

# Utjecaj zasjenjenja na performanse fotonaponskih ćelija

---

**Bungić, Toni**

**Undergraduate thesis / Završni 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:200:052899>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-04**

*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 prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija**

**Utjecaj zasjenjenja na performanse fotonaponskih ćelija**

**Završni rad**

**Toni Bungić**

**Osijek, 2024.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac Z1P: Obrazac za ocjenu završnog rada na sveučilišnom prijediplomskom studiju****Ocjena završnog rada na sveučilišnom prijediplomskom studiju**

<b>Ime i prezime pristupnika:</b>	Toni Bungić
<b>Studij, smjer:</b>	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. pristupnika, god.</b>	4936, 27.07.2021.
<b>JMBAG:</b>	0165088605
<b>Mentor:</b>	prof. dr. sc. Damir Šljivac
<b>Sumentor:</b>	dr. sc. Matej Žnidarec
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Naslov završnog rada:</b>	Utjecaj zasjenjenja na performanse fotonaponskih ćelija
<b>Znanstvena grana završnog rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak završnog rada:</b>	Utjecaj zasjenjenja na performanse fotonaponskih ćelija Opis teme: Opisati princip pretvorbe energije sunčevog zračenja u električnu pomoću fotonaponskih ćelija i utjecaja zasjenjenja na njihove performanse. Napraviti pregled literature modeliranja utjecaja zasjenjenja na performanse fotonaponskih ćelija. Ispitati utjecaj zasjenjenja na performanse fotonaponskih modula i analizirati rezultate mjerenja. Sumentor voditelj, dr.sc. Matej Žnidarec Tema za studenta: Toni Bungić
<b>Datum prijedloga ocjene završnog rada od strane mentora:</b>	12.09.2024.
<b>Prijedlog ocjene završnog rada od strane mentora:</b>	Izvrstan (5)
<b>Datum potvrde ocjene završnog rada od strane Odbora:</b>	25.09.2024.
<b>Ocjena završnog rada nakon obrane:</b>	Izvrstan (5)
<b>Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije završnog rada čime je pristupnik završio sveučilišni prijediplomski studij:</b>	26.09.2024.

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

Osijek, 26.09.2024.

Ime i prezime Pristupnika:	Toni Bungić
Studij:	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	4936, 27.07.2021.
Turnitin podudaranje [%]:	7

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Utjecaj zasjenjenja na performanse fotonaponskih ćelija**

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>
1.1.    Zadatak završnog rada .....	1
<b>2. PREGLED PODRUČJA TEME.....</b>	<b>2</b>
3.1. Sunčevo zračenje.....	4
3.2. Karakteristike Sunca.....	4
3.3. Elektromagnetsko zračenje i komponente Sunčevog zračenja.....	5
3.3.1. Izravno Sunčevo zračenje.....	5
3.3.2. Difuzno Sunčevo zračenje.....	5
3.3.3. Reflektirajuće Sunčevo zračenje.....	6
3.4. Kut upada Sunčevih zraka.....	7
3.5. Prirodno zasjenjenje.....	9
<b>4. FOTONAPONSKI SUSTAVI.....</b>	<b>11</b>
4.1. Fotonaponske ćelije .....	11
4.2. Fotonaponski efekt .....	11
4.3. Izravna pretvorba Sunčevog zračenja u električnu energiju .....	12
4.4. Tehnološki pravci FN ćelija .....	13
4.5. Model fotonaponske ćelije.....	17
3.6. Karakteristika fotonaponske ćelije .....	18
<b>5. ZASJENJENJE FOTONAPONSKIH SUSTAVA .....</b>	<b>20</b>
5.1. Utjecaj zasjenjenja na performanse.....	20
5.2. Zaobilazne (bypass) diode.....	21
5.3. Blokirajuće diode.....	23
<b>6. ISPITIVANJE I ANALIZA UTJECAJA ZASJENJENJA NA PERFORMANSE FOTONAPONSKIH MODULA.....</b>	<b>24</b>
6.1. Karakteristike FN modula.....	25

<b>6.2. Korišteni uređaji i mjerna metoda.....</b>	<b>27</b>
<b>6.3. Rezultati simulacije zasjenjenja za modul Panasonic VBHN240SE107 .....</b>	<b>30</b>
6.3.1. Izmjerene vrijednosti za modul Panasonic VBHN240SE107 .....	30
6.3.2. Zasjenjenje 2 ćelije FN modula .....	31
6.3.3. Zasjenjenje 1. reda .....	Error! Bookmark not defined.
6.3.4. Zasjenjenje desnog stupca FN modula .....	33
6.3.5. Zasjenjenje uzrokovano pticama .....	34
6.3.6. Usporedba dobivenih vrijednosti modula prilikom zasjenjenja .....	35
<b>6.4. Izmjerene vrijednosti za Solar Frontier SF-150.....</b>	<b>37</b>
6.4.1. Osnovne izmjerene vrijednosti.....	37
6.4.2. Zasjenjenje 1. reda modula Solar Frontier .....	37
6.4.3. Zasjenjenje 1. Stupca .....	38
6.4.4. Zasjenjenje 2 ćelije.....	39
6.4.5. Zasjenjenje uzrokovano pticama .....	40
6.4.6. Usporedba dobivenih rezultata za modul Solar Frontier pri različitim uvjetima zasjenjenja .....	40
<b>LITERATURA .....</b>	<b>44</b>
<b>SAŽETAK.....</b>	<b>46</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>47</b>
<b>ŽIVOTOPIS.....</b>	<b>48</b>

# 1. UVOD

Zagađenje okoliša je problem koji sve više dobiva na važnosti kako shvaćamo ozbiljnost njegovog utjecaja na naš planet. Korištenje fosilnih goriva za proizvodnju energije doprinosi emisiji velike količine štetnih plinova poput ugljičnog dioksida, dušikovih oksida i sumporovih dioksida. Ovi plinovi zatim zagađuju zrak, vodu i tlo, te negativno utječu na zdravlje ljudi, životinjski svijet i ekosustave. U tom kontekstu, prijelaz na obnovljive izvore energije postaje ne samo nužan, već i ključan za zaštitu okoliša i suzbijanje klimatskih promjena. Sunčeva energija predstavlja jedan od najperspektivnijih obnovljivih izvora energije. Svake minute Sunce na Zemlju šalje dovoljno energije da zadovolji naše globalne potrebe za električnom energijom tijekom cijele godine. Fotonaponska tehnologija omogućava pretvaranje ove velike količine energije iz Sunca u električnu energiju koju možemo koristiti u našim domovima, tvornicama, uredima i drugim objektima. Ova tehnologija sve više napreduje i postaje sve dostupnija, što omogućava širenje korištenja fotonaponskih modula diljem svijeta. Jedna od najvećih prednosti fotonaponske pretvorbe je njezina čistoća. Proces pretvorbe sunčeve energije u električnu energiju je ekološki prihvatljiv i ne stvara otpadne proizvode koji bi negativno utjecali na okoliš. Nadalje, ulaganje u fotonaponsku energiju ne samo da smanjuje ovisnost o fosilnim gorivima, već također smanjuje i troškove energije na dugoročnoj razini. Iako je inicijalna investicija u solarnu opremu možda veća, dugoročno se isplati kroz manje račune za električnu energiju i potencijalne subvencije ili poticaje koje nude mnoge vlade i organizacije za podršku obnovljivim izvorima energije. U konačnici, fotonaponska pretvorba ima ključnu ulogu u tranziciji prema održivom energetsom modelu koji je neophodan za zaštitu okoliša i osiguranje održive budućnosti za sve nas.

## 1.1. Zadatak završnog rada

Ovaj rad istražuje utjecaj zasjenjenja na performanse fotonaponskih modula. Počevši s opisom principa pretvorbe sunčeve energije u električnu energiju pomoću fotonaponskih modula, analizira se kako zasjenjenje može utjecati na njihovu učinkovitost. Kroz pregled relevantne literature, istražuju se modeli koji se koriste za predviđanje utjecaja zasjenjenja na performanse fotonaponskih modula. Nakon provedenih mjerenja, provodi se analiza rezultata mjerenja kako bi se razumio stvarni utjecaj zasjenjenja na performanse fotonaponskih modula.

