usporedbu stvarnih i očekivanih stopa degradacije, s ciljem utvrđivanja njihovog utjecaja na učinkovitost sustava i financijsku isplativost.



## 2. PREGLED PODRUČJA TEME

Fotonaponski moduli doživljavaju značajan napredak, što ih čini sve važnijim izvorom obnovljive energije. Ključna poboljšanja obuhvaćaju učinkovitost, fleksibilnost, integraciju u građevine i održivost.

Nove tehnologije fotonaponskih ćelija, poput perovskitnih i heterospojnih ćelija, donijele su revoluciju u učinkovitosti modula. Perovskitne ćelije, zahvaljujući svom brzom razvoju, postigle su laboratorijsku učinkovitost veću od 25% i integriraju se u tandem ćelije sa silicijem, čime ukupna učinkovitost prelazi 30%. Višeslojne ćelije kombiniraju kristalni silicij s tankim slojevima amorfno silicija, što omogućuje veću učinkovitost i bolje performanse u uvjetima slabog osvjetljenja. Pasivirane emitterske i stražnje ćelije (PERC) postale su industrijski standard, povećavajući učinkovitost na oko 22-23% uz smanjenje troškova [1].

Bifacijalni moduli predstavljaju inovaciju koja omogućava hvatanje sunčeve svjetlosti s obje strane modula, povećavajući energetske prinos do 30% u usporedbi s tradicionalnim monofacijalnim modulima. Ova tehnologija posebno je učinkovita u reflektivnim okruženjima kao što su pustinje ili snježna područja, čineći je vrlo atraktivnom za velika fotonaponska postrojenja [2].

Fotonapon integriran u zgrade omogućuje ugradnju fotonaponskih ćelija direktno u građevinske materijale poput prozora, fasada i krovova. Ova tehnologija ne samo da proizvodi energiju, već i smanjuje potrebu za dodatnim građevinskim materijalima, što doprinosi stvaranju održivih i energetski učinkovitih zgrada. On postaje sve popularniji u urbanim područjima gdje je prostor za tradicionalne fotonaponske module ograničen [3].

Napredak u znanosti o materijalima doveo je do razvoja fleksibilnih i laganih fotonaponskih modula, koji se mogu primijeniti na površinama gdje tradicionalni kruti moduli nisu prikladni. Ovi moduli, često izrađeni od tankih filmova ili organskih materijala, omogućuju integraciju fotonaponske tehnologije u različite primjene, uključujući prijenosne uređaje i vozila [4].

Uporaba naprednih materijala i premaza značajno poboljšava učinkovitost i trajnost fotonaponskih modula. Antirefleksni premazi povećavaju upijanje sunčeve svjetlosti, dok samoočistivi premazi smanjuju potrebu za održavanjem. Nadalje, razvoj novih materijala, poput transparentnih vodljivih oksida, doprinosi većoj izdržljivosti modula u teškim okolišnim uvjetima, čime se produžuje njihov vijek trajanja [5].

Pametni moduli, koji integriraju mikroizmjenjivače i optimizatore snage, omogućuju precizno praćenje performansi i povećavaju energetske proizvodnje. Ovi sustavi nude napredne dijagnostičke alate, olakšavajući održavanje i osiguravajući maksimalnu učinkovitost tijekom cijelog vijeka trajanja modula.

S rastom upotrebe fotonaponske tehnologije, sve veći fokus stavlja se na održivost i recikliranje modula na kraju njihovog vijeka trajanja. Proizvođači rade na smanjenju uporabe opasnih materijala u proizvodnji i razvijaju tehnologije za učinkovito recikliranje, čime se smanjuje utjecaj na okoliš.

Globalna potražnja za fotonaponskim modulima nastavlja rasti, s posebnim naglaskom na Kinu, Europu i Sjedinjene Države. Poticajne politike za obnovljive izvore energije, zajedno s napretkom u tehnologijama skladištenja energije, potiču ovu ekspanziju, čineći fotonaponsku energiju ključnim igračem na globalnom energetske tržištu.

Najnovija istraživanja o degradaciji fotonaponskih modula usmjerena su na razumijevanje ključnih mehanizama koji uzrokuju smanjenje njihove učinkovitosti tijekom vremena te na razvoj tehnologija koje mogu smanjiti te učinke. Glavni mehanizmi degradacije uključuju toplinska naprezanja, UV zračenje, prodor vlage, mehanička oštećenja. To dovodi do postupnog smanjenja sposobnosti modula za pretvaranje sunčeve energije u električnu energiju. Unatoč napretku u laboratorijskim testovima ubrzanog starenja i novim tehnologijama, još uvijek postoji potreba za dugoročnim terenskim studijama kako bi se u potpunosti razumjeli uvjeti na stvarnim instalacijama i smanjila degradacija, posebno u različitim klimatskim uvjetima [6].

### **3. FOTONAPONSKI SUSTAVI**

U ovome poglavlju dotičemo sve aspekte fotonaponskih sustava, počevši od osnovnog principa fotonaponskog efekta pa sve do implementacije u fotonaponske sustave, odnosno elektrane.

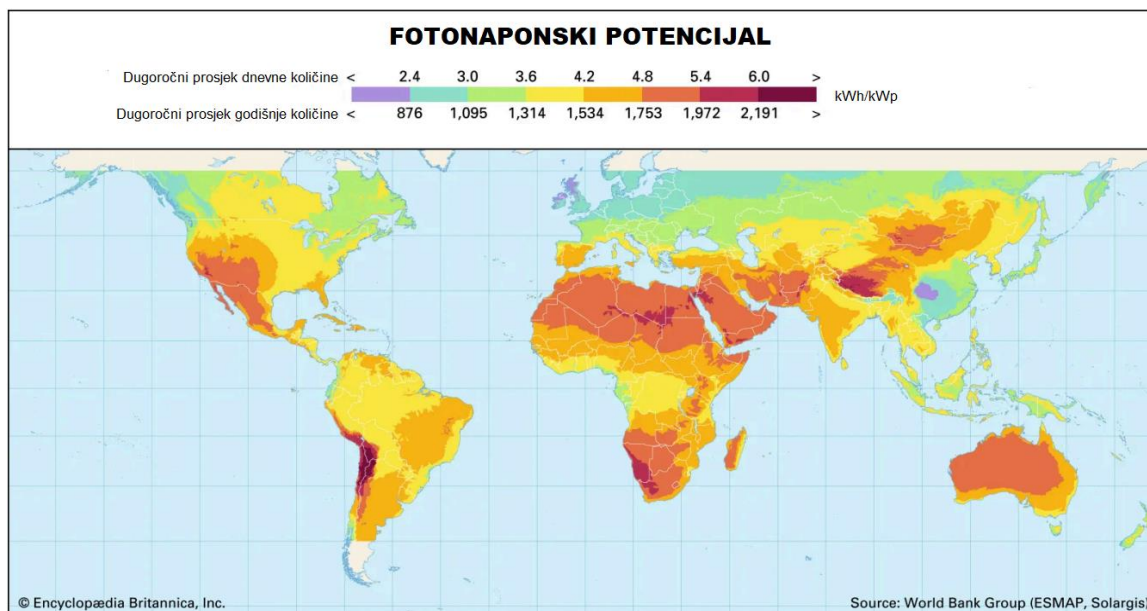
#### **3.1. Uvod u fotonaponsku energiju**

Zbog povećanja broja stanovnika, razvoja industrije i sve veće upotrebe tehnologije iz dana u dan u svijetu se povećava i potreba za električnom energijom. Električna energija neophodan je resurs u modernom životu. Kako bi se smanjila ovisnost o fosilnim gorivima za proizvodnju električne energije okrećemo se alternativnim rješenjima, odnosno obnovljivim izvorima energije. Korištenjem obnovljivih izvora energije kao što su fotonaponske elektrane, hidroelektrane, vjetroelektrane, geotermalna energija, smanjuju se emisije stakleničkih plinova koji je jedan od glavnih razloga globalnog zatopljenja.

Fotonaponska tehnologija imala je dug put od svojega otkrivanja, razvoja, do toga da je postala jednim od glavnih i ključnih izvora obnovljive električne energije u današnjem svijetu. Godine 1839. Edmond Becquerel, francuski fizičar otkriva fotonaponski efekt koja čini osnovu za rad fotonaponskih ćelija. Između 1873. i 1883. godine otkrivena je fotoosjetljivost selena i time se izgradio temelj za patentiranje prve funkcionalne fotonaponske ćelije kojoj je učinkovitost bila oko 1%, neusporedivo s današnjih oko 20%. Zbog lake dostupnosti izvora svjetlosti prve praktične primjene fotonaponskih ćelija bile su u svemiru. Tako je 1958. godine američki satelit Vanguard 1 za izvor energije i napajanje svojih uređaja koristio fotonaponsku energiju.

#### **3.2. Pozitivne i negativne karakteristike**

Jedna od glavnih pozitivnih karakteristika fotonaponske energije je ta što je ona neiscrpna i dostupna u bilo kojem dijelu svijeta. Ostali obnovljivi izvori energije mogu se iskorištavati samo na određenim područjima, odnosno gdje je ima. Tako slika 3.1. prikazuje regije s velikim brojem sunčanih sati godišnje. To uključuje dijelove bliže ekvatoru, gdje je kontinuirano sunčevo zračenje tijekom cijele godine [7].



Sl. 3.1. Prikaz jakosti sunčevog zračenja [8]

Neke od negativnih karakteristika su: ovisnost o vremenskim uvjetima, mala površinska gustoća, nemogućnost skladištenja sunčevog zračenja, te učinkovitost i degradacija. Ovisnost o vremenskim uvjetima ukazuje na to da fotonaponska energija varira ovisno o sunčevu svjetlu. To govori da je tijekom oblačnih dana proizvodnja znatno smanjena, dok je tijekom noći nikakva. Mala površinska gustoća govori o tome da fotonaponski moduli proizvode relativno malu količinu energije po jedinici površine (150 do 220 W/m<sup>2</sup> uz sunčevo zračenje od oko 1000 W/m<sup>2</sup>). U gusto naseljenim područjima i urbanim sredinama to predstavlja značajan problem, te se velike fotonaponske elektrane postavljaju izvan naseljenih područja na otvorenim prostorima. Nemogućnost skladištenja sunčevog zračenja u izvornom obliku odražava se na proizvodnju električne energije tijekom noći. Rješenje za to su baterijski sustavi koji skladište proizvedenu električnu energiju. Učinkovitost fotonaponskog modula predstavlja omjer između snage sunčeve svjetlosti koja pada na površinu ćelije i električne energije koju ćelija može proizvesti. Prosječna učinkovitost je od 15% do 22%, što je neusporedivo malo s npr. hidroelektranama koje imaju prosječnu učinkovitost od preko 90%. Razlog tomu su ponajviše toplinski gubici kada se dio sunčeve svjetlosti pretvori u toplinsku umjesto u električnu energiju.

### **3.3. Fotonaponski efekt**

Fotonaponski efekt primaran je proces za dobivanje električne energije iz sunčeve svjetlosti. To je fizikalni proces u kojemu se unutar fotonaponskih ćelija pretvara svjetlosna energija u električnu energiju. Kako je ranije spomenuto Edmond Becquerel je 1839. godine otkrio fotonaponski efekt, no tek je 1905. godine Albert Einstein u svojoj studiji ponudio rješenje teorijom da se svjetlost sastoji od čestica nazvanih fotoni, za što je nagrađen i Nobelovom nagradom 1921. godine.

Fotonaponski efekt javlja se u poluvodičima, najčešće siliciju, materijalu koji se široko koristi u fotonaponskoj industriji. Kada foton pogodi atom poluvodičkog materijala, može prenijeti svoju energiju elektronu u tom atomu. Ako foton ima dovoljno energije, može izbaciti elektron iz njegove atomske veze. Taj oslobođeni elektron može se potom kretati kroz materijal, stvarajući električnu struju.

### **3.4. Fotonaponske ćelije**

Fotonaponske ćelije osnovni su elementi u tehnologiji fotonaponske energije, omogućavajući pretvorbu sunčeve svjetlosti direktno u električnu energiju. Taj proces temelji se na fotonaponskom efektu, fizičkom fenomenu u kojem dolazi do stvaranja električne struje u poluvodičkom materijalu kada je izložen sunčevoj svjetlosti.

Struktura fotonaponske ćelije sastoji se od nekoliko ključnih komponenti, a to su poluvodički materijal, P-N spoj, antirefleksivni sloj, te elektrode. Poluvodički materijal koji se najčešće upotrebljava zbog svoje dostupnosti i niske cijene je silicij. Pojavljuje se u tri najčešća oblika, i to kao, monokristalni, polikristalni i amorfni silicij. Monokristalni silicij skuplji je zbog svoje visoke učinkovitosti, dok su polikristalni i amorfni jeftiniji ali manje učinkoviti. P-N spoj je dio ćelije u kojoj se događa razdvajanje naboja. Antirefleksivni sloj služi kako bi se smanjilo odbijanje sunčeve svjetlosti s površine ćelije. Odbijanje sunčeve svjetlosti predstavlja značajan izazov u povećanju učinkovitosti samih ćelija. Elektrode fotonaponskih ćelija služe za prikupljanje i provođenje električne struje pomoću tankih metalnih kontakata na prednjoj i stražnjoj strani [9].

### 3.5. Fotonaponski moduli

Kada se poveže više fotonaponskih ćelija u jednu cjelinu dobiva se fotonaponski modul. Fotonaponski modul je cjelina koja je izrađena na bude otporna na svakodnevne vremenske uvijete (kiša, snijeg). Jedina vremenska prilika na koju se najčešće ne može utjecati je led. Tako na slici 3.2. prikaza je šteta nastala prilikom leda na fotonaponskoj elektrani u okolici Slavenskog Broda. Jedan on važnijih faktora koji utječe na efektivnost modula je temperatura. Iako fotonaponski moduli proizvode više energije na sunčevom svjetlu, visoke temperature mogu smanjiti njihovu učinkovitost. Kako bi se to riješilo između svakog modula ostavlja se 2 centimetra razmaka sa svake strane kako bi bolje ventilirao zrak.

Struktura fotonaponskog modula osim fotonaponskih ćelija sadrži i sljedeće komponente: stakleni pokrov, encapsulant, stražnju foliju, okvir, te spojni dio.



Sl. 3.2. Šteta nastala prilikom udara leda

#### 3.5.1. Bypass(zaobilazna) dioda

Problem svakog fotonaponskog modula je zasjenjenje. Bypass dioda neophodan je element jer pomaže u održavanju učinkovitosti i zaštiti modula u nepovoljnim uvjetima, jer i jako mali problemi s pojedinim ćelijama mogu drastično smanjiti učinkovitost cijelog sustava. Ako je jedan

modul zasjenjen, te se smanji njegova učinkovitost, cijeli će se niz fotonaponskih modula (engl. *String*) prilagoditi tome modulu.