## 2. PREGLED PODRUČJA TEME

Ukupni globalno instalirani kapacitet fotonaponskih sustava procijenjen je na otprilike 303 GW na kraju 2016. godine, a do kraja 2017. dosegao je gotovo 400 GW. Cijene fotonaponskih (FN) modula i sustava ponovno su značajno pale, potaknute prekapacitetima u industriji, ali i izuzetno konkurentnim natjecajima na svim kontinentima [1]. Instalirani kapacitet fotonaponskih sustava raste eksponencijalnom brzinom širom svijeta jer ima potencijal zadovoljiti sve veću potražnju za energijom i istovremeno ublažiti klimatsku krizu. Kontinuirana ulaganja u ovaj energetski sektor tijekom posljednja dva desetljeća omogućila su istraživačima da uvedu inovacije u svim povezanim aspektima, uključujući povećanje učinkovitosti ćelija, optimizaciju proizvodnih procesa, izgradnju javnog mnijenja i financiranje projekata. Cijena FN sustava smanjila se za više od 50% u pet godina, što podržava analize tržišta koje predviđaju da bi fotonaponske instalacije mogle dostići 25% ukupne proizvodnje energije do 2050. godine [2]. Ova poboljšanja učinila su FN tehnologiju najpovoljnijom energetskom tehnologijom na globalnoj razini. Među različitim nekonvencionalnim izvorima energije, fotonaponska energija je obilan i čist alternativni izvor za proizvodnju električne energije. Ona pruža brojne prednosti, poput besplatnog goriva, fleksibilnosti u smislu proizvodnje i potreba, niskih troškova rada, itd [3]. Proizvodnja električne energije pomoću ove tehnologije može doprinijeti smanjenju zagađenja okoliša, kao i smanjenju potrošnje konvencionalnih goriva. Sunčevo zračenje, atmosferska temperatura, konfiguracija niza i zasjenjenje zbog okolnih objekata utječu na performanse FN sustava. Trenutno ili konstantno zasjenjenje panela zbog prolaznog oblaka ili susjednih objekata ne samo da uzrokuje gubitak energije u procesu pretvorbe, već također stvara nelinearnost u  $I-U$  karakteristikama  $P-U$  sustava [4]. Fotonaponska tehnologija još uvijek ima neke nedostatke koji sprječavaju sustave da daju maksimalnu moguću izlaznu snagu. Djelomično zasjenjenje je glavni izvor smanjenja snage u fotonaponskim sustavima, gdje se mogu pojaviti dva problema. Prvo, prisutnost sjene na modulu može stvoriti više točki maksimalne snage, od kojih je samo jedna točna točka maksimalne snage. To stvara probleme konvencionalnim sustavima za praćenje maksimalne točke snage (MPPT), čiji algoritmi mogu biti "zarobljeni" na pogrešnoj točki maksimalne snage [5]. Drugi problem koji smanjuje maksimalnu snagu je nesklad snage između serijski povezanih FN modula. Gubici zbog nesklada u nizu mogu se dogoditi kada specifikacije modula variraju ili kada serijski povezani moduli primaju različite razine zračenja [6]. Zasjenjenje fotonaponskih modula ima značajan utjecaj na proizvodnju električne energije. Fotonaponski moduli proizvode energiju pretvaranjem sunčeve svjetlosti u električnu energiju, a svaki oblik zasjenjenja



smanjuje količinu svjetlosti koja dolazi do fotonaponskih ćelija. Ovo može dovesti do pada učinkovitosti panela i smanjenja ukupne proizvodnje energije. Čak i mali dio panela koji je zasjenjen može negativno utjecati na cijeli sustav, budući da su moduli obično povezani u nizove. Zbog toga je važno pravilno postaviti module na otvorene površine kako bi se izbjegle prepreke poput zgrada, drveća ili drugih objekata koji bi mogli izazvati zasjenjenje. U literaturi [7] navodi se kako djelomično ili potpuno zasjenjenje može izazvati drastičan gubitak snage. Što je više modula integrirano u serijski spoj, veća je mogućnost za većim gubitkom snage zbog zasjenjenja. U takvom slučaju nezasjenjeni moduli pomiču svoju radnu točku prema stanju otvorenog strujnog kruga, napon na tim modulima raste a struja teče kroz zaobilazne (bypass) diode prema djelomično ili potpuno zasjenjenom modulu. Kod stvarnih modula, bilo bi nepraktično dodavati zaobilazne diode na svaku solarnu ćeliju, no proizvođači često osiguravaju barem jednu zaobilaznu diodu oko modula kako bi zaštitili nizove, a ponekad i nekoliko takvih dioda oko grupa ćelija unutar modula. Ove diode nemaju velik utjecaj na probleme zasjenjenja pojedinog modula, ali mogu biti vrlo važne kada je nekoliko modula spojeno serijski. Baš kao što su ćelije povezane serijski kako bi se povećao napon modula, tako se moduli mogu povezati serijski kako bi se povećao napon niza. Također, kao što pojedina ćelija može smanjiti struju unutar modula, nekoliko zasjenjenih ćelija u jednom modulu može smanjiti struju koju isporučuje cijeli niz u sklopu niza modula. Prednost već prikazana za zaobilaznu diodu na jednoj ćeliji također vrijedi za diodu postavljenu preko cijelog modula. Zaobilazne diode pomažu da struja zaobiđe zasjenjeni ili neispravni modul unutar niza. To ne samo da poboljšava performanse niza, već također sprječava nastanak vrućih točaka u pojedinačnim zasjenjenim ćelijama. Kada su nizovi modula povezani paralelno, može se pojaviti sličan problem kada jedan od nizova ne radi ispravno. Umjesto da isporučuje struju nizu, neispravan ili zasjenjeni niz može povlačiti struju iz ostatka niza. Postavljanjem blokirajućih dioda (također nazvanih izolacijske diode) na vrh svakog niza može se spriječiti povratna struja koju povlači zasjenjeni niz [8]. Pojava sjene predstavlja ozbiljan problem koji dovodi do značajnih gubitaka u radu fotonaponskih modula i može rezultirati njihovim oštećenjem. Zbog toga se razvijaju različite metode za ublažavanje negativnih učinaka zasjenjenja. Najčešće korištena metoda su zaobilazne diode, koje učinkovito smanjuju gubitke uzrokovane sjenom i sprječavaju oštećenje modula. Međutim, upotreba zaobilaznih dioda nosi sa sobom određena ograničenja, među kojima se ističe promjenjiva I-U karakteristika, koja ovisi o obliku sjene. Zbog tih izazova, ovo područje i dalje ostaje predmet interesa i razvoja, a inženjeri kontinuirano rade na poboljšanju dizajna fotonaponskih modula kako bi se smanjio negativni utjecaj zasjenjenja. [9].

## **3. SUNČEVA ENERGIJA**

### **3.1. Sunčevo zračenje**

Sunce je primarni izvor elektromagnetskog zračenja koje prolazi kroz atmosferu i predstavlja neiscrpan obnovljivi izvor energije. Pruža energiju koja omogućuje život, pokreće atmosferske procese i svojim kretanjima oblikuje vrijeme i klimu. [10]. Sunčevo zračenje igra ključnu ulogu u mnogim procesima na Zemlji, uključujući fotosintezu biljaka, ciklus vode i formiranje atmosferskih fenomena poput oblaka i vjetera. Osim toga, sunčeva energija se sve više koristi kao izvor obnovljive energije za proizvodnju električne energije putem fotonaponskih modula. Iskorištavanje Sunčeve energije predstavlja održiv način proizvodnje električne energije bez emisije štetnih plinova ili drugih onečišćivača. Razvoj tehnologije fotonaponske pretvorbe omogućuje pretvorbu Sunčeve energije izravno u električnu energiju putem fotonaponskih modula čime se pruža čista i obnovljiva alternativa konvencionalnim izvorima energije poput fosilnih goriva. Uz stalna poboljšanja tehnologije i smanjenje troškova, sunčeva energija postaje sve konkurentnija na tržištu energije, potičući prijelaz prema samoodrživom energetsom sustavu. Osim toga, iskorištavanje Sunčeve energije pruža mogućnost stvaranja energetski neovisnih sustava i smanjenja negativnog utjecaja na okoliš, što je ključno za očuvanje našeg planeta za buduće generacije.

### **3.2. Karakteristike Sunca**

Sunce je kugla od jako vruće plinovite tvari promjera  $1,39 \cdot 10^9$  m i prosječno je udaljena od Zemlje  $1,55 \cdot 10^{11}$  m. Gledano sa Zemlje, Sunce se okrene oko svoje osi otprilike jednom u svaka 4 tjedna. Međutim, ne rotira kao čvrsto tijelo; ekvatoru treba oko 27 dana, a polarnim regijama oko 30 dana za svaku rotaciju. Sunce ima efektivnu temperaturu crnog tijela 5777 K. Glavne sastavnice Sunca jesu vodik i helij. U jezgri Sunca, nuklearne reakcije fuzije transformiraju vodik u helij uz oslobađanje značajnih količina energije. Ovaj proces rezultira izuzetno visokim temperaturama, premašujući 20 milijuna Kelvina, u unutrašnjosti Sunca. Međutim, nije temperatura ta koja direktno utječe na elektromagnetska svojstva Sunčevog zračenja. Solarna energija nastaje kao rezultat elektromagnetskog zračenja koje Sunce emitira tijekom termonuklearnih reakcija u svojoj jezgri. Osim nuklearne, energije plime i oseke te geotermalne energije, svi ostali energetski resursi na Zemlji imaju svoje porijeklo u Sunčevoj energiji, bilo izravno ili neizravno. Sunce zrači znatnu energiju na Zemlju. Intenzitet sunčevog zračenja, rijetko veći od  $950 \text{ W/m}^2$ , doveo je do stvaranja mnogih vrsta uređaja za pretvaranje ove energije u korisne oblike, uglavnom toplinu i električnu energiju. Svjetlost

i toplina sunca iskorištavaju se korištenjem niza tehnologija koje se stalno razvijaju kao što su solarno grijanje, fotonaponska pretvorba, solarna arhitektura i umjetna fotosinteza [11].

### **3.3. Elektromagnetsko zračenje i komponente Sunčevog zračenja**

Svi objekti s temperaturom iznad apsolutne nule emitiraju energiju u obliku elektromagnetskog zračenja. To zračenje predstavlja spoj oscilirajućih električnih i magnetskih polja koja se šire kroz prostor u obliku valova, pri čemu ti valovi osciliraju okomito na smjer prijenosa energije.. Svako elektromagnetsko zračenje karakterizira svoja valna duljina i frekvencija, a ove karakteristike određuju kako će zračenje utjecati na različite oblike života na Zemlji. Sunčevo elektromagnetsko zračenje proteže se u spektru valnih duljina od otprilike 0,25 do 5  $\mu\text{m}$ . Sunčevo zračenje koje dolazi do Zemljine površine može se podijeliti na tri glavne komponente: izravnu, difuzijsku i reflektirajuću svjetlost.

#### **3.3.1. Izravno Sunčevo zračenje**

Izravno Sunčevo zračenje predstavlja Sunčevu svjetlost koja putuje direktno s Sunca do Zemljine površine. Ovaj tip zračenja obično ima visok intenzitet i pruža značajnu količinu energije. U kontekstu fotonaponske pretvorbe, izravno Sunčevo zračenje ima ključnu ulogu kao primarni izvor energije koji se koristi za generiranje električne energije. Fotonaponski paneli dizajnirani su tako da apsorbiraju izravno Sunčevo zračenje i pretvaraju ga u električnu energiju pomoću fotoelektričnog efekta. Kada fotoni izravnog Sunčevog zračenja udare u poluvodičke materijale fotonaponskih panela, oni potiču oslobađanje elektrona, stvarajući tok struje. Ovaj proces omogućava konverziju Sunčeve energije izravno u električnu energiju bez emisije štetnih plinova ili stvaranja otpada. Izravno Sunčevo zračenje je stoga ključni izvor energije za fotonaponske sustave i igra presudnu ulogu u njihovoj učinkovitosti i proizvodnji električne energije. Optimalno pozicioniranje fotonaponskih panela kako bi bili izloženi izravnom Sunčevom zračenju i maksimiziranje apsorpcije svjetlosti važni su faktori koji utječu na performanse fotonaponskih sustava. Korištenje izravnog Sunčevog zračenja kao izvora energije omogućuje razvoj održivih i čistih oblika energije te doprinosi smanjenju emisija stakleničkih plinova i očuvanju okoliša.

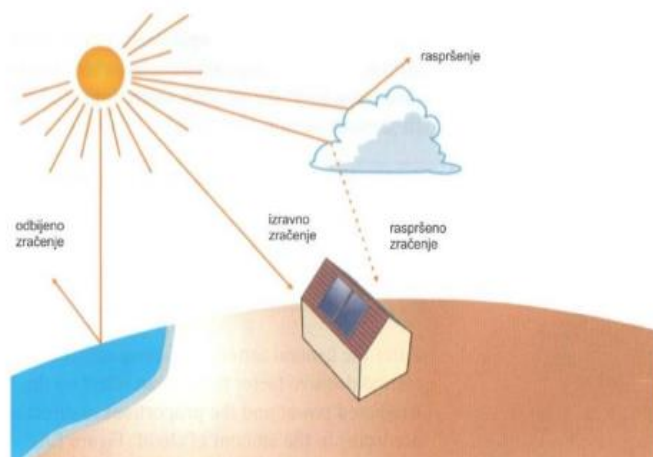
#### **3.3.2. Difuzno Sunčevo zračenje**

Difuzijsko sunčevo zračenje ima važnu ulogu u kontekstu fotonaponske pretvorbe, koja je tehnologija koja koristi Sunčevu svjetlost za proizvodnju električne energije. Iako fotonaponski sustavi najučinkovitije rade kada su izloženi izravnom sunčevom zračenju, oni također mogu koristiti difuzno

svjetlo za proizvodnju električne energije. Čestice difuznog svjetla koje prodiru kroz atmosferu Zemlje padaju na površinu fotonaponskih panela i potiču oslobađanje elektrona u poluvodičkim materijalima, što rezultira proizvodnjom električne energije. Iako je intenzitet difuznog svjetla manji u usporedbi s izravnim sunčevim zračenjem, fotonaponski sustavi su dizajnirani da učinkovito koriste difuzno svjetlo za proizvodnju električne energije. Dakle, difuzijsko sunčevo zračenje ima važnu ulogu u podržavanju kontinuirane proizvodnje električne energije putem fotonaponskih sustava, čime pridonosi razvoju održive i čiste energije. Integracija fotonaponske tehnologije s difuznim sunčevim zračenjem omogućuje proizvodnju električne energije čak i u oblačnim ili mutnim uvjetima, što doprinosi stabilnosti i pouzdanosti obnovljivih izvora energije.

### **3.3.3. Reflektirajuće Sunčevo zračenje**

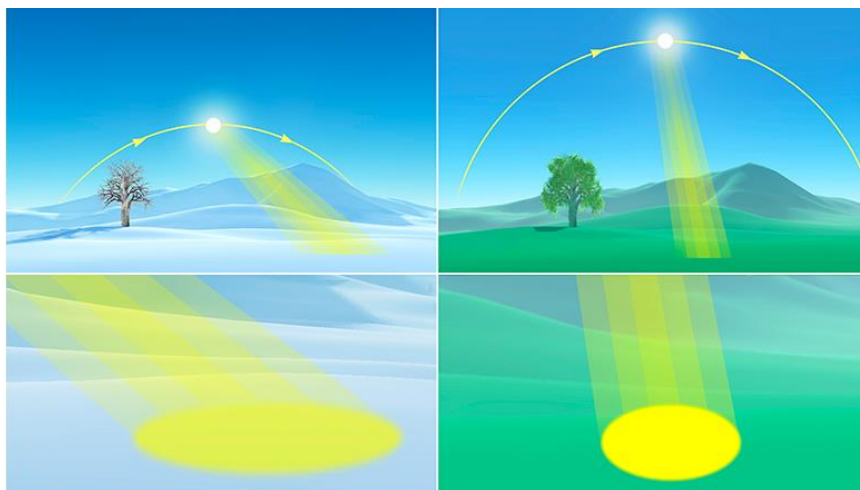
Na slici 3.1. najbolje se može prikazati reflektirajuća svjetlost budući da se ona vraća prema izvoru svjetlosti, kameri ili oku promatrača. Reflektirajuća (odbijena) svjetlost predstavlja fenomen u kojem se svjetlost odbija od površine, umjesto da prolazi kroz nju. Ova pojava često se javlja kada svjetlost udari na glatku ili sjajnu površinu poput ogledala ili stakla. Reflektirajuća svjetlost može biti korisna u kontekstu fotonaponske pretvorbe, tehnologije koja pretvara Sunčevu svjetlost u električnu energiju. Kada Sunčeva svjetlost udari na reflektirajuću površinu, poput solarnih ogledala ili reflektirajućih fotonaponskih modula, umjesto da se apsorbira, ona se odbija natrag. Ove reflektirane zrake mogu se usmjeriti prema fotonaponskim modulima, što povećava količinu svjetlosti koja dopire do njih i potiče veću proizvodnju električne energije. Osim toga, reflektirajuća svjetlost može se koristiti i za poboljšanje učinkovitosti solarnih sustava. Integracija reflektirajućih površina ili ogledala oko fotonaponskih modula može povećati količinu svjetlosti koja dopijeva do panela, posebno u područjima s manje sunčeve svjetlosti ili tijekom oblačnih dana. Stoga, reflektirajuća svjetlost ima značajnu ulogu u optimizaciji fotonaponske pretvorbe, pružajući dodatnu svjetlost i potičući veću proizvodnju električne energije. Korištenje reflektirajućih površina u solarnim sustavima može poboljšati učinkovitost i iskoristivost Sunčeve energije, doprinoseći tako široj implementaciji održivih i čistih izvora energije.



Slika 3.1. Sunčevo zračenje [12]

### 3.4. Kut upada Sunčevih zraka

Iako je uobičajeno pretpostaviti da je ljeti Zemlja bliže Suncu, u stvarnosti je to drugačije. Promjene godišnjih doba rezultat su nagiba Zemljine osi u odnosu na ravninu ekliptike koja se može definirati kao zamišljena elipsa kojom Zemlja kruži oko Sunca. Dok Zemlja obilazi oko Sunca, ta se nagnutost mijenja, što rezultira promjenom kuta pod kojim Sunčeve zrake padaju na različita mjesta na Zemlji. Ova promjena kuta upada ima značajan utjecaj na količinu i distribuciju Sunčeve energije koja doseže Zemlju, što izravno utječe na vremenske uvjete i klimatske obrasce na našem planetu. Tijekom zimskih mjeseci, Sunčeve zrake padaju na sjevernu hemisferu pod oštrijim kutom, što rezultira manjim intenzitetom i kraćim trajanjem sunčeve svjetlosti. To dovodi do hladnijih temperatura i kraćih dana. S druge strane, ljeti je Zemljina sjeverna hemisfera nagnuta prema Suncu što rezultira većim kutom upada sunčevih zraka. To dovodi do većeg intenziteta i dužeg trajanja Sunčeve svjetlosti, što uzrokuje više temperature i duže dane. Slikom 3.2. prikazana je promjena kuta upada Sunčevih zraka prilikom različitih godišnjih doba.