Princip rada temelji se na tome da kada nemamo zasjenjenja pomoću drugih objekata ili snijegom, dioda ostaje neaktivna jer postoji napon u granicama dopuštenosti. Kada dođe do zasjenjenja, odnosno ako ćelija ne može proizvesti napon u dozvoljenim granicama tada se bypass dioda aktivira te omogućuje struji da zaobiđe tu ćeliju ili niz ćelija. Tako se smanjuju gubici energije, te sustav nastavlja normalno sa radom. Također dioda štiti i od samog pregrijavanja ćelija, te oštećenja modula [9].

### 3.5.2. Vrste fotonaponskih modula

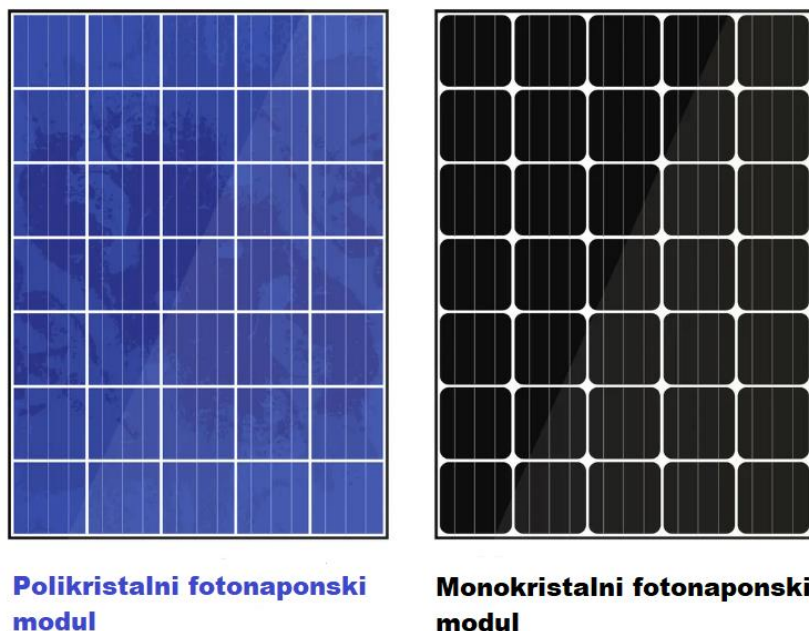
Ovisno o materijalu i vrsti tehnologije kojom se izrađuju, postoji više vrsta fotonaponskih modula. Izbor specifičnog modula koji je potreban za određenu elektranu ovisi o potrebama samog projekta, klimatskim uvjetima, te ciljevima energetske proizvodnje. Najčešće upotrebljavani moduli su monokristalni i polikristalni silicij. Od ostalih tehnologija koji se manje upotrebljavaju su: amorfni silicijski (a-Si), kadmij-telurij (CdTe), bakar-indij-galij-selenid (CIGS), te moduli izrađeni od tankih slojeva (Thin-Film). U tablici 3.1. prikaza je usporedba nabrojanih tehnologija. Možemo uvidjeti kako 95% udjela u svima fotonaponskim sustavima ima monokristalna i polikristalna tehnologija.

Tablica 3.1. Prikaz različitih tehnologija fotonaponskih modula [10]

Tehnologija	Godina dostizanja učinkovitosti preko 10%	Udio na tržištu 2020. godine (%)	Rekordna postignuta učinkovitost (%)	Vrijeme povrata investicije (godina)
Monokristal	1957.	66,6	26,7	1,4-7,3
Polikristal	1984.	28,4	24,4	0,8-4,2
a-Si	1992.	0,1	14	1,1-3,2
CdTe	1981.	4,1	22,1	0,8-2,7
CIGS	1981.	0,8	23,4	1,3-2,8

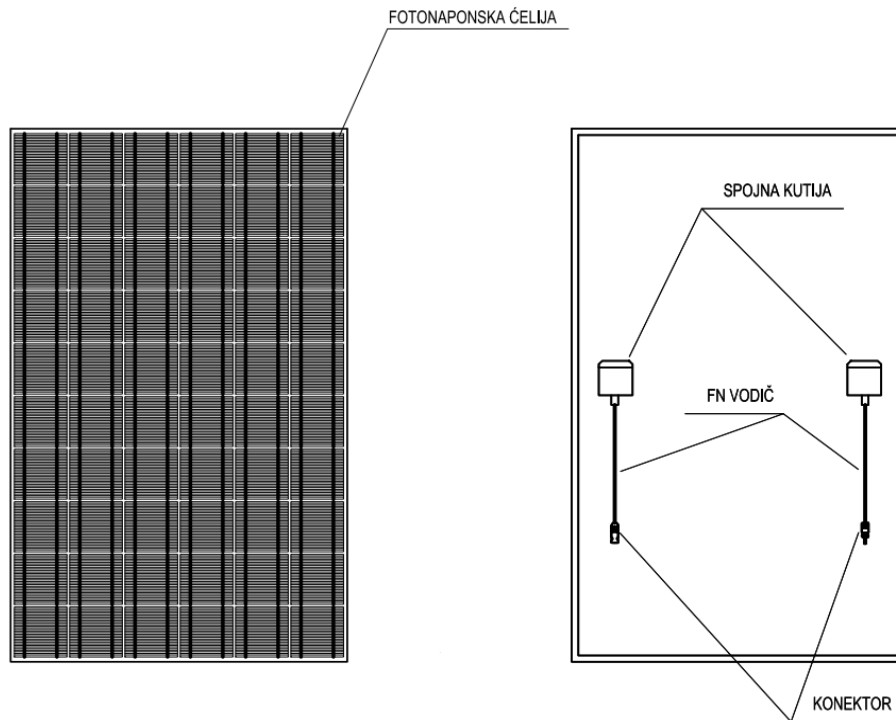
Izbor između monokristalnih i polikristalnih modula ponajviše ovisi o cijeni. Tehnologija monokristalnih modula koristi se za područja i instaliranje gdje je prostor ograničen. Tako će se za manje prostora dobiti bolje performanse elektrane, jer je učinkovitost tih modula između 18% i 22%. Primjena ovakvih modula u većini slučajeva je za stambene krovove, gdje kada se jednom montiraju, zbog dugog vijeka trajanja, imaju životni vijek i preko 25 godina. Na slici 3.3. lako se prepoznaje monokristalni modul zbog svoje tamne boje s prepoznatljivim zaobljenim rubovima. Polikristalni silicijski moduli su svakako najviše korišteni moduli u današnjem svijetu. Zbog dobrog omjera cijene i kvalitete idealni su za širok raspon aplikacija. Prepoznaje ih se po plavoj boji, dok su ćelije kvadratnog oblika što možemo vidjeti na slici 3.3. Razlog manje učinkovitosti u odnosu na monokristalne je taj što imaju više kristala u strukturi. Učinkovitost im se kreće između 15% i 17%, te se pri visokim temperaturama učinkovitost dodatno smanjuje. Slika 3.4. predstavlja vanjski prikaz fotonaponskog modula s prednje i stražnje strane.

Kako osim cijene odabir prihvatljivog modula diktira i njegova učinkovitost, tako se izrađuju laboratorijski prototipi sa učinkovitosti većom od 40%. Ove tehnologije za sada se još ne razvijaju za komercijalnu upotrebu, već za specijalizirane industrije kao što su svemirski programi.



Sl. 3.3. Razlika između polikristalnog i monokristalnog fotonaponskog modula [11]





Sl. 3.4. Prikaz fotonaponskog modula s prednje i stražnje strane

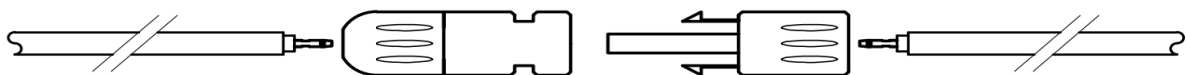
### 3.6. Fotonaponski sustavi

Kombiniranjem više različitih komponenti, na čelu s fotonaponskim modulima i izmjenjivačima, u jednu cjelinu dobiva se fotonaponski sustav. Postoje tri glavne vrste fotonaponskih sustava a to su: umreženi (engl. *On-Grid*), otočni (engl. *Off-Grid*) i hibridni sustavi koji su kombinacija ova dva.

Uz fotonaponske module, najvažnija komponenta svakog fotonaponskog sustava je izmjenjivač. Izmjenjivač je elektronička komponenta koja pretvara dobivenu istosmjernu struju (DC) iz fotonaponskih modula u izmjeničnu struju (AC) koja je potrebna za priključak na mrežu. Izmjenjivač ima funkciju da kada dođe do odstupanja u parametrima frekvencije ili napona u fotonaponskom sustavu, odvoji taj fotonaponski sustav od elektroenergetske mreže kako nebi došlo do poremećaja u mreži. Kada se radi o manjem fotonaponskom sustavu, obično za kućne instalacije koje su dizajnirane da pokriju vlastitu potrošnju, tada se koristi samo jedan centralni izmjenjivač na kojega su spojeni svi fotonaponski moduli. Ako se radi o većem fotonaponskom sustavu tada postoji više izmjenjivača u ovisnosti o dizajniranju i potrebama. Tada se jedan ili više stringova spaja na zasebni izmjenjivač, u ovisnosti i tipu izmjenjivača. Treći tipovi izmjenjivača su mikroizmjenjivači. Mikroizmjenjivači montirani su na svakom fotonaponskom modulu zasebno. Kako zasjenjenje radi najveću štetu u radu fotonaponskih modula, kod mikroizmjenjivača svaki modul radi nezavisno od drugog modula, pa se zasjenjenje ne utječe na ostatak sustava. Da

bi postigao maksimalnu učinkovitost pretvarači su opremljeni sa četiri MPP tragača, koji na  $U-I$  karakteristici lanca modula traži točku maksimalne snage. Zato je kod određivanja serijsko-paralelnih kombinacija spajanja modula na pretvarač potrebno voditi računa o tome da se tijekom različitog intenziteta sunčevog zračenja dobije što veće iskorištenje.

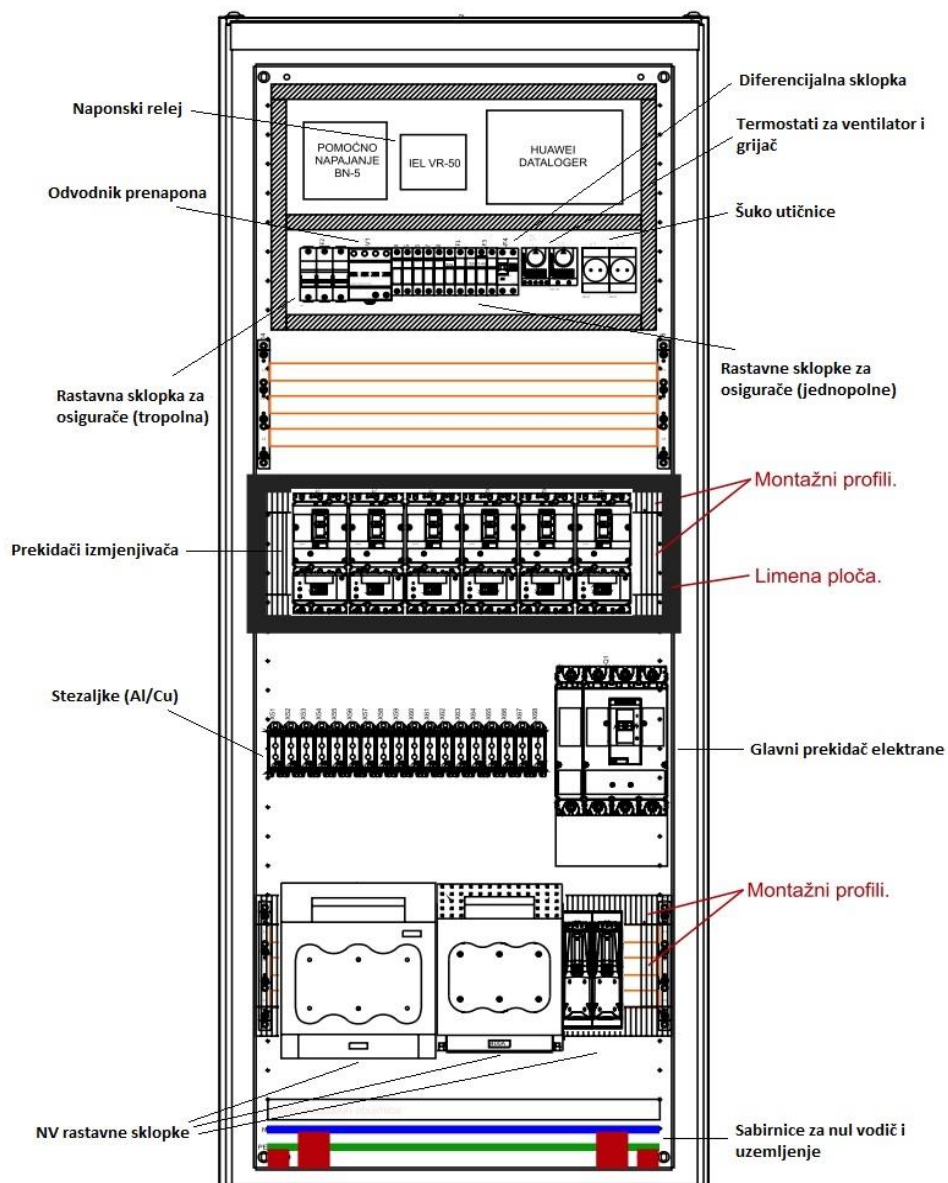
Ostale komponente bitne za neometan rad sustava su: konstrukcija, vodiči, uzemljenje, gromobran, ormar elektrane. Konstrukcija ovisi o tipu montaže, montira li se na pod, građevinu ili nešto drugo. U velikoj većini koristi se konstrukcija gdje su nosači izvedeni od nehrđajućeg čelika, te eloksiranog aluminijskog aluminija, komplet sa svim spojnim materijalom i priborom za učvršćenje podkonstrukcije te na nju postavljanje fotonaponskih modula sa krajnjim i među-držačima. Konstrukcija mora imati otpornost na ekstremne udare vjetra i na maksimalno opterećenje uslijed snježnih nanosa. Prilikom postavljanja modula na konstrukciju na kosom krovu potrebno je voditi računa zadržavanju vodonepropusnosti samog krova, te je u slučaju prodora kroz samu površinu krova potrebno osigurati sigurno brtvljenje i vodonepropusnost. Potrebno je koristiti posebne vodiče za sunčane elektrane. To su vodiči oznake PV WIRE (Photovoltaic Wire). To su posebni, dvostruko izolirani, pokositreni bakreni vodiči dizajnirani kako bi izdržali relativno visoke istosmjerne napone (do 1000 VDC), presjeka  $6 \text{ mm}^2$ . Također, potrebno je posebnu pažnju obratiti na izbor konektora. Oni moraju biti posebno dizajnirani za svrhu spajanja fotonaponske opreme, moraju izdržati napon do 1000 VDC, te istosmjernu struju do 25 A. Također, moraju biti otporni na vlagu, prašinu i ostale vanjske utjecaje (odgovarajuća IP zaštita). Slika 3.5. predstavlja spoj muškog i ženskog konektora.