Slika 3.2. Kut upada Sunčeve svjetlosti [13]

Kada su Sunčeve zrake okomite na apsorpcijsku površinu, zračenje koje pada na tu površinu ima najveću moguću gustoću snage. Kako se kut između Sunca i upijajuće površine mijenja, intenzitet svjetlosti na površini se smanjuje. Kada je površina paralelna sa Sunčevim zrakama intenzitet svjetlosti pada na nulu jer svjetlost ne pada na površinu. Za srednje kutove relativna gustoća snage je  $\cos \vartheta$ , a  $\vartheta$  kut između Sunčevih zraka i okomice na površinu. Zračenje koje apsorbira može se pronaći množenjem ukupnog zračenja s  $\cos \vartheta$  što je prikazano izrazom (2-1).

$$I_i = I_t \cdot \cos \vartheta \quad (2-1)$$

$I_i$  – zračenje koje apsorbira površina [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$I_t$  – ukupno Sunčevo zračenje [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$\vartheta$  – upadni kut [ $^\circ$ ]

Stoga pod vršnim uvjetima Sunčeve svjetlosti ( $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ ) ako kut Sunčevih zraka pada na površinu pod kutom  $15^\circ$  od okomice, zračenje koje apsorbira površina može se prikazati izrazom (2-2) :

$$I_i = 1000 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \cos (15^\circ) \approx 966 \text{ W}/\text{m}^2 \quad (2-2) \quad [14]$$

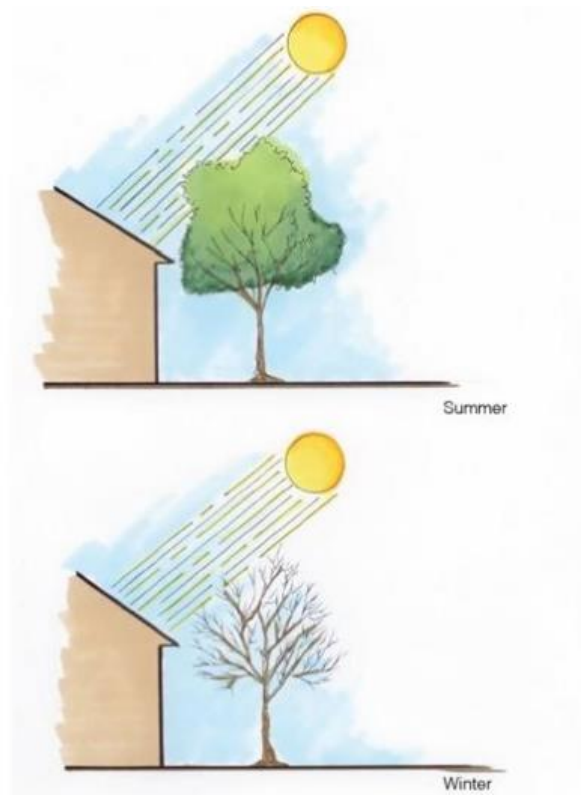
U konačnici, ovo ima smisla jer je upadni kut  $0^\circ$  a Sunčeva svjetlost izravno je usmjerena na apsorpcijsku površinu i  $\cos(0^\circ) = 1$  što bi značilo da 100 % Sunčevog zračenja apsorbira površina.

Slično tome, kada je upadni kut  $90^\circ$ , a budući da je  $\cos(90^\circ) = 0$  površina neće apsorbirati zračenje. U gore navedenom primjeru  $\cos(15^\circ) = 0.966$  pa površina apsorbira 96.6 % Sunčeve energije.

Iz tog razloga u projektiranju fotonaponskih sustava vrlo je važno pitanje koliko Sunčevog zračenja apsorbiraju fotonaponski moduli jer je količina energije koju sustav može proizvesti izravno proporcionalna količini energije koju sustav apsorbira od Sunca.

### **3.5. Prirodno zasjenjenje**

Dok toplina Sunca daje važan doprinos pri pokrivanju toplinskih potreba zimi, bitan aspekt zaštite od pregrijavanja ljeti je razumno uređeno sjenčanje za zaštitu od visokih temperatura u zatvorenom prostoru. Zbog toga je potrebno zasjenjenje planirati tako da u hladnijoj polovici godine Sunčeve zrake kroz stakla što dublje i duže dopiru u unutrašnjost građevine, dok u toplijoj polovici godine prolaz istih treba biti kontroliran i smanjen. Prirodna kontrola svjetlosti najčešće se uspostavlja kroz stabla i oblake. Slikom 3.3. veoma je jasno prikazan utjecaj stabala na zasjenjenje u različitim periodima godine. Oni stvaraju sjenovito područje ispod objekta ili strukture što rezultira smanjenjem osvjjetljenja na tom mjestu. Prirodno zasjenjenje može imati različite učinke ovisno o kontekstu. Na primjer, u urbanom okruženju, zasjenjenje može pružiti olakšanje od jakog sunca i topline, stvarajući ugodnije okruženje za boravak na otvorenom. Prirodno zasjenjenje također igra važnu ulogu u postavljanju fotonaponskih modula jer može utjecati na njihovu učinkovitost i performanse. Ako su fotonaponski moduli prekriveni sjenom oblaka ili drveća to može smanjiti njihovu sposobnost proizvodnje električne energije. Shodno tome dolazi do pada učinkovitosti fotonaponskih modula i smanjenja proizvodnje električne energije. Stoga je važno pažljivo planirati postavljanje fotonaponskih modula kako bi se maksimalno iskoristila sunčeva svjetlost, minimizirajući učinke prirodnog zasjenjenja. To može uključivati postavljanje modula na lokacijama s minimalnom sjenom tijekom dana, kao i korištenje mehanizama poput praćenja sunca kako bi se moduli optimalno usmjerili prema izvoru svjetlosti tijekom dana. Također, treba uzeti u obzir prethodno navedene sezonske promjene u kutu Sunčeve svjetlosti tijekom godine kako bi se osiguralo da moduli imaju adekvatan pristup Sunčevoj energiji tijekom cijele godine, čak i uz promjene u prirodnom zasjenjenju. Integriranje fotonaponskih modula u prostor s obzirom na prirodno zasjenjenje može pomoći u maksimiziranju njihove učinkovitosti i dugoročne koristi.



Slika 3.3. Utjecaj stabala na zasjenjenje ljeti i zimi [15]



## **4. FOTONAPONSKI SUSTAVI**

### **4.1. Fotonaponske ćelije**

Prvu silicijevu fotonaponsku ćeliju otkrio je Russel Ohl 1941. godine, ali njezina učinkovitost pretvorbe bila je manja od 1%. Godine 1954., tim istraživača iz Bell Laboratories u New Yorku (Pearson, Fuller i Chapin) proizveo je silicijevu ćeliju s djelotvornošću od 6% te prvi fotonaponski modul poznat kao Bellova solarna baterija. Zbog visokih troškova proizvodnje, prve fotonaponske ćelije našle su svoju prvu komercijalnu primjenu 1958. godine u svemirskim istraživanjima, gdje je njihova cijena bila opravdana s obzirom na ukupne visoke troškove misija. Tek s naftnom krizom 70-ih godina prošlog stoljeća, ove su tehnologije postale važnije na Zemlji, kada je postalo jasno da zalihe fosilnih goriva nisu neograničene, što je potaknulo potragu i razvoj novih, obnovljivih izvora energije. [10]. Kroz godine istraživanja i tehnološkog napretka, fotonaponske ćelije su postale sve učinkovitije i ekonomičnije. Ključni napredak bio je razvoj tankoslojnih fotonaponskih tehnologija koje koriste manje materijala i omogućavaju veću fleksibilnost u dizajnu. Nadalje, tehnološki napredak omogućio je masovnu proizvodnju fotonaponskih ćelija, što je rezultiralo značajnim padom cijena solarnih sustava i njihovom širom dostupnošću diljem svijeta. Ova demokratizacija fotonaponskih tehnologija promijenila je način na koji se energija proizvodi i distribuira, otvarajući vrata održivijoj budućnosti.

### **4.2. Fotonaponski efekt**

Fotonaponski efekt otkrio je Edmond Becquerel 1839. godine. Opisao ga je kao proizvodnju električne struje kada se dvije ploče od platine ili zlata urone u kiselu, neutralnu ili lužnatu otopinu te budu nejednoliko izložene Sunčevom zračenju [10]. Ovaj fenomen čini osnovu rada fotonaponskih ćelija, koje pretvaraju sunčevu svjetlost u električnu energiju. Kada fotoni svjetlosti udare u površinu materijala, mogu pobuditi elektrone, koji se oslobađaju iz svojih atoma i počinju teći kao električna struja. Kada fotoni svjetlosti udare u površinu materijala, mogu pobuditi elektrone, uzrokujući da se oslobode svojih atoma i poteku kao električna struja. Ovaj proces je temeljni princip koji stoji iza proizvodnje solarne energije. Fotonaponski efekt revolucionirao je način na koji se proizvodi električna energija, nudeći čistu i obnovljivu alternativu tradicionalnoj proizvodnji električne energije temeljenoj na fosilnim gorivima. Fotonaponski moduli, koji se sastoje od međusobno povezanih fotonaponskih ćelija, koriste se za iskorištavanje fotonaponskog učinka i pretvaranje sunčeve svjetlosti u električnu energiju za stambene, komercijalne i industrijske primjene. Široka primjena

solarne energije također je dovela do razvoja sustava izvan mreže, prijenosnih solarnih punjača i vozila na solarni pogon, dodatno demonstrirajući svestranost i potencijal fotonaponskog učinka.