Sl. 3.5. Spoj fotonaponskog kabela i konektora

Fotonaponska elektrana kao vanjski sustav, izložen vremenskim uvjetima, od udara groma štiti se gromobranskim instalacijama. Gromobranska instalacija ne štiti samo fotonaponske module nego i izmjenjivače i druge dijelove sustava. Gromobranska instalacija može biti već postojeća na građevini ili je u protivnom potrebno izvesti.

Ormar elektrane može biti razdvojen na dva zasebna ormara, jedan za DC stranu, te jedan za AC stranu. Neki elementi koje sadrži ormar a služe za upravljanje i zaštitu su: glavni prekidač elektrane, pomoćni prekidači izmjenjivača, odvodnik prenapona, automatski prekidači, rastavne sklopke, osiguračke sklopke, diferencijalna sklopka, naponsko-frekventni relej, te tipkalo za isključenje glavnog prekidača elektrane. Na slici 3.6. prikazan je primjer ormara elektrane snage 235 kW koja posjeduje 6 izmjenjivača.

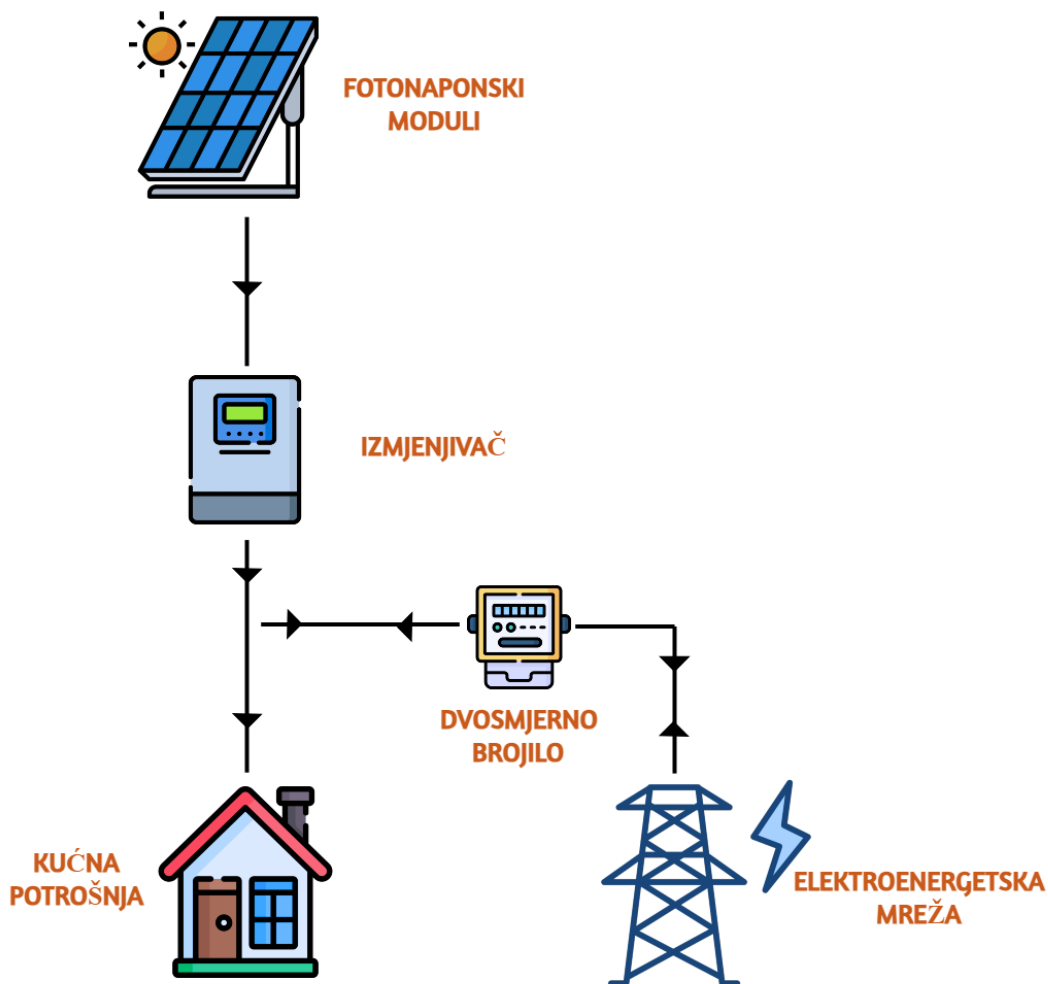


Sl. 3.6. Prikaz komponenti unutar ormara elektrane

### 3.6.1. Umreženi sustavi

Glavna karakteristika umreženih sustava je ta da su direktno povezani s distribucijskom elektroenergetskom mrežom. Način rada je taj da prilikom dana kada postoji proizvodnja iz fotonaponskih modula, kućna instalacija se napaja pomoću njih preko izmjenjivača, dok tijekom noćnih sati električna energija se preuzima iz elektroenergetske mreže. Osnovna razlika u odnosu na otočne sustave je uglavnom neposjedovanje baterija.

Razlikujemo dvije osnovne podjele umreženih sustava koje korisnicima pružaju različite mogućnosti. Prva mogućnost je ta da korisnik svu proizvedenu električnu energiju predaje u distributivnu elektroenergetsku mrežu. Ako se korisnik odluči na takvu investiciju, dogovara se fiksna cijena s otkupljivačem električne energije po kWh. Na taj način se osigurava stabilan prihod, te se nudi sigurnost povrata ulaganja, što proizvođaču električne energije omogućuje daljnja ulaganja u tehnologije i razvitak. Drugi model umreženih sustava je taj da korisnik odnosno proizvođač električne energije prvo tu energiju koristi za vlastite svrhe, odnosno za napajanje vlastitih trošila u kućanstvu, dok višak proizvedene električne energije se predaje u elektroenergetsku mrežu. Korisnik posjeduje dvosmjerno brojilo, koje očitava predanu i preuzetu energiju iz elektroenergetske mreže. Kompenziranje se vrši na način da višak predane električne energije tijekom dnevnih sati se kompenzira tijekom noćnih sati kada nema proizvodnje iz fotonaponskog sustava. Prikaz drugog modela nalazi se na slici 3.7.



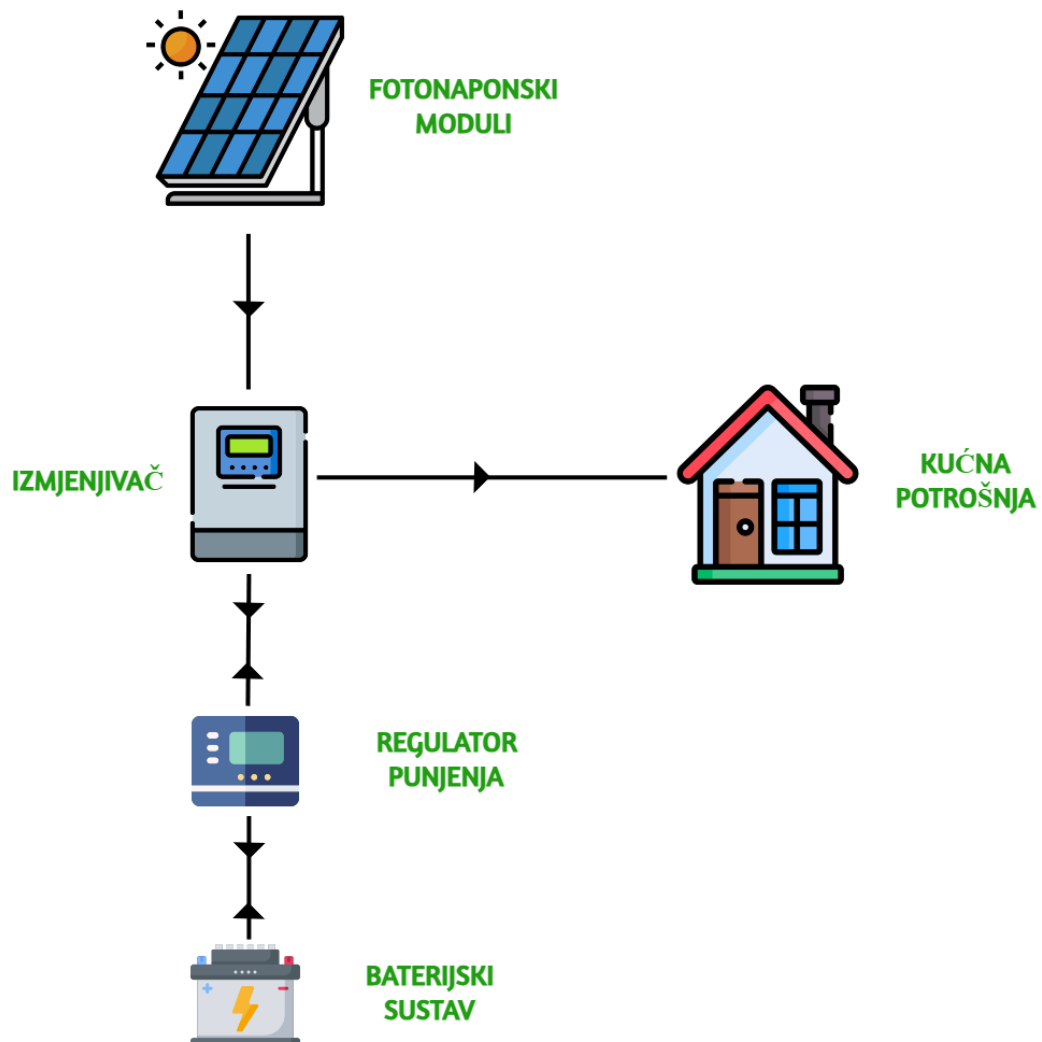
Sl. 3.7. Prikaz fotonaponskog sustava spojenog na elektroenergetsku mrežu

### 3.6.2. Otočni sustavi

Otočni sustavi su sustavi koji su izolirani od distributivne elektroenergetske mreže, odnosno nemaju direktnu vezu s njom. Najčešća primjena ovakvih sustava je tamo gdje elektroenergetska mreža nije pouzdana, odnosno nije dostupna. Omogućuje normalan rad i život u udaljenim područjima i ruralnim sredinama. Za ovakav sustav potrebna je pohrana energije, odnosno baterijski sustav, kako bi se ona mogla iskoristavati tijekom vremena kada nema sunčanih sati i tijekom noći.

Baterijski sustav je ključna komponenta u ovakvim sustavima. Najčešće korištene vrste baterija su olovno-kiselinske i litij-ionske baterije. Olovno-kiselinske baterije tradicionalna je tehnologija zbog svoje duge povijesti upotrebe i relativno niske cijene. Litij-ionske baterije moderna su tehnologija zbog svoje veće gustoće i dužeg životnog vijeka, što znači da se mogu više puta puniti i prazniti. Rezultat tih prednosti je i veća cijena. Dvije komponente koje omogućuju iznova punjenje i pražnjenje baterija a da ne dođe do nikakvih poremećaja su nadzornik baterije i regulator

punjenja. Nadzornik baterije održava dugovječnost i učinkovitost baterije uz precizno očitavanje i analiziranje stanja baterije. Bitno je da napon, struja i temperatura baterije budu u dozvoljenim granicama. Prekomjerno punjenje i pražnjenje smanjuje životni ciklus same baterije, te će nadzornik baterije u slučaju tih događanja isključiti samo napajanje kako bi se izbjeglo oštećenje baterijskih ćelija. Glavna uloga regulatora punjenja je da tijekom vremena kada nema sunca, odnosno kada nema proizvodnje električne energije sprječava povratno pražnjenje baterije prema fotonaponskim modulima. Prikaz otočnog sustava nalazi se na slici 3.8.



Sl. 3.8. Prikaz fotonaponskog sustava bez spoja na elektroenergetsku mrežu

### **3.6.3. Utjecaj na okoliš**

Generalno mišljenje za fotonaponske elektrane je da nemaju nikakav utjecaj na okoliš, odnosno da je posve zelena energija. Međutim, ima značaj utjecaj na okoliš, ali taj utjecaj je u pravilu mnogo manji i povoljniji u usporedbi s fosilnim gorivima. Glavni pozitivni utjecaj je taj da se za proizvodnju električne energije koristi neiscrpni prirodni resurs. Nema izravnih emisija koje doprinose globalnom zagrijavanju, te ne proizvode čestice štetne za zdravlje i okoliš. Glavni problem pojavljuje se pri proizvodnji fotonaponskih modula, gdje se određenim procesima pri obradi materijala generiraju emisije i otpadni materijali. Uvelike problem predstavlja i skladištenje više neiskoristivih fotonaponskih modula.

### **3.6.4. Priključak i utjecaj na elektroenergetsku mrežu**

Sukladno Mrežnim pravilima distribucijskog sustava fotonaponske elektrane moraju posjedovati mogućnost regulacije izlazne snage ovisno o frekvenciji. Regulacija izlazne snage treba biti interno podešena u samim proizvodnim jedinicama (pretvaračima) i dodatno mora biti omogućeno daljinsko upravljanje (ovisno o tipu proizvodnog modula) gdje Operator distribucijskog sustava upravlja regulacijom izlazne snage elektrane.

Fotonaponske elektrane utječu na električnu mrežu zbog varijabilnosti i nepredvidivosti sunčeve svjetlosti, što uzrokuje fluktuacije i nestabilnost napona. Povezivanje putem elektroničkih pretvarača snage može generirati harmonike i neravnotežu u mreži. Povećanje udjela fotonaponske energije smanjuje kapacitet mreže za vršnu regulaciju i stabilnost napona na dalekovodima. Priključenje na distribucijsku mrežu mijenja njezinu strukturu i karakteristike protoka snage, a kvarovi u fotonaponskim sustavima mogu utjecati na zaštitu i ponovno uključivanje sustava.

### 3.7. Degradacija fotonaponskih modula

Degradacija označava proces pogoršanja ili opadanja kvalitete, stanja ili vrijednosti nečega u nekome vremenskom roku. Degradacija fotonaponskih modula odnosi se na smanjenje njihove učinkovitosti u procesu pretvaranja sunčeve energije u električnu energiju.