### 4.3. Izravna pretvorba Sunčevog zračenja u električnu energiju

Kada fotonaponska ćelija primi svjetlost, odnosno apsorbira Sunčevo zračenje, fotonaponski efekt stvara napon na njenim krajevima, čime ćelija postaje izvor električne energije. Sunčevo zračenje se može promatrati kao snop čestica, tj. fotona, koji doprinose ovom procesu. Energija fotona dana je izrazom (3-1) [10]:

$$E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c_0}{\lambda} \quad (3-1)$$

gdje je:

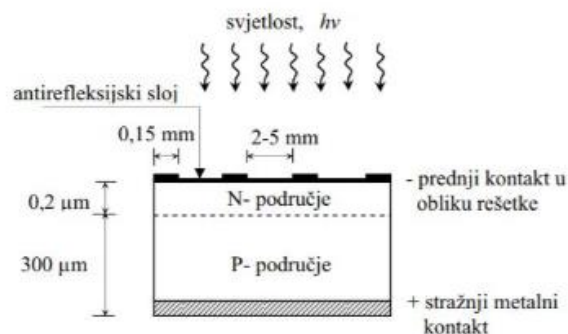
$h$  - Planckova konstanta ( $6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ )

$\nu$  - frekvencija promatranoga elektromagnetskoga zračenja,  $1/s$

$c_0$  - brzina svjetlosti, ( $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ )

$\lambda$  - valna duljina,  $\mu\text{m}$

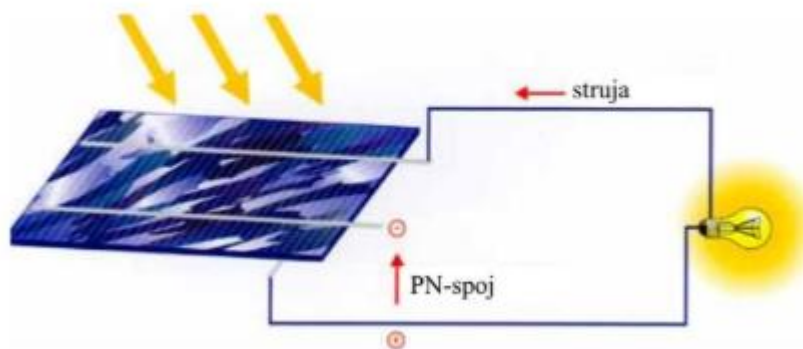
Slikom 4.1. Apsorpcija sunčevog zračenja u solarnoj ćeliji prikazana je na sljedeći način: na prednjoj površini pločice, koja je p-tipa, difundirane su primjese poput fosfora, stvarajući područje n-tipa poluvodiča. Gornju stranu ćelije pokriva metalna rešetka koja zauzima manje od 5% površine, dok se donja strana sastoji od metalnog kontakta. Kako bi se povećala učinkovitost ćelije, površina je premazana antirefleksijskim slojem koji smanjuje refleksiju sunčeve svjetlosti.



Slika 4.1. Silicijeva fotonaponska ćelija [10]

Kada je fotonaponska ćelija izložena svjetlu, fotoni se apsorbiraju i stvaraju parove elektrona i šupljina. Neki fotoni se reflektiraju ili prolaze kroz ćeliju bez ikakve interakcije. Elektroni i šupljine koji se generiraju razdvajaju se u osiromašenom području PN-spoja: elektroni migriraju prema N-području, dok šupljine prelaze prema P-području. Zbog akumulacije elektrona i šupljina na suprotnim stranama PN-spoja, stvara se elektromotorna sila na krajevima fotonaponske ćelije.

Na slici 4.2. prikazano je kako su priključeni potrošači između metalne rešetke na gornjoj strani i metalnog kontakta na donjoj strani pločice, što omogućuje stvaranje elektromotorne sile prilikom apsorpcije sunčeve svjetlosti. Budući da fotonaponska ćelija djeluje kao poluvodička dioda, ona propušta struju samo u jednom smjeru. U tom režimu rada, ćelije generiraju istosmjerni napon u rasponu od 0,5 V do 0,7 V, dok je gustoća struje nekoliko desetaka  $mA/cm^2$  [12].



Slika 4.2. Spajanje fotonaponske ćelije i trošila [10]

#### 4.4. Tehnološki pravci FN ćelija

Razvoj fotonaponskih tehnologija obuhvaća različite pravce istraživanja i inovacija usmjerene na poboljšanje učinkovitosti, smanjenje troškova proizvodnje i proširenje primjene solarnih sustava. Glavni tehnološki pravci u razvoju fotonaponskih ćelija uključuju:

##### a) Monokristalni i polikristalni Silicij

Silicij je dominantan materijal u fotonaponskoj industriji zbog svoje stabilnosti, pouzdanosti i široko dostupnih resursa. Razvoj novih tehnologija za proizvodnju tankih slojeva silicija, kao i poboljšanja u procesima proizvodnje, omogućavaju postizanje veće učinkovitosti i smanjenje

troškova ovih ćelija. Površina fotonaponskih ćelija, izrađenih od monokristalnog silicija, obično se kreće od 5 do 10 cm, dok im debljina varira između 0,2 i 0,3 mm. Elektromotorna sila ovih ćelija kreće se u rasponu od 0,55 do 0,7 V, dok je njihova učinkovitost između 12,5% i 28%, s teoretskom učinkovitošću od 16% do 25%. Glavni nedostatak monokristalnih fotonaponskih ćelija je visoka proizvodna cijena zbog složenog tehnološkog procesa. Poseban izazov predstavlja i trajnost ovih fotonaponskih ćelija pod utjecajem atmosferskih uvjeta poput kiše, snijega ili tuče. Međutim, tehnološki napredak u proizvodnji doveo je do smanjenja cijene ovih ćelija. Na slici 4.3. mogu se vidjeti 3 različite vrste Silicijevih fotonaponskih ćelija.

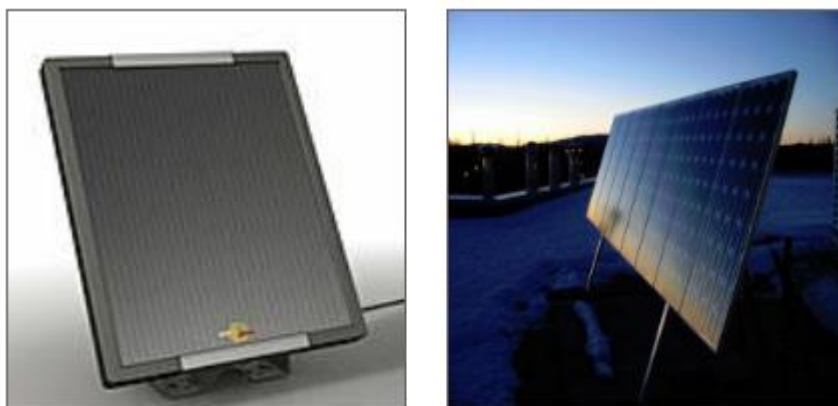


Slika 4.3. monokristalni Silicij, polikristalni Silicij, amorfni Silicij [16]

#### **b) Tankoslojne fotonaponske ćelije**

Radi smanjenja cijene proizvodnje osmišljena je upravo tanka – film tehnologija. Izgled i format ovih ćelija prikazani su fotografijom 4.4. Prednosti ove tehnologije su što se ističu svojom svestranošću, omogućujući njihovo korištenje na različitim površinama poput metala, plastike pa čak i papira. Ova fleksibilnost otvara vrata za razne primjene, uključujući krovne površine gdje se mogu integrirati bez narušavanja estetike ili strukturne stabilnosti. Nadalje, ove ćelije su znatno fleksibilnije od krutih fotonaponskih ćelija prve generacije, što dodatno proširuje njihovu primjenu i olakšava integraciju u različite sustave. Njihova dobra izvedba pri visokim temperaturama čini ih pouzdanim izborom u područjima gdje su ekstremne temperature česte. Osim toga, ove ćelije su zastupljene na specijaliziranim tržištima poput proizvodnje džepnih računala, gdje se njihova fleksibilnost i svestranost mogu iskoristiti za integraciju u kompaktne i mobilne uređaje. Ova tehnologija, dakako, ima i svoje nedostatke od kojih je najizraženiji manjak učinkovitosti koji se proteže od 10 do 20 % te upravo ovaj

nedostatak čini navedenu tehnologiju manje konkurentnom na tržištu. Niska učinkovitost rezultira većim ukupnim troškovima, budući da za postizanje iste proizvodnje potrebno je ugraditi dvostruko više solarnih panela. Osim toga, troškovi ugradnje su približno jednaki, što dovodi do povećanja ukupnog troška instalacije. Dugovječnost ovih tehnologija također predstavlja izazov, s obzirom na to da su još uvijek relativno nove i nije potpuno jasno kako će se ponašati tijekom dugoročnog korištenja. Iako bi trebale trajati kao i polikristalini fotonaponski moduli postoji opravdana zabrinutost zbog nedostatka dugoročnih podataka. Toksikološki problemi također su važan aspekt ovih tehnologija, posebno zbog upotrebe kadmija, koji je izrazito toksičan. Iako se korištenje ovih materijala na krovovima obiteljskih kuća ne smatra opasnim, veći projekti dugoročno mogu predstavljati ozbiljan problem za okoliš i zdravlje ljudi. Sve ove nedostatke treba pažljivo uzeti u obzir prilikom razmatranja upotrebe ovih fotonaponskih tehnologija u konkretnim aplikacijama [17].

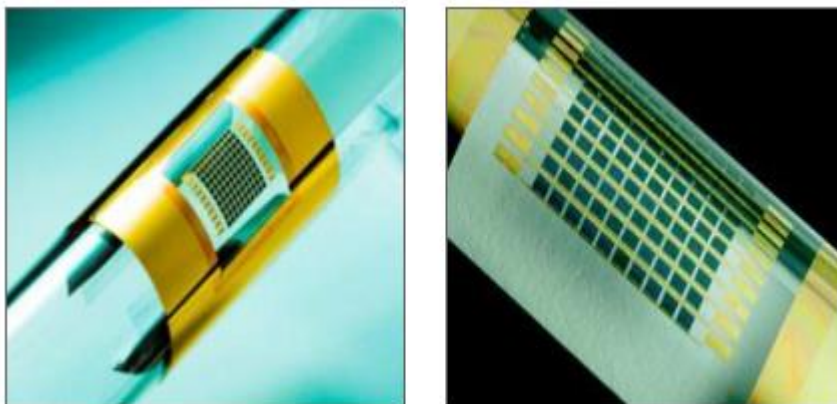


Slika 4.4. Tankoslojne FN ćelije [16]

### c) Galij – Arsenid fotonaponske ćelije

Fotonaponske ćelije koje se izrađuju od galij-arsenida napravljene su kao tanki filmovi, koji se mogu sastojati od jedne komponente (GaAs) ili dviju komponenti (GaAs + Cu<sub>2</sub>S). Očekuje se da će takve ćelije biti izuzetno učinkovite, s teorijskom učinkovitosti od 25 do 40%. Međutim, ostvarena učinkovitost trenutno je u rasponu od 11 do 13%. Glavni izazov u širenju ove tehnologije je visoka cijena proizvodnje [11]. Fullsuns tvrdi da njihova tehnologija fotonaponskih ćelija od galij-arsenida postiže visoku stopu konverzije, s trenutnom maksimalnom stopom od 31,6%, koju je Nacionalni laboratorij za obnovljivu

energiju prepoznao kao vodeću u svijetu. Njihovi planovi predviđaju daljnji rast stope konverzije do 38% do 2020. i 42% do 2025. Osim visoke učinkovitosti, ove ćelije imaju prednost u fleksibilnosti, maloj masi i mogućnosti prilagodbe boje i oblika, što ih čini pogodnima za razne primjene, uključujući automobile. Također, imaju bolju otpornost na visoke temperature i bolju sposobnost generiranja električne energije u uvjetima slabog osvjetljenja u usporedbi s tradicionalnim silicijskim ćelijama. Istraživanje fotonaponskih ćelija od galij-arsenida suočava se s nekoliko izazova, posebno visokom cijenom proizvodnje. Epitaksijalna tehnologija za izradu Galij - Arsenidnih ćelija zahtijeva posebne procese i skupu opremu, a cijena sirovina poput Galija je visoka. Osim toga, Galij - Arsenidne ćelije imaju problem s prigušenjem, što rezultira smanjenjem učinkovitosti, a posebno su osjetljive na toplinske učinke. Stoga, iako su ove ćelije visoko učinkovite u visokim temperaturnim uvjetima i koriste se u zrakoplovstvu, njihova visoka cijena i problemi s prigušenjem predstavljaju izazove u njihovoj široj primjeni [18]. Slika 4.5. prikazuje Galij – arsenid fotonaponske ćelije.

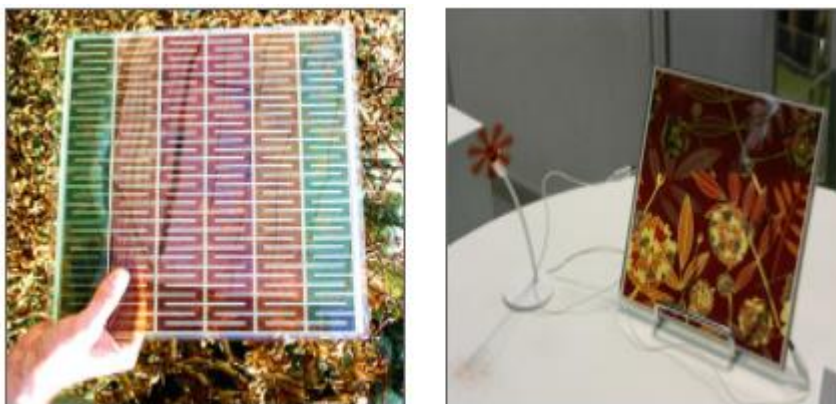


Slika 4.5. Galij – Arsenid fotonaponske ćelije [16]

#### d) Nove tehnologije izrade FN ćelija

„Dye“ (obojane) i organske ćelije nude nižu cijenu, ali imaju manju učinkovitost. Trenutna istraživanja fokusiraju se na tehnologije poput „vrućih elektrona“, nanostrukture, kvantnih izvora i dvosmjernih pretvorbi, a u cilju im je povećanje učinkovitosti na razinu od 30 do

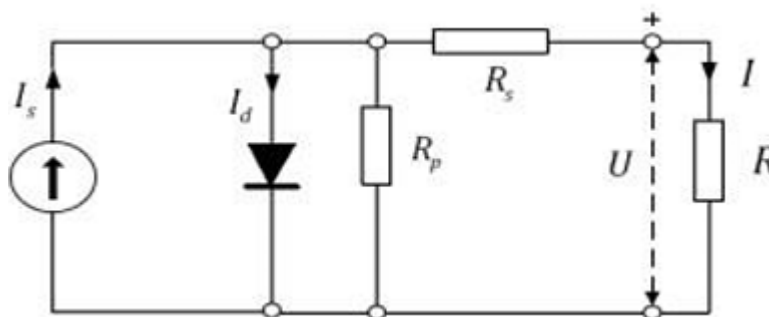
60%. [16]. Prednosti ovih ćelija uključuju fleksibilnost, malu težinu, prozirnost te mogućnost prilagodbe boje i oblika. Na slici 4.6. može se vidjeti izgled obojanih FN ćelija.



Slika 4.6. Obojane fotonaponske ćelije [16]

#### 4.5. Model fotonaponske ćelije

Matematički model fotonaponske ćelije često se zasniva na ekvivalentnom električnom krugu iz kojega se može shvatiti kako fotonaponski efekt djeluje, te je jasno prikazan slikom 4.7. Kada je fotonaponska ćelija izložena svjetlosti i povezana s trošilom, u ćeliji se zbog fotonaponskog efekta generira fotostruja  $I_s$ . Kada se struja  $I$  kroz trošilo razvija, ona se može izračunati kao razlika između fotostruje  $I_s$  i struje diode  $I_d$ .



Slika 4.7. Model FN ćelije [20]

gdje su:

$I_s$  – fotostruja, [A]

$I_d$  – struja diode, [A]

$I$  - struja trošila, [A]

$R_s$  – serijski otpor, [ $\Omega$ ]

$R_p$  – paralelni otpor, [ $\Omega$ ]

$U$  – električni napon, [V]

$R$  - otpor trošila, [ $\Omega$ ]

Izvor stalne struje povezan je paralelno s diodom. Serijski otpor  $R_s$  zavisi od materijala i načina izrade solarne ćelije, a poželjno je da bude što manji. Paralelni otpor ćelije  $R_p$  ovisi o karakteristikama ćelije i u većini je slučajeva dovoljno velik da ga možemo zanemariti. Uz sve te navedene pretpostavke struja kroz trošilo  $R$  prikazana je matematičkom relacijom (3-2):

$$I = I_s - I_d = I_0 \cdot \left( e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right) - I_s \quad (3-2)$$

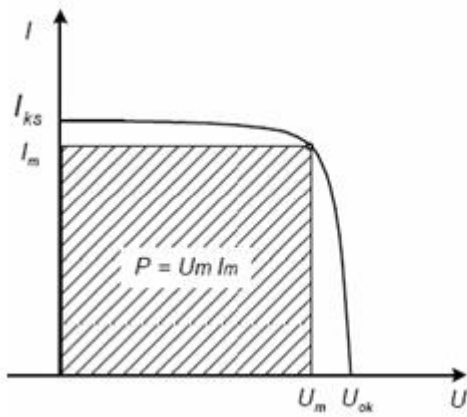
#### 4.6. Karakteristika fotonaponske ćelije

Krivulje I-U karakteristike grafički prikazuju rad fotonaponske ćelije ili modula, sažimajući odnos između struje i napona pri specifičnim uvjetima zračenja i temperature. Ove krivulje pružaju ključne informacije za konfiguriranje fotonaponskog sustava, omogućujući mu da radi što bliže svojoj optimalnoj točki maksimalne snage.

Maksimalna snaga koju fotonaponska ćelija može isporučiti prikazana je slikom 4.8 i odgovara površini iscrtanog pravokutnika. Kod napona manjih od  $U_m$ , struja je veća od  $I_m$ , no umnožak  $U \cdot I$  je manji od maksimalne snage. Kada napon premašuje  $U_m$ , struja opada prema nuli, čime se smanjuje i snaga. Maksimalna snaga fotonaponske ćelije može se izraziti kao umnožak struje u točki maksimalne snage i napona u točki maksimalne snage. (3-3) [16].

$$P = I_m \cdot U_m \quad (3-3)$$





Slika 4.8. Maksimalna snaga FN ćelije [16]

gdje su:

$I_m$  – struja u točki maksimalne snage, [A]

$I_{ks}$  – struja kratkog spoja, [A]

$U_m$  – napon u točki maksimalne snage, [V]

$U_{ok}$  – napon otvorenog kruga, [V]

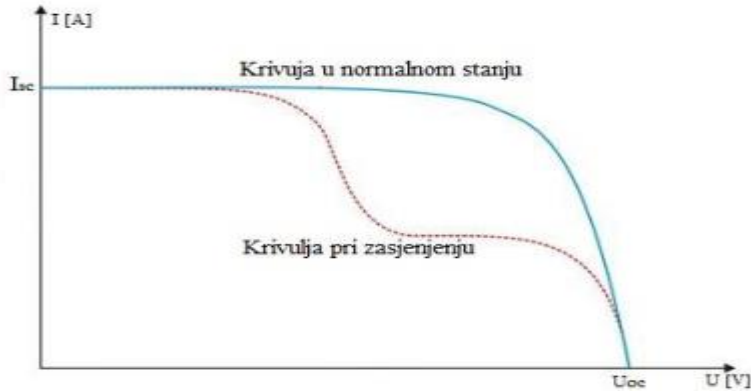
## 5. ZASJENJENJE FOTONAPONSKIH SUSTAVA

Zasjenjenje fotonaponskih modula predstavlja jedan od ključnih faktora koji mogu značajno utjecati na njihovu učinkovitost i proizvodnju električne energije. Fotonaponski moduli konstruirani su da maksimalno iskoriste sunčevu energiju, ali prisutnost sjena može smanjiti njihove performanse i skratiti vijek trajanja.