Procjena degradacije važna je zbog sve veće integracije fotonaponskih sustava u elektroenergetsku mrežu. Smanjenje učinkovitosti odnosno snage fotonaponskog modula zahtijeva preciznu procjenu zbog točne prognoze povrata investicije samog fotonaponskog sustava, jer imaju dugi vijek trajanja (u prosjeku 20 do 30 godina). Takve procjene su najviše potrebne za velike investitore, jer banke i osiguravajuća društva žele minimizirati rizike i nesigurnosti. Veća stopa degradacije označava i nižu proizvodnju električne energije što smanjuje ukupno profitabilnost sustava. Da bi se smanjila degradacija i omogućio daljnji razvoj pouzdanih fotonaponskih modula važno je poznavati uzroke i kvarove

Parametri o kojima ovisi degradacija, odnosno koji se koriste za mjerenje degradacije su: učinkovitost, izlazna snaga, faktor punjenja,  $I-U$  krivulja, te degradacijska stopa.

#### 3.7.1. Uzroci degradacije modula

Fotonaponski moduli izloženi su raznim vanjskim i unutarnjim djelovanjima koji utječu na njihovu izvedbu i pouzdanost tijekom vremena. Vanjske čimbenike možemo opisati kao utjecaj okoliša, dok su unutrašnji čimbenici uzrokovani raznim djelovanjima materijala, te načinom izrade i obrade modula.

Zračenje ima važnu ulogu kako na performanse tako i na dugotrajnost fotonaponskih modula. Iako UV zračenje čini mali dio ukupnog sunčevog spektra, najštetniji je za polimerne materijale u fotonaponskim modulima. Reakcije koje se događaju zbog velike energije fotona dovode do lomljivosti i diskoloracije (promjena boje) polimera. Pod određenim uvjetima degradacija tih materijala se ubrzava, a to su područja bliže ekvatoru, ljeto, te jako poslijepodnevno sunce [6].

Temperatura je faktor okoliša koji izravno utječe na učinkovitost fotonaponskih modula. Temperatura utječe na smanjenje dugotrajnosti i učinkovitosti modula, te ubrzava kemijske reakcije koje uzrokuju mehaničke napetosti zbog promjena u toplinskoj ekspanziji materijala. Razlika između temperature unutar modula i temperature okoliša, uzrokovane ukupnom količinom sunčeve energije, utječe na prijenos topline iz ćelija. Može ubrzati degradaciju materijala koja se koristi za zaštitni sloj, koji se postavlja između fotonaponskih ćelija i prednje staklene ploče. Uzrokuje mehaničke probleme poput deformacija, pucanja ćelija, te odvajanja slojeva materijala.



Zbog dnevnih ili sezonskih promjena temperature, dolazi do termo-mehaničkih napetosti, koje šire i skupljaju materijale na različite načine, te tako dolazi do zamora materijala [6].

Vlažnost je važan čimbenik koji utječe na degradaciju fotonaponskih modula. Prodor vlage može oslabiti spojeve između komponenti uzrokujući razdvajanje slojeva, koroziju i gubitak performansi. Vlažnost se može pojaviti u obliku vodene pare, kondenzacije, kiše, snijega ili leda. S vremenom, unutarnja koncentracija vlage u modulima raste, što može izazvati dodatne probleme poput mehaničkih napetosti i kratkih spojeva, posebno tijekom ciklusa zamrzavanja-odmrzavanja. Vrijeme potrebno za postizanje ravnoteže vlage varira ovisno o konstrukciji modula [6].

Mehanička opterećenja mogu nastati tijekom proizvodnje, transporta, instalacije te zbog vremenskih uvjeta poput vjetra, tuče i snijega. Fotonaponske ćelije i metalizacijski elementi su tanki i krhki, pa su skloni pucanju i oštećenjima. Opterećenja mogu uzrokovati pukotine u polimernim materijalima, a dugotrajni učinci mogu uključivati oštećenja stakla, okvira i krhkost stražnjih folija. Snijeg može uzrokovati savijanje okvira i pucanje ćelija, dok vjetar može izazvati rast mikro-pukotina i zamor metalizacijskih elemenata. Modulima je stoga potrebna određena fleksibilnost kako bi izdržali vibracije uzrokovane vjetrom [6].

Prljanje ili zagađivanje površine fotonaponskih modula može nastati zbog prašine, zagađenja zraka, rasta algi ili izmeta ptica. Iako ne utječe na dugoročnu pouzdanost modula kao korozija ili delaminacija, zagađivanje može smanjiti učinkovitost modula. Razina zagađenja ovisi o svojstvima površine modula, lokaciji instalacije i konfiguraciji montaže. Prašina se može cementirati i otežati uklanjanje, dok izmet ptica može lokalno blokirati svjetlost i uzrokovati nesklad ćelija, što može dovesti do vrućih točaka (engl. *Hot Spots*), odnosno opasnih područja visokih temperatura koja mogu oštetiti modul [6].

Prirodne i industrijski proizvedene kemikalije mogu uzrokovati koroziju fotonaponskih modula. Najčešće vrste uključuju solnu maglu u priobalnim područjima, amonijak u ruralnim poljoprivrednim područjima, te sumpornu i dušičnu kiselinu u industrijskim područjima. Ove kemikalije mogu degradirati komponente poput stražnjih slojeva, ljepila, kutija s priključcima, žica i konektora, što može dovesti do smanjenja performansi i sigurnosnih problema zbog oštećenja izolacije modula [6].

Na kvalitetu i degradaciju fotonaponskih modula također utječu i faktori pri proizvodnji, poput dizajna modula, korištenih materijala i obrade. U modulima s prozračnim stražnjim slojem vlaga

ulazi i izlazi ovisno o vanjskim uvjetima, dok u modulima s nepropusnim slojem (staklo/staklo) vlaga može ostati zarobljena unutra, što može dovesti do dodatnih problema [6].

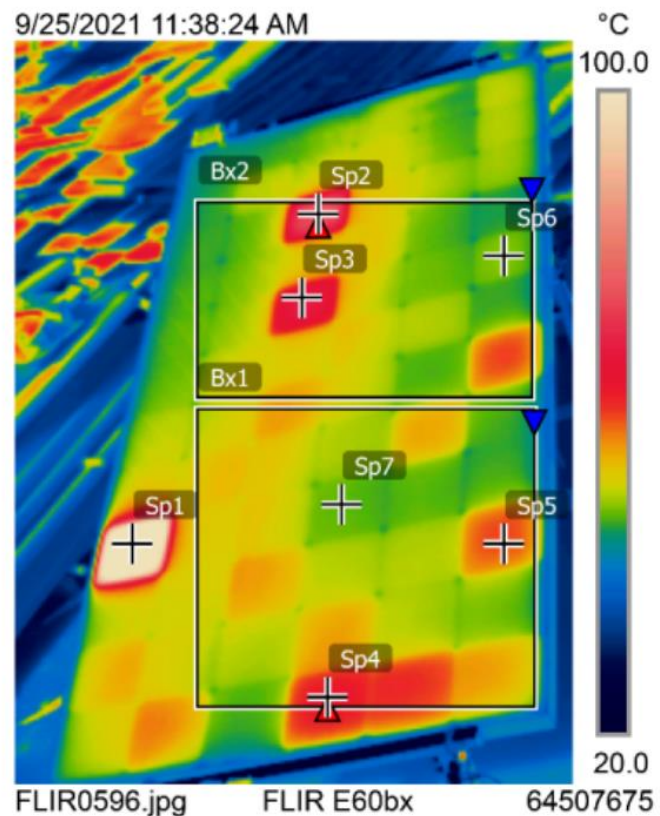
Na slici 3.9. prikazane su vruće točke (engl. *Hot spot*) gdje temperatura modula prelazi i 100 °C. Na drugoj slici 3.10. prikazana je prljavština koja je jedan od ponajvećih uzroka degradacije.

### Mjerenja

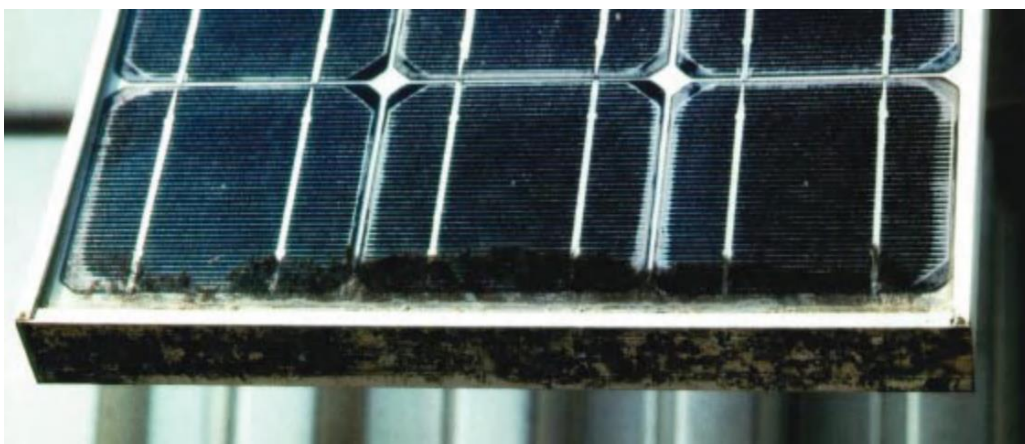
Bx1	Max	68.8 °C
	Min	48.9 °C
	Prosječno	57.0 °C
Bx2	Max	79.8 °C
	Min	48.5 °C
	Prosječno	56.7 °C
Sp1		114.2 °C
Sp2		79.8 °C
Sp3		72.7 °C
Sp4		68.8 °C
Sp5		64.9 °C
Sp6		53.9 °C
Sp7		52.6 °C

### Parametri

Emisivnost	0.8
Refl. temperatura	-15.5 °C



Sl. 3.9. Prikaz vrućih točaka na fotonaponskom modulu [12]



Sl. 3.10. Prikaz prljavštine na fotonaponskom modulu [13]

## 4. ISPITIVANJE PERFORMANSI FOTONAPONSKIH MODULA

Ispitivanje performansi fotonaponskih modula na terenu važno je za razumijevanje njihove učinkovitosti i pouzdanosti u stvarnim uvjetima. Koristeći potrebne instrumente i tehnike moguće je dobiti detaljan uvid u učinkovitost modula u različitim uvjetima, te otkrivanje potencijalnih problema i nepravilnosti koje nisu vidljive tijekom laboratorijskih testiranja što olakšava daljnju analizu, te daljnje postupanje na temelju dobivenih rezultata.

### 4.1. Instrument Metrel MI 3108

Instrument prikazan na slici 4.1. korišten za ispitivanje je Metrel MI 3108. Uključuje ispitivanja i mjerenja prema standardima IEC/EN 62446. Služi za ispitivanje fotonaponskih sustava, te ispitivanja električnih instalacija. Praktičan je za terensko ispitivanje jer kombinira više funkcija u jednom, te omogućuje točne i precizne rezultate. U sebi ima i neke napredne funkcije kao što je izračunavanje korekcijskih faktora za različite uvjete, memorija za pohranu, te komunikacija putem USB-a i Bluetooth-a za prijenos podataka. Instrument može ispitivati više funkcija, a neke od njih su: otpor izolacije, neprekinutost PE vodiča, RCD testiranje, otpor uzemljenja, AC struja, TRMS napon, frekvencija, fazni redoslijed, snaga, energija, harmonici. Korištene su slijedeće funkcije mjerenja: napon, struja, snaga,  $U_{OC}$  (Napon otvorenog kruga),  $I_{SC}$  (Struja kratkog spoja),  $I-U$  krivulja modula, sunčevo zračenje, temperatura modula [14].



Sl. 4.1. METREL MI 3108 [14]

## 4.2. Ispitivanje na lokaciji 1

Ispitivanje performansi fotonaponskih modula zahtjeva pažljiv odabir lokacije i fotonaponske elektrane. Za potrebe ispitivanja odabrana je fotonaponska elektrana (slika 4.2.) izgrađena prije 10 godina i nalazi se u mjestu Bukovlje pokraj Slavanskog Broda. Elektrana je postavljena na nadstrešnicu pokraj obiteljske kuće, te je lako dostupna za potrebe mjerenja. Okrenuta je prema jugu uz nagib od 33 stupnja što predstavlja idealne uvjete. Slavonski Brod prosječno ima oko 2000 sunčanih sati godišnje. Uvjet da bi se mjerenje uspješno ostvarilo je da jakost sunčevog zračenja bude veća od  $500 \text{ W/m}^2$ .



Sl. 4.2. Prikaz mjerenih fotonaponskih modula

### 4.2.1. Postupak ispitivanja

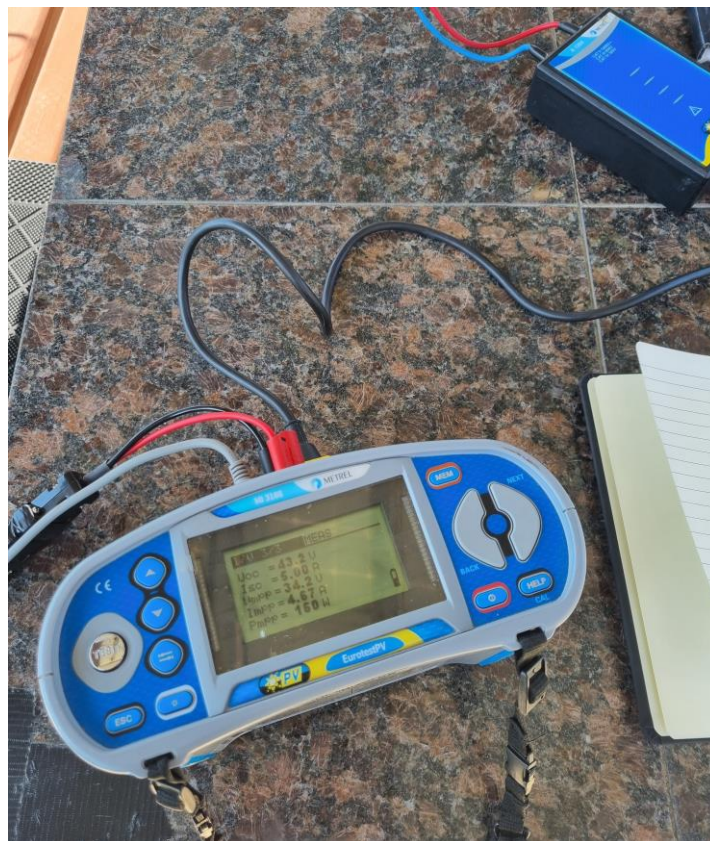
Kako bi se ispitivanje što kvalitetnije odradilo na terenu, bilo je potrebno pripremiti instrument tako da se unesu specifikacije modula. Instrument ima mogućnost da ispituje samo jedan modul ili više modula u stringu. Za potrebe ispitivanja odabrano je mjerenje samo jednog modula. Prvi dan ispitivanja postavljen je instrument i sva potrebna oprema (slika 4.3. i 4.4.). Toga dana je bilo oblačno vrijeme, no kako je uvjet za ispitivanje taj da jakost sunčevog zračenja bude veća od  $500 \text{ W/m}^2$ , ispitivanje nije uspjelo. Drugog dana lokacija je bila ista, te je ponovno postavljena oprema i instrument. Jakost sunčevog zračenja bila je iznad  $800 \text{ W/m}^2$  te je mjerenje uspješno obavljeno. Uz mjerenje jakosti sunčevog zračenja mjeri se i temperatura same ćelije. Nakon ispitivanja



osnovnih uvjeta prelazi se na ispitivanje strujno naponske karakteristike ( $I-U$  krivulja). Prvo ispitivanje bilo je ispitivanje zaprljanog fotonaponskog modula. Nakon toga očistili smo fotonaponski modul i ponovili ispitivanja.