### 5.1. Utjecaj zasjenjenja na performanse

Zasjenjenje smanjuje količinu sunčeve svjetlosti koja dopire do fotonaponskih ćelija unutar modula. Čak i mala sjena može izazvati značajan pad u proizvodnji energije, jer fotonaponski moduli rade po principu serijske i paralelne veze ćelija, pri čemu zasjenjenje jedne ćelije može utjecati na performanse cijelog modula. Drveće, zgrade, antene i drugi objekti u blizini fotonaponskih modula mogu bacati sjene koje smanjuju količinu dostupne sunčeve svjetlosti. Visina i pozicija tih objekata, kao i položaj sunca tijekom dana i godine, igraju ključnu ulogu u količini zasjenjenja. Prašina, prljavština i ptičji izmet na površini fotonaponskih modula mogu uzrokovati djelomično zasjenjenje, smanjujući njihovu učinkovitost. Redovito čišćenje modula može pomoći u minimiziranju ovog problema.

Jedna fotonaponska ćelija generira napon od oko 0,7 V, dok struja može doseći nekoliko ampera, ovisno o njenoj veličini i intenzitetu Sunčevog zračenja. Budući da ovaj niski napon nije dovoljan za praktičnu upotrebu, fotonaponske ćelije spajaju se u serijske nizove kako bi se postigao viši napon. Tipično, oko 36 ćelija povezuje se u seriju kako bi se dobio napon dovoljan za punjenje 12V baterija. Ovaj proces rezultira stvaranjem fotonaponskog modula, a spajanjem više modula formira se fotonaponski niz. Fotonaponske ćelije i moduli vrlo su osjetljivi na zasjenjenje, jer čak i djelomično zasjenjenje jedne ćelije može značajno smanjiti ukupnu proizvodnju električne energije cijelog modula ili niza, što je jasno prikazano na I – U karakteristikama na slici 5.1.



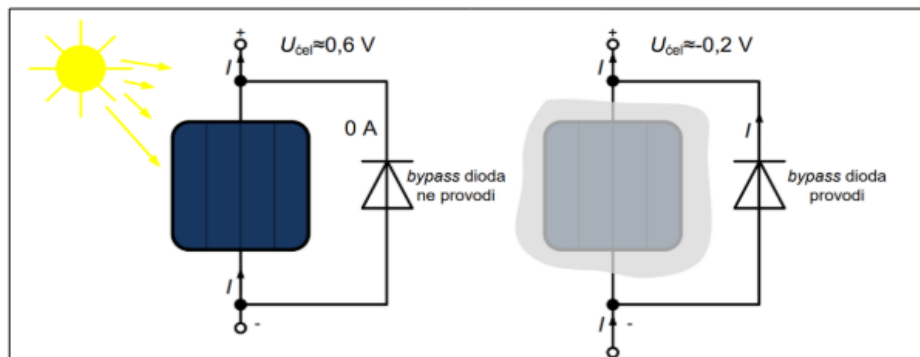
Slika 5.1. Karakteristike FN ćelije pri zasjenjenju i normalnom radu [22]

Kada dođe do zasjenjenja jedne ćelije, ta ćelija proizvodi manje struje u usporedbi s ostalim ćelijama, što otežava prolaz struje kroz cijeli modul. To se može vidjeti na isprekidanoj krivulji prikazanoj na slici 5.1. Kada je ćelija potpuno zasjenjena, prestaje proizvoditi struju i postaje obična poluvodička dioda. U tom slučaju, reverzni napon na diodi može izazvati proboj diode, što rezultira zagrijavanjem, taljenjem i na kraju uništenjem fotonaponske ćelije. Kako bi se spriječilo takvo oštećenje, koriste se zaobilazne (bypass) diode koje se postavljaju paralelno s ćelijom ili modulom. Zaobilazne (bypass) diode omogućuju struji da zaobiđe zasjenjenu ćeliju, smanjujući rizik od pregrijavanja i osiguravajući kontinuirani rad sustava. Pravilno projektiranje i postavljanje fotonaponskih sustava, uzimajući u obzir moguće izvore zasjenjenja, ključno je za dugoročni rad i učinkovitost fotonaponskih modula.

## 5.2. Zaobilazne (bypass) diode

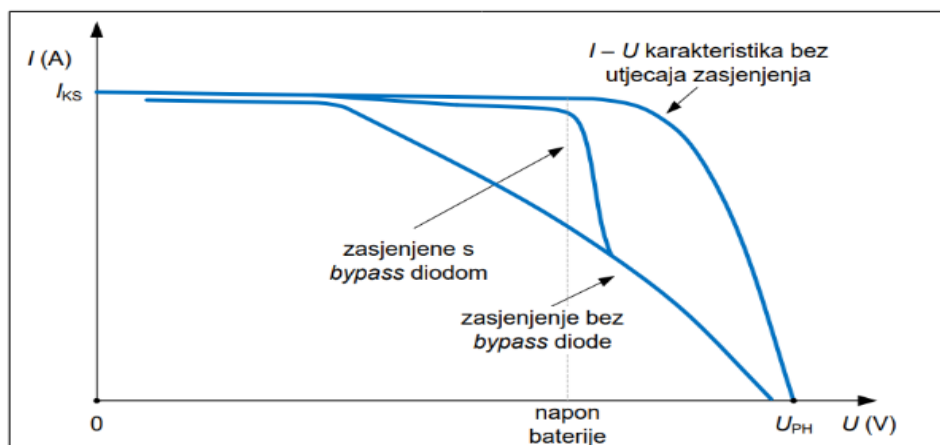
Zaobilazne diode su ključne komponente u fotonaponskim modulima koje pomažu u održavanju učinkovitosti i dugovječnosti fotonaponskih modula, posebno kada dođe do djelomičnog zasjenjenja. Njihova uloga je spriječiti oštećenja i smanjiti gubitke energije uzrokovane zasjenjenjem jedne ili više fotonaponskih ćelija unutar modula. Kada je jedna ili više fotonaponskih ćelija unutar modula zasjenjeno, te ćelije proizvode manje struje od onih koje nisu zasjenjene. Zasjenjene ćelije postaju točke visokog otpora, što može smanjiti ukupnu proizvodnju energije cijelog modula. Bypass diode omogućuju struji da “zaobiđe” zasjenjene ćelije, čime se smanjuje negativan utjecaj zasjenjenja na performanse modula. Bypass diode povećavaju sigurnost i pouzdanost fotonaponskih sustava. Omogućuju kontinuirani rad modula čak i u uvjetima djelomičnog zasjenjenja, što je posebno važno za velike fotonaponske instalacije koje se ne mogu često nadzirati i održavati.

Kada je samo mali dio modula zasjenjen, izlazna snaga može se značajno smanjiti ako modul nije prilagođen za takve uvjete. Na primjer, zasjenjenje jedne ćelije može uzrokovati smanjenje izlazne snage za otprilike 50%. Da bi se očuvala učinkovitost fotonaponskog sustava, proizvođači često dodaju vanjske diodes na modul. Na slici 5.2. prikazan je način spajanja zaobilazne diode na fotonaponski modul. Zbog praktičnosti, proizvođači obično koriste jednu diodu po modulu ili nekoliko dioda za cijeli fotonaponski sustav.



Slika 5.2. Spajanje bypass diode [23]

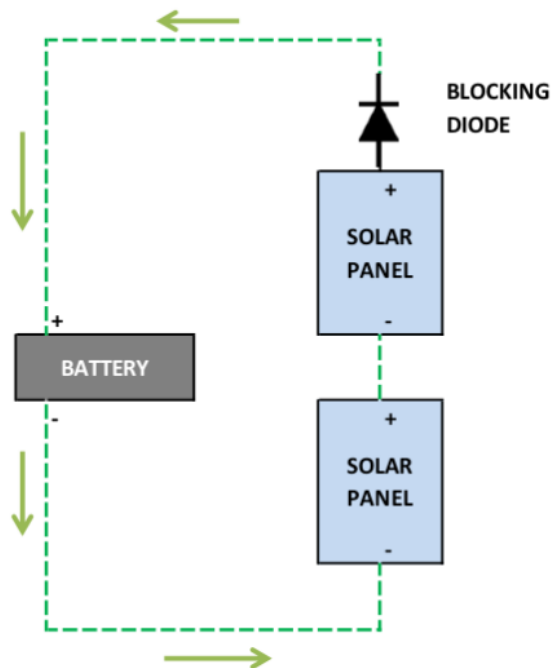
Na slici 5.3. prikazane su strujno-naponske karakteristike fotonaponske ćelije pri zasjenjenju bez upotrebe zaobilaznih dioda, pri čemu se uočava značajno smanjenje izlazne snage. U usporedbi, druga karakteristika prikazuje istu ćeliju s uključenom zaobilaznom diodom, što dovodi do značajnog povećanja izlazne snage.