Sl. 4.3. Prikaz postavljanja senzora jakosti sunčevog zračenja i senzora temperature modula



Sl. 4.4. Prikaz instrumenta i ispitivanih rezultata

### 4.2.2. Tehničke specifikacije modula ET-M572200WW 200W

Korišteni modul za prvo ispitivanje je fotonaponski modul ET-M572200WW 200W. Tehničke specifikacije fotonaponskog modula uključuju ključne parametre koji definiraju njegovu učinkovitost, dimenzije, električne karakteristike i drugo. Specifikacije fotonaponskog modula prikazane su u tablici 4.1.

### 4.2.3. Rezultati ispitivanja

Tablica 4.1. Specifikacije modula ET-M572200WW 200W

Vršna snaga	200 W
Struja kratkog spoja $I_{SC}$	5,70 A
Napon kratkog spoja $U_{OC}$	45,84 V
Nazivna struja $I_{MPP}$	5,41 A
Nazivni napon $U_{MPP}$	36,97 V
Učinkovitost modula	15,67 %
Dimenzije (V x Š x D)	1580 x 808 x 40 mm
Masa	15 kg

Nakon procesa ispitivanja, dobivaju se određeni rezultati. Instrument Metrel MI 3108 ima mogućnost da stvarne rezultate konvertira na standardne testne uvjete (STC). STC uvjeti su uvjeti pri kojima je jakost sunčevog zračenja  $1000 \text{ W/m}^2$ , dok je temperatura modula  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Mjereni i konvertirani rezultati nalaze se u tablici 4.2.

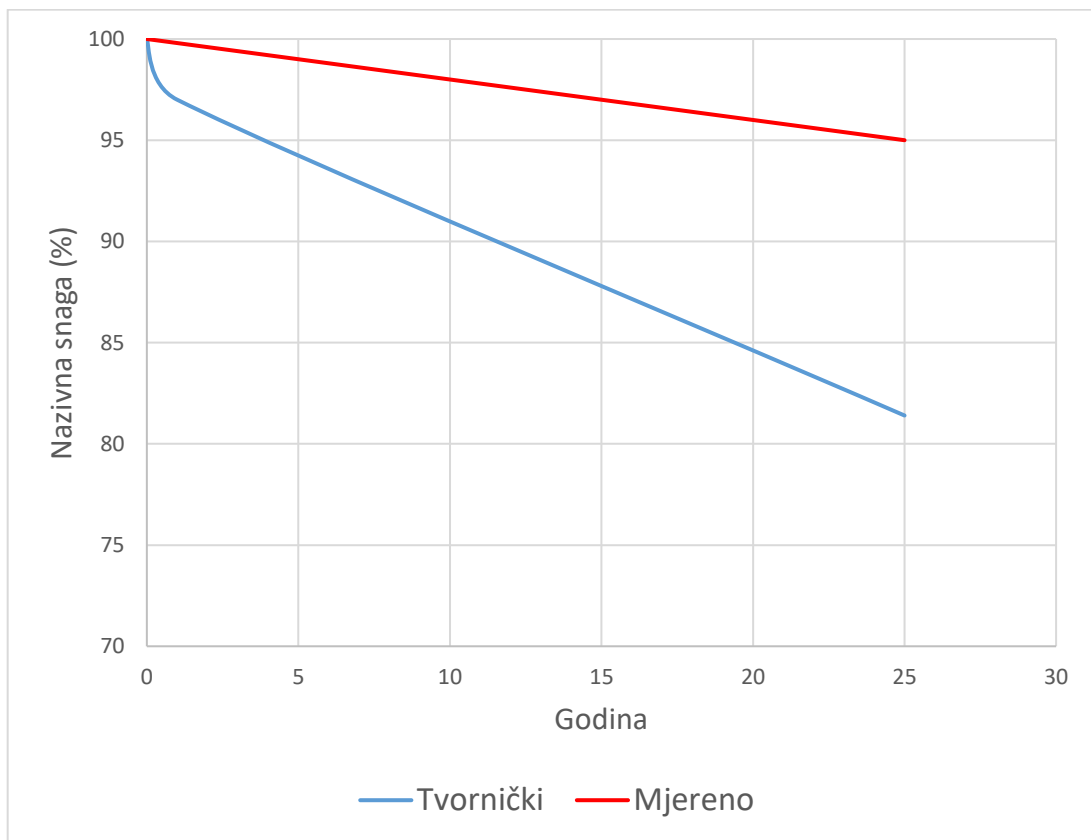
Tablica 4.2. Rezultati ispitivanja modula ET-M572200WW 200W

	Mjereni	STC
Jakost sunčevog zračenja	$822 \text{ W/m}^2$	$1000 \text{ W/m}^2$
Temperatura modula	$26,3 \text{ }^\circ\text{C}$	$25 \text{ }^\circ\text{C}$
Vršna snaga	160 W	196 W
Struja kratkog spoja $I_{SC}$	5,00 A	6,08 A
Napon kratkog spoja $U_{OC}$	43,2 V	43,9 V
Nazivna struja $I_{MPP}$	4,67 A	5,68 A
Nazivni napon $U_{MPP}$	34,2 V	34,4 V

#### 4.2.4. Očekivana i stvarna degradacija modula

Preračunavanje s mjerenih na STC uvjete važno zbog analize same degradacije. Tvornički podaci o degradaciji fotonaponskih modula prikazuju se prema STC uvjetima.

Tvornički podaci za modul ET-M572200WW 200W govore kako će nakon jedne godine nazivna snaga modula biti 97%, dok će nakon 25 godina pasti na 81,4%. Preračunavanjem iz rezultata dobivenih mjerenjem, dobiva se da stvarna nazivna snaga modula nakon 10 godina iznosi 98% početne. Ubacivanjem ovih podataka dobiva se sljedeći graf na slici 4.5.



Sl. 4.5. Očekivana i stvarna degradacija modula

Plavom bojom označena je očekivana degradacija a crvenom stvarna. Može se odrediti kako očekivana degradacija nazivne snage modula nakon 10 godina iznosi 91%, što je daleko manje od mjerenih 98%. Budući da je mjerenje bilo samo za do 10. godine, od 10. do 25. godine pretpostavljamo da je degradacija linearno ekstrapolirala.

### 4.3. Ispitivanje na lokaciji 2

Ispitivanje drugog fotonaponskog modula odrađeno je na zgradi Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Sustav je snage 10 kWp. Fotonaponska elektrana izgrađena je 2014. Godine. Postupak ispitivanja je kao i u prvom slučaju prikazan na slici 4.6.



Sl. 4.6. Prikaz postupka mjerenja

#### 4.3.1. Tehničke specifikacije modula BISOL BMU-250

Korišteni modul za drugo ispitivanje je fotonaponski modul BISOL BMU-250. Specifikacije fotonaponskog modula prikazane su u tablici 4.3.

Tablica 4.3. Specifikacije modula BISOL BMU-250

Vršna snaga	250 W
Struja kratkog spoja $I_{sc}$	8,75 A
Napon kratkog spoja $U_{oc}$	38,4 V
Nazivna struja $I_{MPP}$	8,25 A
Nazivni napon $U_{MPP}$	30,3 V
Učinkovitost modula	16,2 %
Dimenzije (V x Š x D)	1649 x 991 x 35 mm
Masa	18,5 kg



### 4.3.2. Rezultati ispitivanja

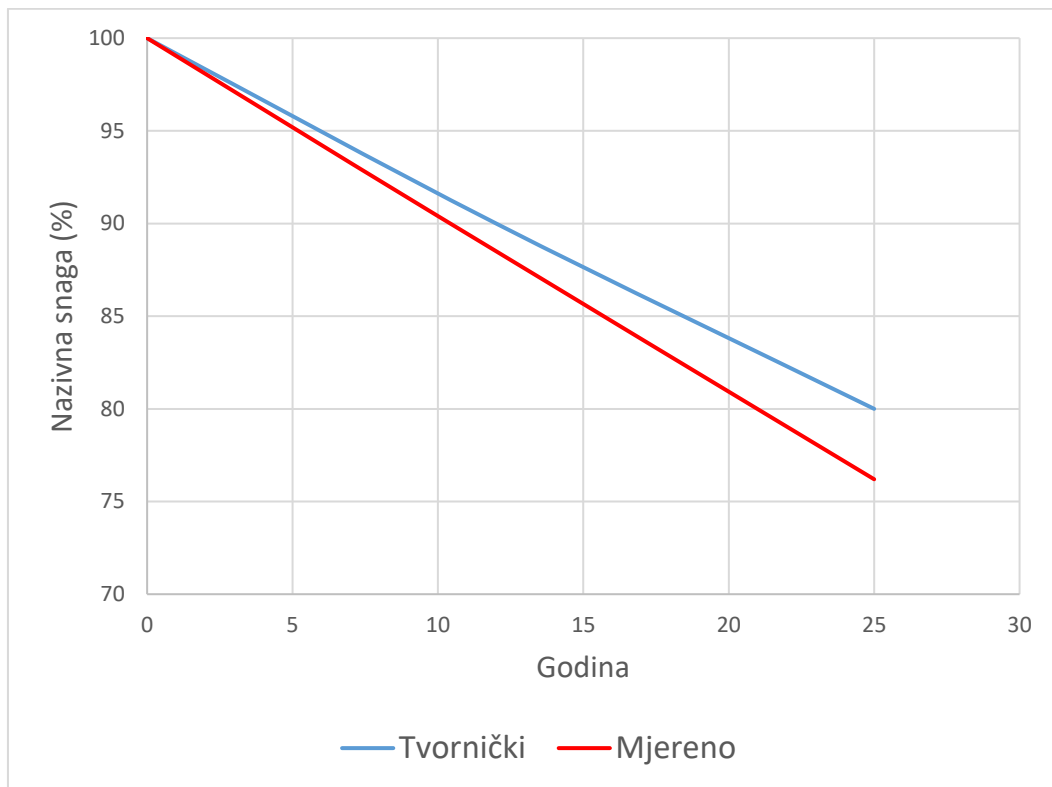
Mjereni i konvertirani rezultati na STC uvjete nalaze se u tablici 4.4.

Tablica 4.4. Rezultati ispitivanja modula BISOL BMU-250

	Mjereni	STC
Jakost sunčevog zračenja	631 W/m <sup>2</sup>	1000 W/m <sup>2</sup>
Temperatura modula	49,8 °C	25 °C
Vršna snaga	133 W	226 W
Struja kratkog spoja I <sub>SC</sub>	5,72 A	8,93 A
Napon kratkog spoja U <sub>OC</sub>	33,2 V	36,7 V
Nazivna struja I <sub>MPP</sub>	5,03 A	7,86 A
Nazivni napon U <sub>MPP</sub>	26,4 V	28,8 V

### 4.3.3. Očekivana i stvarna degradacija

Tvornički podaci za modul BISOL BMU-250 govore kako će nakon 12 godina nazivna snaga biti oko 90%, dok će nakon 25 godina biti 80%. Preračunavanjem iz rezultata dobivenih mjerenjem, dobiva se da stvarna nazivna snaga modula nakon 10 godina iznosi 90,4% početne. Ubacivanjem ovih podataka dobiva se graf.



Sl. 4.7. Očekivana i stvarna degradacija modula

Nakon ubacivanja podataka u graf na slici 4.7. plavom bojom označena je očekivana degradacija a crvenom stvarna. Može se odrediti kako očekivana degradacija nazivne snage modula nakon 10 godina iznosi 92%, što je više od mjerenih 90,4%. Kao i kod Modela 1 pretpostavimo da je mjerena degradacija linearno ekstrapolirala od 10. do 25. godine.

## **5. MODELIRANJE I ANALIZA UTJECAJA DEGRADACIJE FOTONAPONSKIH MODULA NA POVRAT INVESTICIJE**

U ovome poglavlju analizirati će se utjecaj degradacije na godišnju proizvodnju i povrat investicije, za dva sustava sa dva različita fotonaponska modula, za slučajeve tvornički definirane i mjerene degradacije.

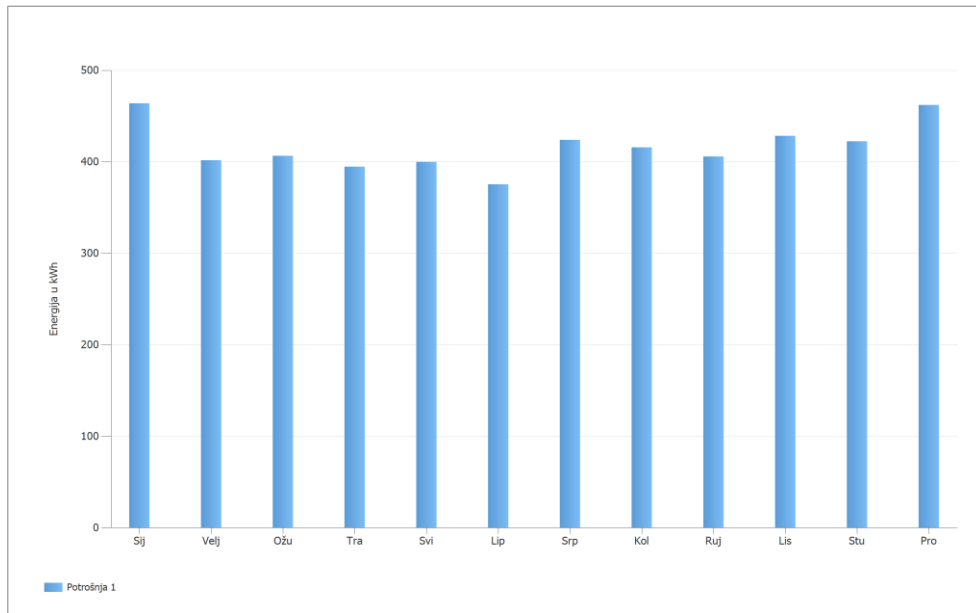
U softveru PV\*SOL premium modelirana su dva modela fotonaponske elektrane. Oba modela parametrirana su istim parametrima, dok se mijenjala samo vrsta fotonaponskih modula. U oba slučaja dizajnirala se fotonaponska elektrana tako da bude veličine 5 kW.

### **5.1. PV\*SOL premium**

PV\*SOL premium je napredni alat za simulaciju fotonaponskih elektrana. Koristi se za detaljnu analizu fotonaponskih sistema. Pomoću njega se može precizno predvidjeti godišnja proizvodnja fotonaponske elektrane. Detaljno simuliranje omogućuje na način da u obzir uzima geografsku lokaciju, klimatološke podatke, orijentaciju modula, nagib modula i slično. Ima mogućnost 3D modeliranja kuće, krovova i drugih građevina što omogućava izradu do najsitnijih detalja. Također podržava izradu okoline oko same građevine, te analizu sjena. Sjene su velik problem kod stvarnih elektrana. Ako je zasjenit jedan modul cijeli string će se prilagoditi tome jednom modulu. Sami softver podržava i velik broj modula i pretvarača, ali daje mogućnost da unesemo i svoje parametre. Uključuje i alate koji predviđaju troškove izgradnje same elektrane, te povrat investicije. Krajnji rezultat je izvještaj koji generira softver iz kojega se mogu izvući svi bitni parametri i podaci.

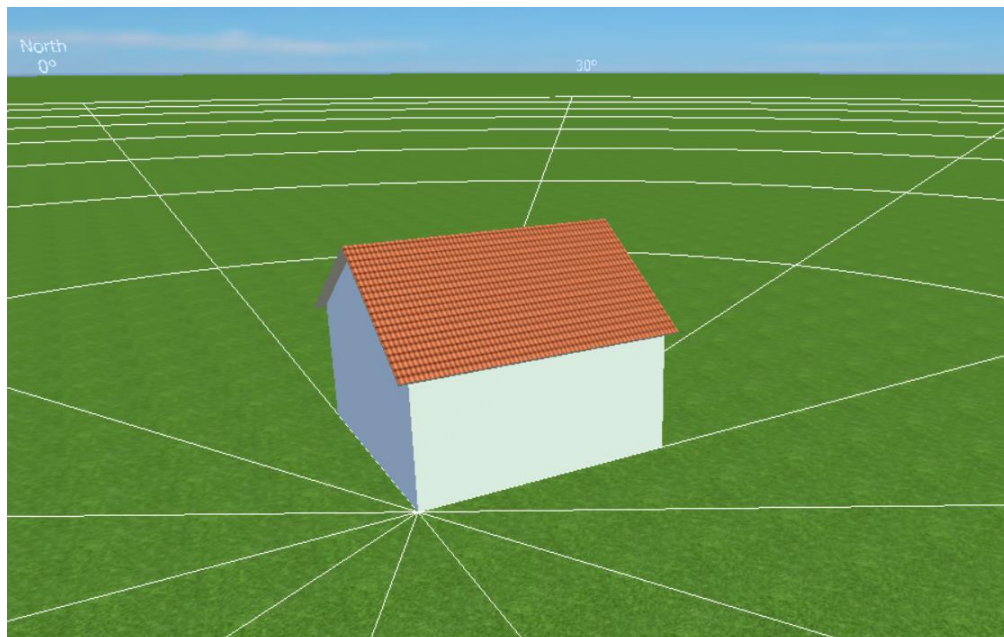
### **5.2. Postavke u PV\*SOL premiumu**

Kod dizajniranja modela u PV\*SOL premiumu za lokaciju je odabran grad Slavonski Brod, gdje je godišnja suma globalnog zračenja oko 1259 kWh/m<sup>2</sup>, dok je godišnja prosječna temperatura oko 12,1°C. Odabire se trofazni sustav. Nakon toga definira se godišnja potrošnja, odnosno profil godišnje potrošnje (slika 5.1.). Odabran je profil 2 – dvije odrasle osobe s dvoje djece. Godišnja potrošnja iznosi 5000 kWh.



Sl. 5.1. Prikaz potrošnje kućanstva po mjesecima

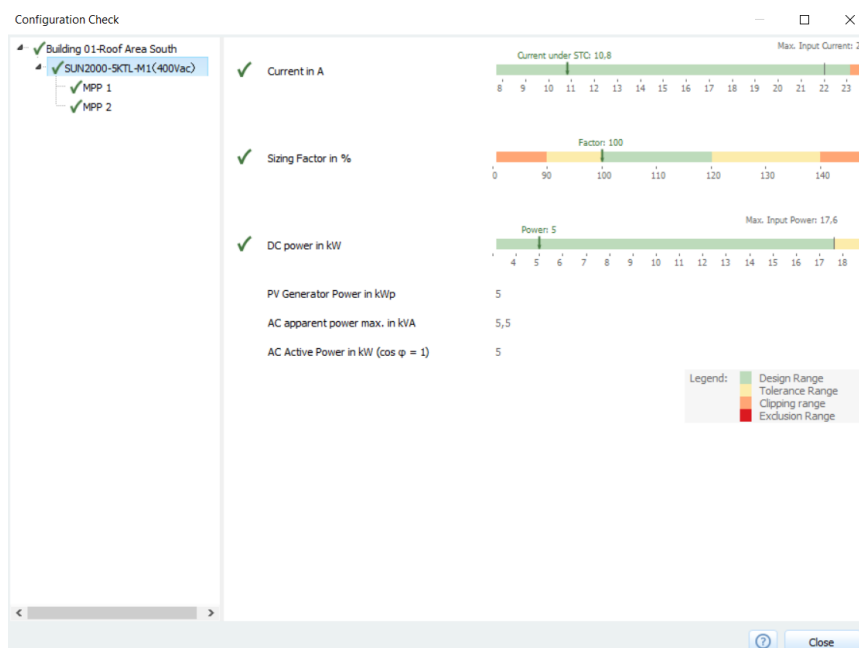
Nakon postavljenih parametara generira se 3D model kuće (slika 5.2.). Kuća je duljine 12 i širine 12 metara. Visina kuće je 6 metara. Kuća je postavljena idealno, odnosno krov na koji se postavljaju moduli okrenut je prema južnoj strani, kao i na stvarnom mjerenom objektu. Nagib krova je  $33^\circ$ . Na krovu nema nikakvih zasjenjenja kao i na stvarnom mjerenom objektu.



Sl. 5.2. 3D prikaz objekta

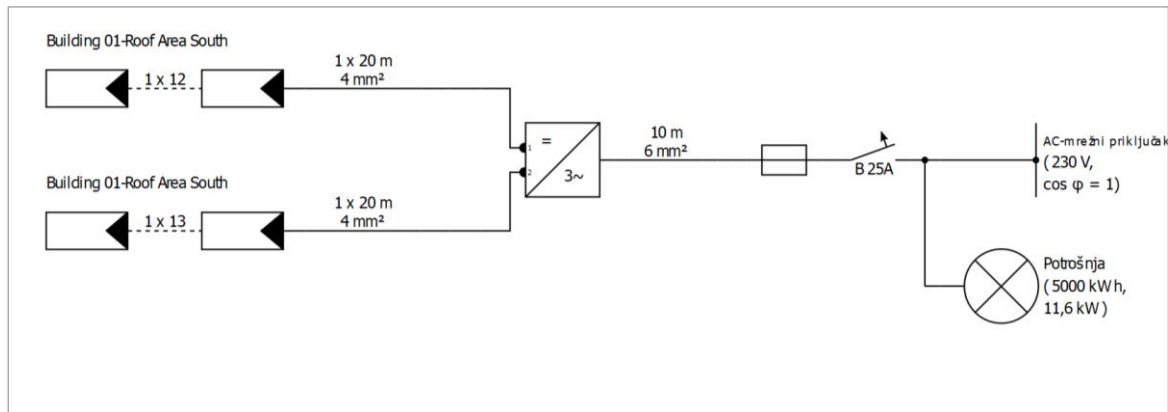
Nakon definiranja 3D modela, postavljaju se odgovarajući fotonaponski moduli na krov građevine. Moduli korišteni u softveru su kao i moduli na stvarnim mjerenim objektima.

Kada smo odabrali fotonaponski modul, odabire se odgovarajući izmjenjivač. Kako analiziramo degradaciju fotonaponskog modula, tip izmjenjivača nije bitan, nego je bitno da je ispravno odabran (slika 5.3.). Ukoliko je izmjenjivač u zelenom području pravilno je odabran, žuto područje označava područje tolerancije, dok crveno područje označava da izmjenjivač nije dobro odabran. Model izmjenjivača je Huawei Technologies SUN2000-5KTL-M1(400Vac) nazivne izlazne snage 5 kW.



Sl. 5.3. Prikaz pravilno izabranog izmjenjivača

Još jedna od mogućnosti u dizajniranju je i kabliranje (slika 5.4.). Moguće je mijenjati duljinu i presjek kabela, te će se tako mijenjati i djelatni otpor. Taj utjecaj treba uzeti u obzir jer su djelatni gubici proporcionalni kvadratu struje i djelatnom otporu. Također je moguće dodavati i druge elemente kao što su: osigurač, brojilo, uzemljenje, transformator. Modelirani kabeli na DC strani, odnosno od fotonaponskih modula do izmjenjivača su presjeka  $4 \text{ mm}^2$ . Po svakom stringu odabrana je duljina od 20 metara. Modelirani kabel na AC strani, odnosno od izmjenjivača do mreže je presjeka  $6 \text{ mm}^2$  duljine 10 metara. Također je i dodan osigurač B karakteristike od 25 A.



Sl. 5.4. Prikaz presjeka i duljine kabela

Financijska analiza vrlo je bitan faktor u modeliranju. Ono govori hoće li se i za koliko isplatiti fotonaponska elektrana. Od podataka potrebno je unijeti trošak investicije, godišnji troškovi održavanja, godišnji povrat kapitala, odabir financijskog modela, te definirati tarife po kojoj će se energija kupovati i prodavati.

Trošak investicije govori o trošku u samoj izgradnji fotonaponske elektrane. U tu cijenu ulazi izrada projekta, materijal (fotonaponski moduli, izmjenjivač, konstrukcija, kabeli, DC ormar, AC ormar), rad ljudi, ispitivanje i puštanje elektrane u pogon i drugo. Cijena može varirati ukoliko se radi o elektrani koja se montira na krov ili elektrani koja se montira na tlo, o samoj kvaliteti opreme, te o raznim drugim faktorima. Definirana cijena je 1000 €/kWh.

Godišnji troškovi održavanja su troškovi zamjene komponenti kao što su dotrajali ili neispravni fotonaponski moduli, te čišćenje i pranje fotonaponskih modula. Kako bi se smanjili godišnji troškovi održavanja preporučljivo je investiranje u što kvalitetnije komponente. Definirana cijena godišnjih troškova održavanja je 2% cijene investicije uz inflaciju od 2%.

Godišnji povrat kapitala ovisi o trošku početne investicije, o tome koliko električne energije elektrana proizvodi, o poticajnim i subvencijama gradova ili države, te ponajviše o cijeni električne energije. Definirana cijena godišnjeg povrata kapitala je 5% i postavlja se vrijeme izračuna na 20 godina.

U softveru postoje 2 financijska modela za odabrati a to su „Surplus Feed-in“ i „Net Metering“ model. „Surplus Feed-in“ model je definiran kao „Kupac s vlastitom proizvodnjom“, dok je „Net Metering“ model definiran kao „Kupac korisnik postrojenja za samoopskrbu“. Oba modela rade

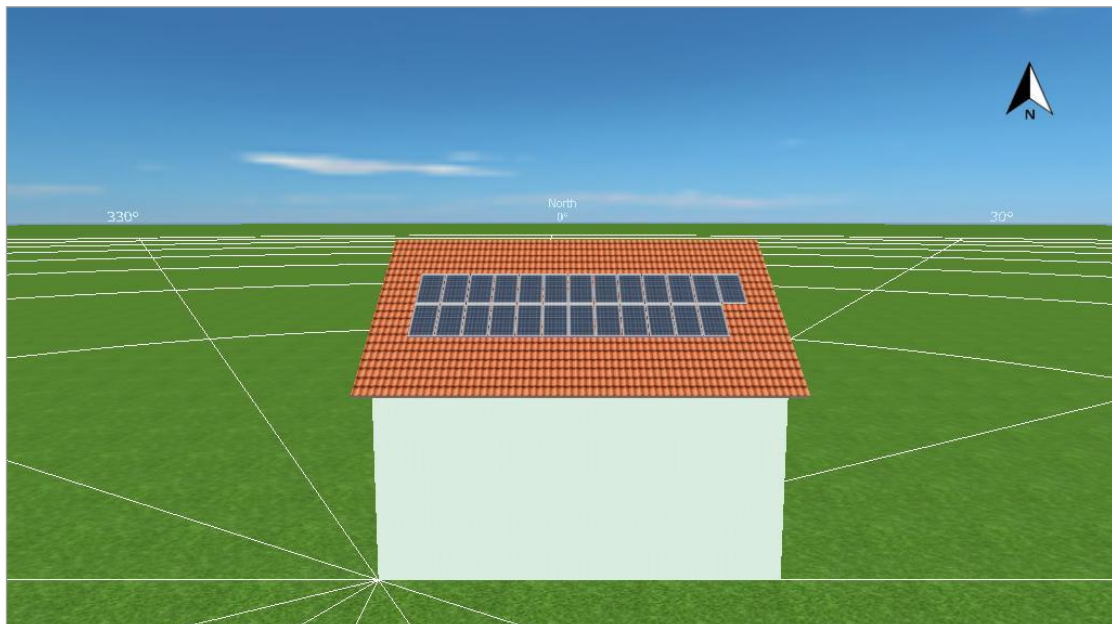
na sličnom principu gdje se proizvedena električna energija primarno koristi za vlastite potrebe, dok se ostatak predaje u elektroenergetsku mrežu. Odabran je model „Net Metering“.

Definiranje tarife možda je i najbitniji dio financijske analize jer pomoću tarifa određujemo po kojoj će se cijeni električna energija prodavati, odnosno kupovati. Za kupovanje električne energije iz elektroenergetske mreže definiraju se dvije tarife, odnosno viša i niža tarifa. Viša tarifa definirana je tijekom dana i iznosi 0,159 €/kWh, dok je niža tarifa definirana tijekom noći i iznosi 0,083 €/kWh. Otkupna cijena je cijena električne energije koja se dobije za sav višak proizvedene električne energije koji se ne troši u kućanstvu, nego se predaje u elektroenergetsku mrežu. Definirana otkupna cijena je 0,06 €/kWh.

### 5.3. Model 1

Model 1 je model gdje su korišteni fotonaponski moduli ET-M572200WW 200W. Fotonaponski moduli su sa specifikacijama prikazanim u tablici 4.1.

Budući da fotonaponska elektrana mora biti veličine 5 kW, prema izračunu je postavljeno 25 fotonaponskih modula u 2 reda (slika 5.5.). U prvom redu je 13 modula, dok je u drugom 12. Izmjenjivač ima mogućnost dva MPP ulaza, pa je tako 13 modula postavljeno u jedan string, a 12 u drugi string. Površina koju zauzimaju fotonaponski moduli na krovu iznosi 31,9 m<sup>2</sup>.

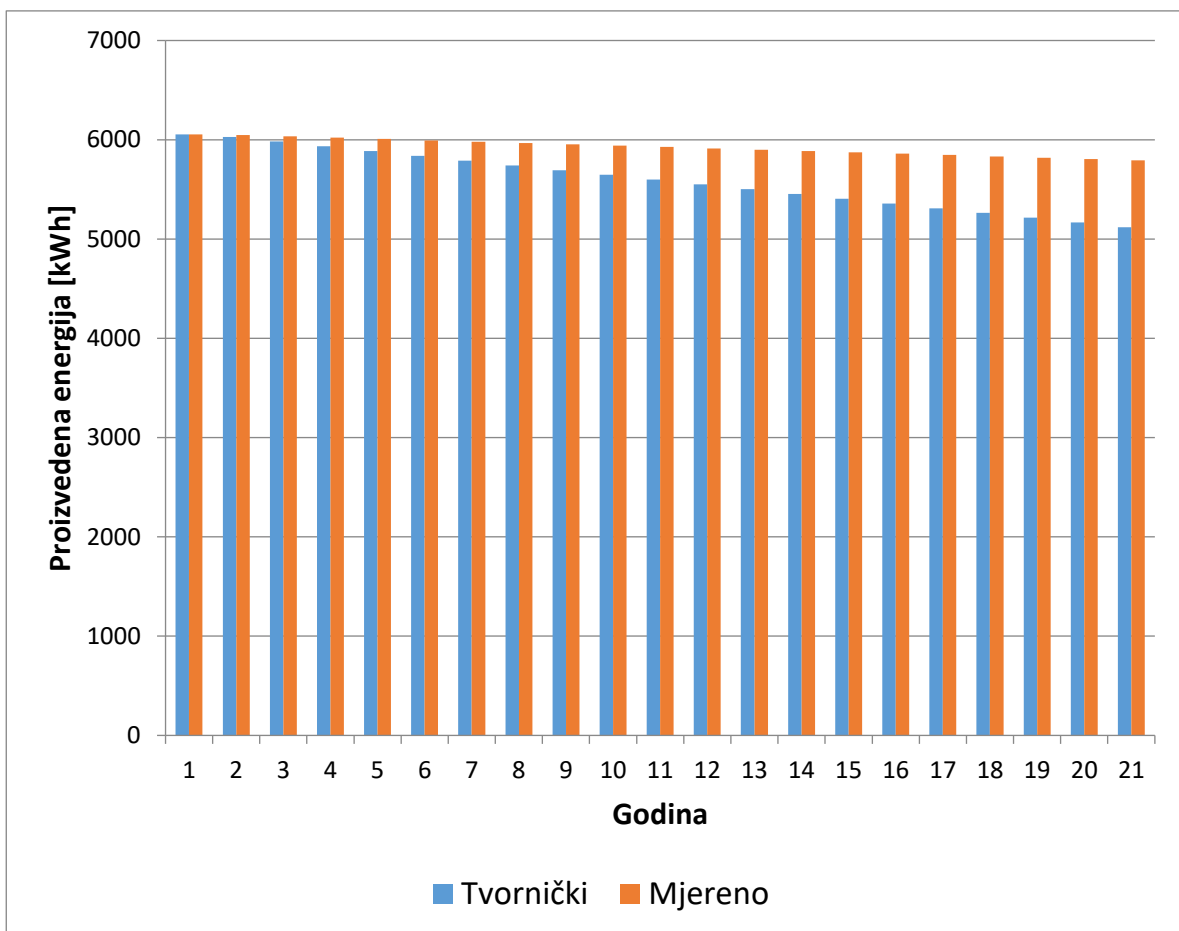


Sl. 5.5. Prikaz 3D objekta s fotonaponskim modulima

### 5.3.1. Godišnja proizvodnja električne energije

Kako i u kojoj količini degradacija utječe na fotonaponski sustav najbolje se može odrediti analizom godišnje proizvodnje električne energije. Pomoću softvera PV\*SOL premium dobiveni su podaci godišnje proizvodnje kada se koristi tvornički definirana degradacija, te mjerenjem određena degradacija.

Analiziranjem grafa na slici 5.6. može se uvidjeti kolika je razlika u godišnjoj proizvodnji tvornički definirane degradacije i mjerenjem određene degradacije. Analizirati će se podaci nakon 10 godina jer je tolika starost ispitivane elektrane na terenu. Tvornički definiranom degradacijom godišnja proizvodnja nakon 10 godina iznosi 5646 kWh. Mjerenjem određenom degradacijom godišnja proizvodnja nakon 10 godina iznosi 5940 kWh. To znači da je stvarna godišnja proizvodnja električne energije veća za 5% u odnosu na tvornički definirane parametre degradacije fotonaponskog modula.



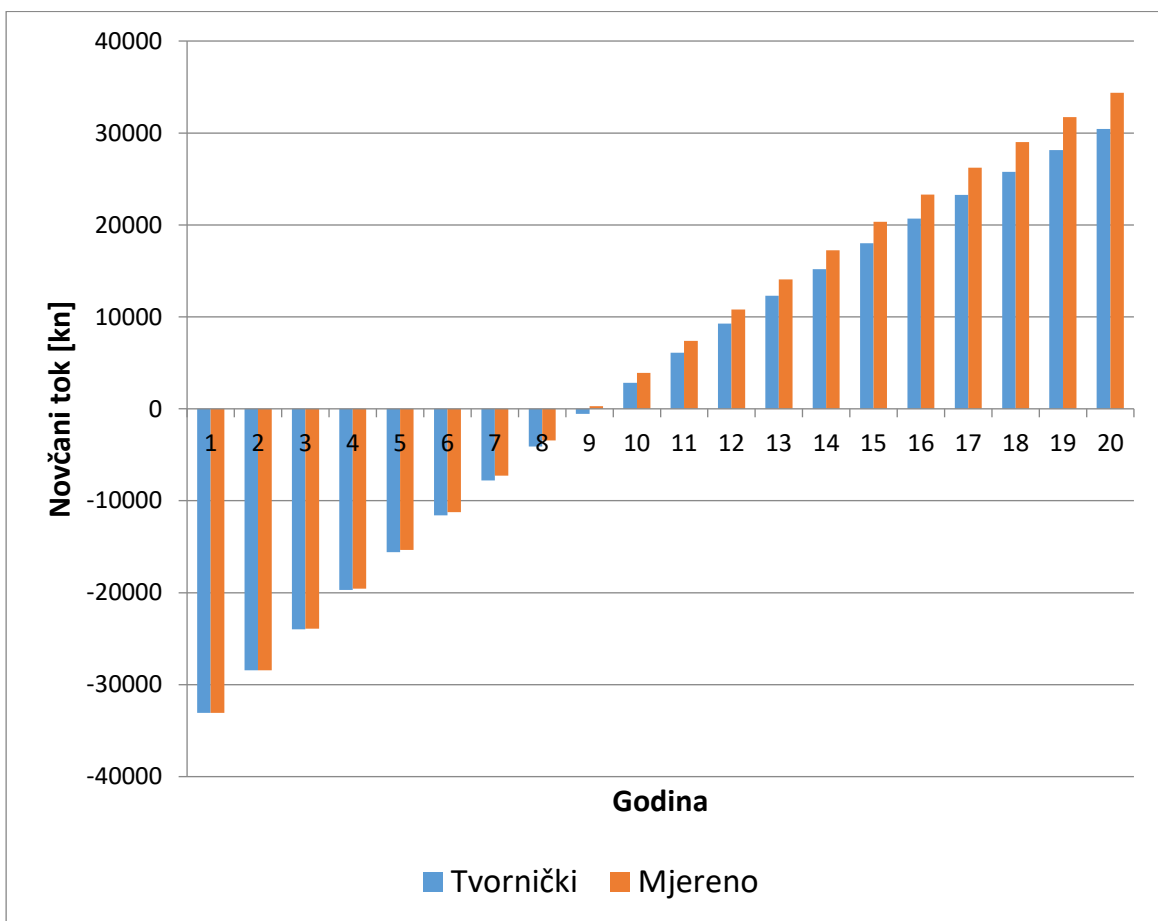
Sl. 5.6. Godišnja proizvodnja električne energije



### 5.3.2. Povrat investicije

Stopa povrata investicije je mjera koja se koristi za procjenu učinkovitosti ili profitabilnosti investicije. Govori o tome za koliki će se vremenski period uloženi novac vratiti, odnosno kada će se poslovati s dobitkom. Ukoliko je stopa povrata investicije veća od optimalne može se utjecati na više faktora kako bi se ona smanjila. Najvažniji faktor je da se fotonaponska elektrana ne predimenzionira. Drugi faktor je taj da se vrijeme potrošnje u kućanstvu uskladi s vremenom rada fotonaponske elektrane, kako bi se što više električne energije iskoristilo za vlastite potrebe, a manje predalo u elektroenergetsku mrežu.

Softverom PV\*SOL premium dobiven je graf na slici 5.7. gdje je prikazana stopa povrata investicije unošenjem parametara za tvornički definiranu degradaciju, te mjerenjem određenu degradaciju.



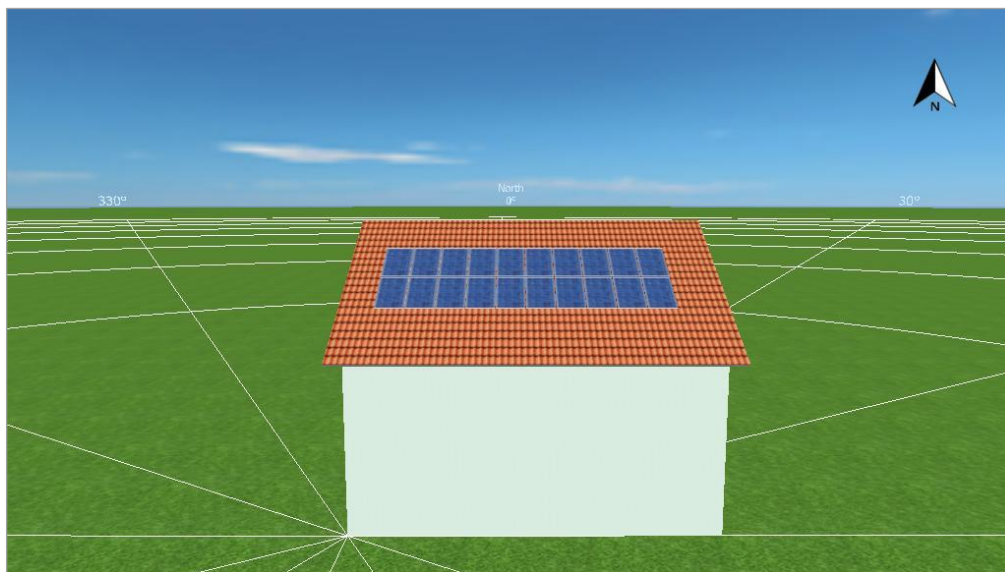
Sl. 5.7. Grafički prikaz povrata investicije

Iz rezultata dobijenih softverom vidimo kako stopa povrata investicije sa tvornički definiranom degradacijom iznosi 9,2 godine, dok stopa povrata investicije mjerenom degradacijom iznosi 8,9 godina. To znači da se u stvarnosti stopa povrata investicije smanjila za 0,3 godine odnosno 3,6 mjeseci.

Analizom godišnje proizvodnje i povrata investicije pomoću degradacije fotonaponskog modula ET-M572200WW 200W može se zaključiti kako modul ima približno jednake performanse kao na početku životnoga vijeka. Degradacija od 2% tijekom 10 godina korištenja dovela je do veće nego očekivane proizvodnje električne energije. Takve performanse dolaze od toga da je modul proizveden od kvalitetnih materijala i tehnologija što omogućuje dugotrajnu pouzdanost. Dobra instalacija i održavanje također je doprinijelo očuvanju performansi. Okolišni faktori na mjestu instalacije fotonaponske elektrane, poput temperature, vlažnosti i izloženosti UV zračenju nisu imali prevelik utjecaj na fotonaponski modul. Ovom analizom zaključno je da fotonaponski modul je iznimno kvalitetan, dobro održavan i da će vjerojatno nastaviti pružati dobre performanse i u budućnosti.

## 5.4. Model 2

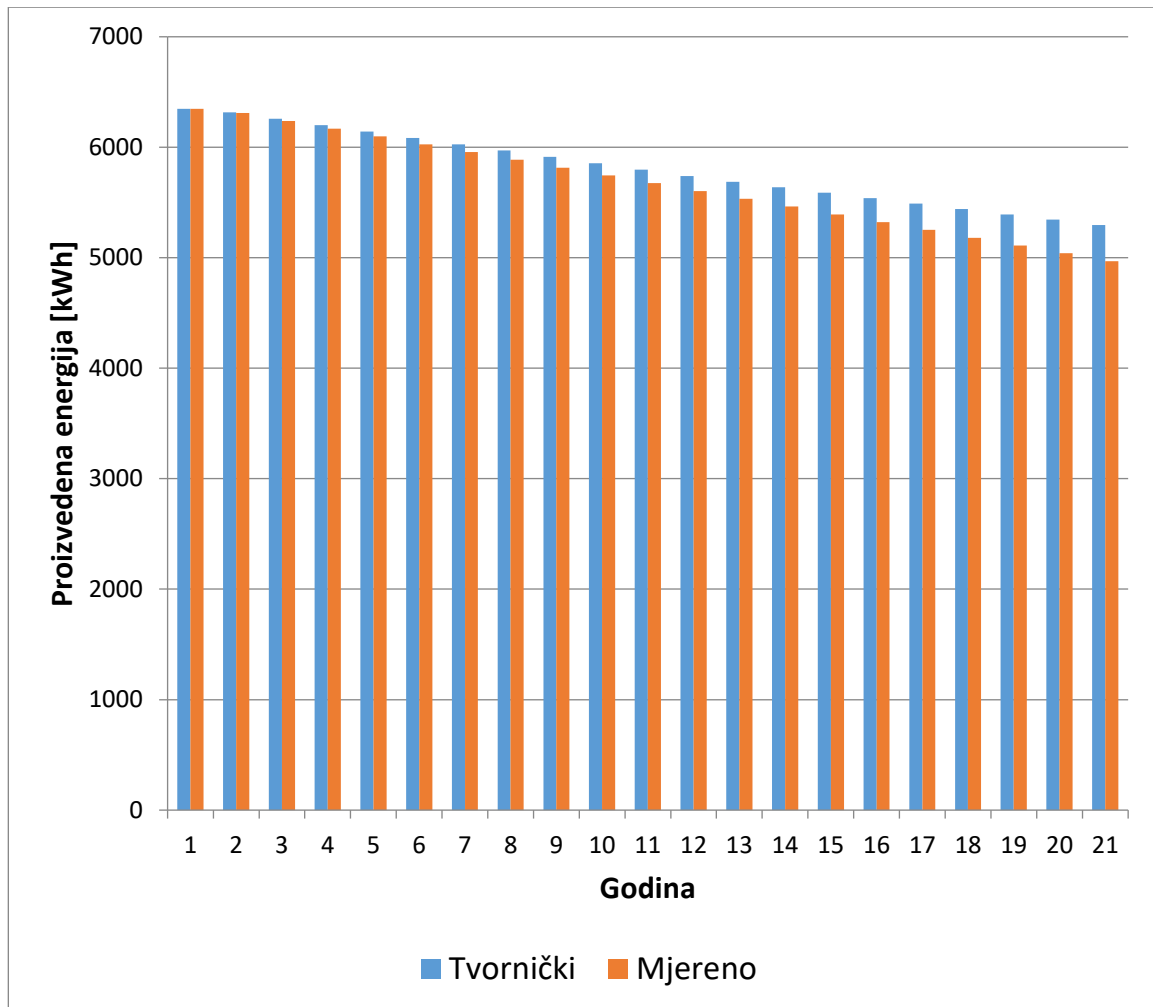
Model 2 je model gdje su korišteni fotonaponski moduli BISOL BMU-250. Fotonaponski moduli su sa specifikacijama prikazanim u tablici 4.1. Budući da je fotonaponska elektrana identične snage od 5 kW kao i Model 1, prema izračunu je postavljeno 20 fotonaponskih modula u 2 reda po 10 modula u svakom redu (slika 5.8.). 10 modula postavljeno u jedan string, te 10 u drugi string. Površina koju zauzimaju fotonaponski moduli je 32,7 m<sup>2</sup>.



Sl. 5.8. Prikaz 3D objekta s fotonaponskim modulima

### 5.4.1. Godišnja proizvodnja električne energije

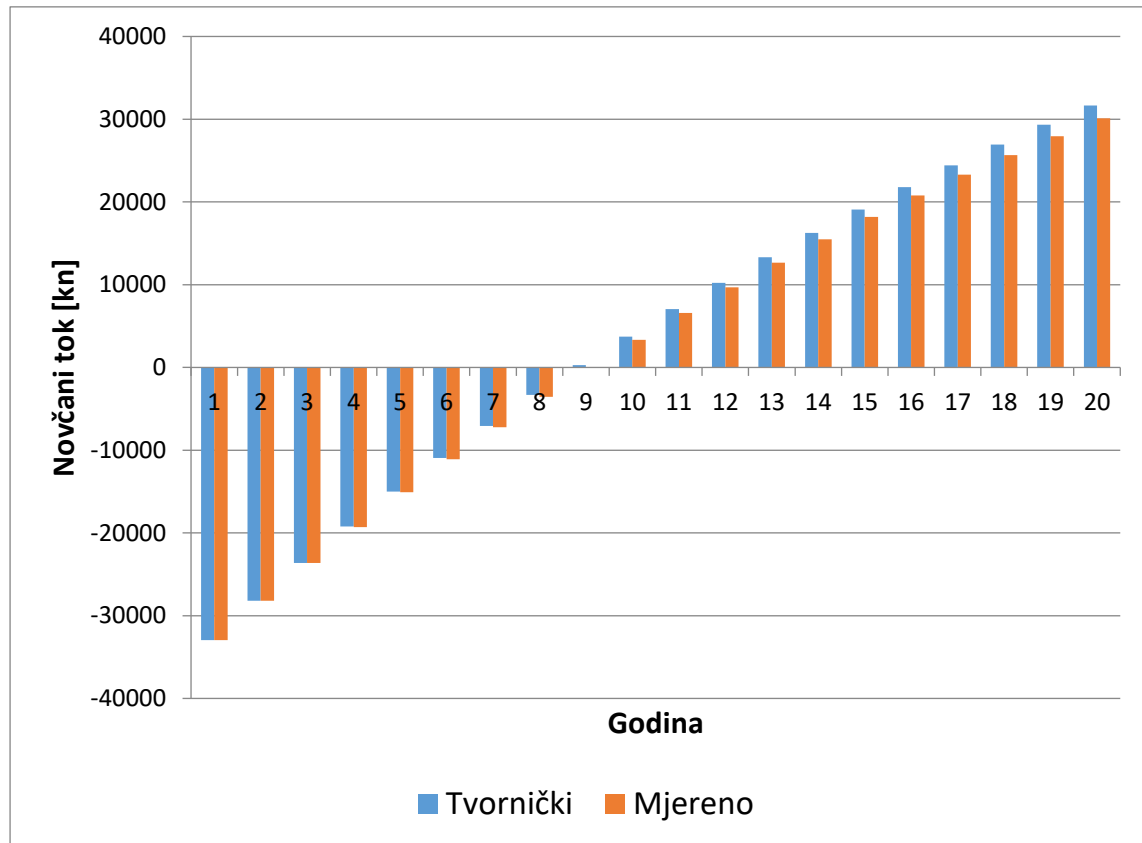
Kao i kod Modela 1 uz pomoć godišnje proizvodnje električne energije analizirati će se tvornička i mjerena degradacija. Iz grafa na slici 5.9. vidimo kako godišnja proizvodnja tvornički definiranom degradacijom nakon 10 godina iznosi 5854 kWh, dok kod mjerenjem određenom degradacijom iznosi 5744 kWh. Znači da se stvarna godišnja proizvodnja smanjila za 1,9% u odnosu na tvornički definirane parametre degradacije fotonaponskog modula.



Sl. 5.9. Godišnji protok energije elektrane nakon instaliranja

### 5.4.2. Povrat investicije

Kao i kod Modela 1 softverom su dobiveni rezultati stope povrata investicije. Graf na slici 5.10. prikazuje stopu povrata investicije tvornički definiranom degradacijom te mjerenom degradacijom.



Sl. 5.10. Grafički prikaz povrata investicije

Stopa povrata investicije tvornički definiranom degradacijom iznosi 8,9 godina, dok mjerenom degradacijom stopa povrata investicije iznosi 9 godina, što je povećanje za 0,1 godinu odnosno 1,2 mjeseca.

Analizom godišnje proizvodnje i povrata investicije pomoću degradacije fotonaponskog modula BISOL BMU-250 može se zaključiti kako je modul degradirao onako kako je i predviđeno tvorničkim podacima. Degradacija od 9,6% u vremenu od 10 godina nije značajno smanjila godišnju proizvodnju u odnosu na očekivanu. Dobrim održavanjem očekuje se kako će fotonaponski modul nastaviti degradirati prema tvorničkim procjenama.

## 6. ZAKLJUČAK

Degradacija fotonaponskih modula ključan je faktor koji utječe na dugoročne performanse fotonaponskih sustava. Ovaj diplomski rad analizirao je degradaciju kroz mjerenja dva različita modula, ET-M572200WW i BISOL BMU-250, u različitim uvjetima rada te simulacijom korištenjem PV\*SOL premium softvera. Na temelju provedenih ispitivanja, utvrđeno je da degradacija modula, iako neizbježna, može biti značajno manja od tvornički očekivane, pod uvjetom da su moduli pravilno održavani i postavljeni u optimalnim uvjetima.

U prvom dijelu analize razmatrana su ispitivanja fotonaponskog modula ET-M572200WW, postavljenog na lokaciji s dobrim klimatskim uvjetima i relativno niskom razinom izloženosti agresivnim vanjskim utjecajima. Ispitivanja su pokazala da je stvarna degradacija modula nakon deset godina iznosila svega 2%, što je značajno manje od očekivane degradacije od 9%. Ovi rezultati ukazuju na izuzetnu kvalitetu samih modula, ali i na važnost redovitog održavanja i pažljivog praćenja performansi kroz vrijeme. Degradacija od 2% povećala je godišnju proizvodnju u odnosu na očekivanu za 5%, dok se sami povrat investicije smanjio sa 9,2 godina na 8,9 godina. Ova analiza potvrđuje da moduli visoke kvalitete mogu zadržati visoku razinu učinkovitosti kroz duže vremensko razdoblje.

S druge strane, rezultati ispitivanja drugog modula, BISOL BMU-250, pokazali su značajniji pad performansi. Nakon deset godina, stvarna degradacija ovog modula iznosila je 9,6%, što je veće od tvornički predviđene degradacije. Ovaj pad nazivne snage rezultirao je smanjenjem godišnje proizvodnje električne energije za samo 1,5%, što nije preveliko odstupanje. Zbog ovakvih rezultata godišnje proizvodnje, povrat investicije od 8,9 godina minimalno se povećao. Ovi rezultati za razliku od modula ET-M572200WW ukazuju na to da su faktori poput lošije kvalitete materijala, teških okolišnih uvjeta i nedovoljnog održavanja imali ključnu ulogu u bržem starenju ovog modula.

Simulacije u softveru PV\*SOL premium potvrdile su kako se utjecaj degradacije na performanse može predvidjeti i analizirati kroz modele. Korištenje naprednih simulacijskih alata omogućuje investitorima i projektantima precizniju procjenu dugoročnih performansi fotonaponskih sustava, čime se smanjuje rizik od financijskih gubitaka uzrokovanih bržom degradacijom modula.

Zaključno, rezultati istraživanja pokazuju da degradacija fotonaponskih modula nije uniformna i može varirati ovisno o kvaliteti modula i uvjetima pod kojima su instalirani i održavani. Iako je degradacija prirodni proces, pravilnim odabirom modula, kvalitetnom instalacijom i redovitim

praćenjem performansi moguće je značajno smanjiti njezin utjecaj na proizvodnju električne energije i povrat investicije. Fotonaponski sustavi koji koriste kvalitetne module, poput ET-M572200WW, mogu zadržati visoku razinu učinkovitosti čak i nakon desetljeća rada, dok su sustavi s modulima niže kvalitete podložniji bržem padu performansi, što može negativno utjecati na ukupnu profitabilnost.

## LITERATURA

- [1] M. A. Green, et al., Solar cell efficiency tables (Version 57), Progress in Photovoltaics: Research and Applications, br. 1, sv. 29, str. 3-15, siječanj 2021.
- [2] D. Dirnberger, C. Reise, Bifacial performance evaluation – Results from outdoor tests and energy rating procedure, PV Tech Journal, br. 4, sv. 27, str. 25-33, ožujak 2021.
- [3] B. P. Jelle, C. Breivik, H. D. Røkenes, Building integrated photovoltaics: A concise description of the current state of the art and possible research pathways, Solar Energy Materials and Solar Cells, br. 100, sv. 1, str. 69-96, kolovoz 2012.
- [4] Z. Yu, K. Sun, Y. Chang, Flexible and lightweight solar cells for portable power applications, Nature Reviews Materials, br. 10, sv. 5, str. 665-681, listopad 2020.
- [5] W. Yang, et al., Advanced materials and coatings for enhanced performance of solar photovoltaic modules, Renewable and Sustainable Energy Reviews, br. 145, sv. 1, str. 111051, kolovoz 2021
- [6] M. Aghaei, A. Fairbrother, A. Gok, S. Ahmad, S. Kazim, K. Lobato, G. Oreski, A. Reinders, J. Schmitz, M. Theelen, P. Yilmaz, J. Kettle, Review of degradation and failure phenomena in photovoltaic modules, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 159, čl. 112160, svibanj 2022.
- [7] D. Šljivac, D. Topić, Obnovljivi izvori električne energije, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Osijek, 2018.
- [8] Global Solar Atlas, Global Solar Atlas [online], The World Bank Group, Washington D.C., 2024., dostupno na: <https://globalsolaratlas.info/map?c=11.523088,8.261719,2&s=15.614143,-54.829384&m=site> [Posjećeno 10.9.2024.]
- [9] S. Kurtz, Photovoltaic Module Reliability Workshop 2011, Technical Report NREL/TP-5200-60170, National Renewable Energy Laboratory, November 2013.
- [10] D. Philips, W. Warmuth, Photovoltaics Report, Fraunhofer ISE and PSE, 2021.
- [11] CNET, Monocrystalline vs. Polycrystalline: Which Solar Panels Are Right for You? [online], CNET, 2024, dostupno na: <https://www.cnet.com/home/energy-and-utilities/monocrystalline-vs-polycrystalline-which-solar-panels-are-right-for-you/> [Posjećeno 10.9.2024.]

[12] H. Glavaš, M. Žnidarec, D. Šljivac, N. Veić, Application of Infrared Thermography in an Adequate Reusability Analysis of Photovoltaic Modules Affected by Hail, Applied Sciences, vol. 12, čl. 745, 2022.

[13] H. Häberlin, Photovoltaics: System Design and Practice, John Wiley & Sons, Chichester, 2012

[14] EurotestPV MI 3108: Instruction manual, Metrel, 2013.



## SAŽETAK

U ovom diplomskom radu analiziran je utjecaj degradacije fotonaponskih modula na performanse fotonaponskih elektrana. U prvom dijelu rada, kroz teorijsku podlogu, obrađeni su procesi povezani s fotonaponskim sustavima, poput pretvorbe sunčeve energije u električnu, karakteristike modula te uzroci degradacije. Drugi dio rada obuhvaća eksperimentalnu analizu dvaju različitih modula ET-M572200WW i BISOL BMU-250 i njihove performanse kroz deset godina. Rezultati pokazuju da je degradacija modula značajno utjecala na nazivnu snagu, ali se pravilnim održavanjem može smanjiti. Simulacije pomoću PV\*SOL premium softvera dodatno su potvrdile ove rezultate, naglašavajući važnost kvalitete modula i okoline u kojoj su postavljeni.

## **ABSTRACT**

This thesis analyzes the impact of photovoltaic (PV) module degradation on the performance of solar power plants. The first part of the thesis provides a theoretical overview of photovoltaic systems, including the conversion of solar energy to electricity, module characteristics, and degradation causes. The second part presents an experimental analysis of two different modules ET-M572200WW and BISOL BMU-250 over a ten-year period. The results indicate that degradation significantly affects module efficiency but can be mitigated with proper maintenance. Simulations using PV\*SOL premium software further confirmed these findings, emphasizing the importance of module quality and the environmental conditions of installation.

## **ŽIVOTOPIS**

Matej Dukić rođen je 20.8.2000. godine u Požegi. Osnovnu školu pohađao je u Područnoj školi Bučje i Osnovnoj školi fra Kaje Adžića Pleternica. Od 2015. do 2019. godine školuje se za zvanje Tehničar za elektroenergetiku u Tehničkoj školi Požega. Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija upisuje 2019. godine, te završava preddiplomski studij Elektrotehnike i informacijskih tehnologija 2022. godine. Iste godine upisuje diplomski studij Održiva elektroenergetika.

---

Potpis autora