Slika 5.3. Strujno naponska karakteristika diode sa i bez bypass diode [23]

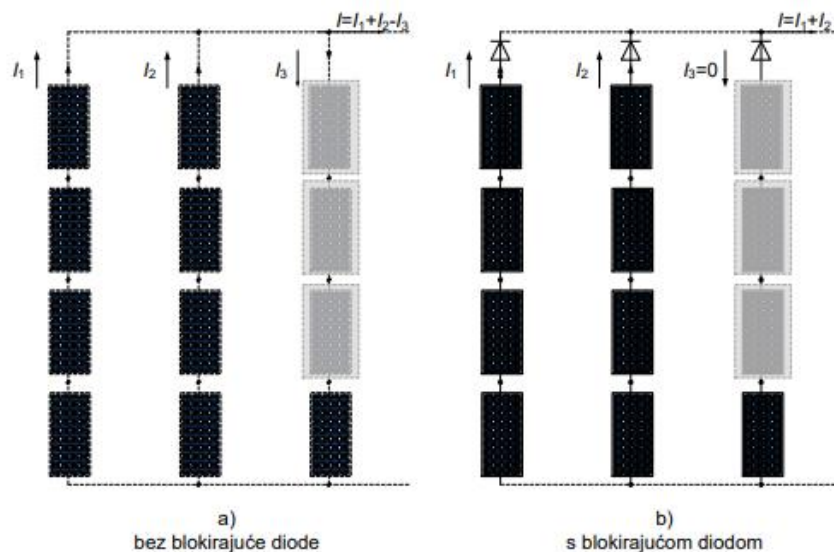
### 5.3. Blokirajuće diode

Blokirajuće diode igraju ključnu ulogu u zaštiti i učinkovitosti fotonaponskih sustava. Njihova glavna funkcija je sprječavanje povratnog toka struje, što je posebno važno u situacijama kada fotonaponski moduli ne proizvode električnu energiju, poput noći ili tijekom zasjenjenja. Blokirajuće diode omogućuju struji da teče samo u jednom smjeru, iz fotonaponskih modula prema baterijama ili mreži. Kada fotonaponski moduli ne proizvode energiju, postoji rizik da struja iz baterija ili mreže poteče natrag u module, što može uzrokovati gubitke energije i potencijalno oštetiti module. Blokirajuće diode sprječavaju takav povratni tok struje, osiguravajući da energija teče samo u željenom smjeru. U fotonaponskim sustavima, blokirajuće diode štite baterije i druge komponente od prekomjernog pražnjenja. Kada nema sunčeve svjetlosti, bez blokirajućih dioda, baterije bi se mogle prazniti kroz fotonaponske module. Instalacijom blokirajućih dioda osigurava se da baterije zadržavaju svoju pohranjenu energiju. Blokirajuće diode su obično postavljene serijski s fotonaponskim modulima ili nizovima. One su konstruirane tako da imaju nizak pad napona u smjeru provodnosti, što minimizira gubitke energije tijekom rada. Vrsta i veličina diode ovise o struji koju moduli generiraju i ukupnom dizajnu sustava. Slikom 5.4 jasno je prikazan način spajanja blokirajućih dioda. Na slici su prikazana dva solarna panela spojena serijski. Svaki panel ima pozitivan i negativan pol. Blokirajuća dioda je postavljena serijski s pozitivnim polom gornjeg fotonaponskog modula. Funkcija blokirajuće diode je sprječavanje povratnog toka struje. To znači da omogućava struji da teče samo od fotonaponskog modula prema bateriji, a ne obrnuto. Kada fotonaponski moduli ne proizvode električnu energiju (npr. noću), dioda sprječava da struja iz baterije teče natrag prema modulima, čime se sprječavaju gubici energije i potencijalna oštećenja modula. Baterija je prikazana s označenim pozitivnim (+) i negativnim (-) polom. Struja koju proizvode fotonaponski moduli teče prema bateriji, gdje se pohranjuje. Baterija zatim može napajati uređaje ili sustave povezane s njom. Zelene strjelice pokazuju smjer protoka struje, iz fotonaponskih modula, struja teče kroz blokirajuću diodu prema bateriji. Struja iz baterije teče prema vanjskom krugu (uređajima ili sustavima koji koriste pohranjenu energiju). Ova shema prikazana slikom 5.4 ilustrira jednostavan, ali učinkovit način zaštite fotonaponskih sustava i optimizacije njihovog rada korištenjem blokirajućih dioda.



Slika 5.4. Spajanje blokirajućih dioda [24]

Slikom 5.5 prikazan je drugi način upotrebe blokirajućih dioda. Koriste se u zasjenjenim nizovima koji su spojeni paralelno. Tako se sprječava povratna struja kroz FN module koji ne funkcioniraju kako treba [19].



Slika 5.5. Način korištenja blokirajuće diode [23]

## 6. ISPITIVANJE I ANALIZA UTJECAJA ZASJENJENJA NA PERFORMANSE FOTONAPONSKIH MODULA

Mjerenja koja će se koristiti prilikom izrade ovog završnog rada izvršena u u Laboratoriju za obnovljive izvore energije na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek. Laboratorij sadrži pet različitih fotonaponskih modula na kojima se može izvršiti mjerenje, a za potrebe ovog rada koristit će se dva fotonaponska modula Panasonic VBHN240SE10 i Solar Frontier SF-150. Laboratorijski izvor svjetlosti će imati ulogu Sunca dok će se snaga, napon, struja, jačina zračenja i otpor mjeriti pomoću vatmetra, piranometra i promjenjivog otpornika. Za svaki modul izvršit će se 4 različita mjerenja s različitim zasjenjenjima (zasjenjenje 1. reda modula, zasjenjenje 2 ćelije modula, zasjenjenje uzrokovano pticama, zasjenjenje desnog stupca) te će se u konačnici prikazati  $U-I$  i  $P-U$  karakteristike za svaki modul te njihova usporedba prilikom različitih scenarija zasjenjenja.

### 6.1. Karakteristike FN modula

Slikama 6.1 i 6.2 prikazane su tehničke karakteristike fotonaponskih modula Panasonic VBHN240SE10 i Solar Frontier SF-150.



Slika 6.1. Izgled FN modula Panasonic VBHN240SE10

Tablica 6.1. Tehničke karakteristike FN modula Panasonic VBHN240SE10 pri STC uvjetima

Maksimalna snaga ( $W$ )	240
Nazivni napon ( $V$ )	43,7
Nazivna struja ( $A$ )	5,51
Napon praznog hoda ( $V$ )	52,4
Struja kratkog spoja ( $A$ )	5,85
Temp.koef.struje K.S. ( $\%/^{\circ}C$ )	0,03
Temp.koef.napona P.H. ( $mV/^{\circ}C$ )	-131
Temp.koef.max.snage ( $\%/^{\circ}C$ )	-0,3
Učinkovitost modula (%)	19



Slika 6.2. Izgled FN modula Solar Frontier SF-150

Tablica 6.2. Tehničke karakteristike FN modula Solar Frontier SF-150 pri STC uvjetima

Maksimalna snaga ( $W$ )	150
Nazivni napon ( $V$ )	85
Nazivna struja ( $A$ )	1,85
Napon praznog hoda ( $V$ )	108



Struja kratkog spoja (A)	2,2
Temp.koef.struje k.s. (%/K)	0,01
Temp.koef.napona P.H. (%/K)	-0,3
Temp.koef.max.snage (%/K)	-0,31
Učinkovitost modula (%)	12,2

## 6.2. Korišteni uređaji i mjerna metoda

Mjerni instrumenti koji su se koristili u ovome pokusu su:

- vatmetar, prikazan na slici 6.3.



Slika 6.3. Vatmetar Metrix PX120

Tablica 6.3. Specifikacije vatmetra Metrix PX120

	Aktivna snaga	Reaktivna snaga	Faktor snage	Napon	Struja
Raspon	10W to 1kW - 1kW-6kW	10 to 1k – 1k to 6k	1,00	0,5 to 600V RMS	10 mA to 2A- 2A to 10A
Rezolucija	0,1W – 1W	2% R ± 2 digits	0,01/3% R ± 2 digits	100 mV	1 mA – 10mA

- Laboratorijski izvor svjetlosti, prikazan na slici 6.4.



Slika 6.4. Laboratorijski izvor svjetlosti

- Piranometar, prikazan na slici 6.5.



Slika 6.5. Piranometar Solar Survey 200

Tablica 6.4. Specifikacije piranometra Solar Survey 200

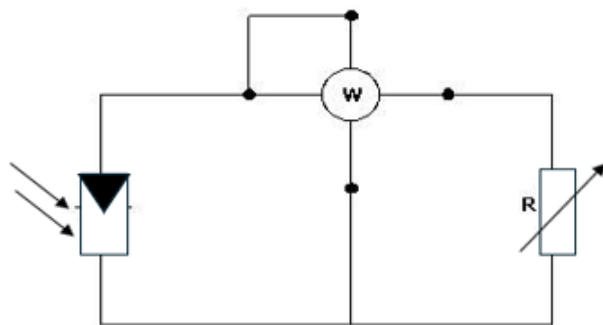
	Zračenje	Temperatura	Usmjerenost kompas	Mjerenje nagiba
Raspon prikaza	100 – 1500 W/m <sup>2</sup>	-30°C to +125°C	0° to 360°	0° to 90°
Raspon mjerenja	100 – 1250 W/m <sup>2</sup>	-30°C to +125°C	0° to 360°	0° to 90°
Rezolucija	1 W/m <sup>2</sup>	1°	1°	1°

- Promjenivi otpornik, prikazan na slici 6.6.



Slika 6.6. Promjenjivi otpornik

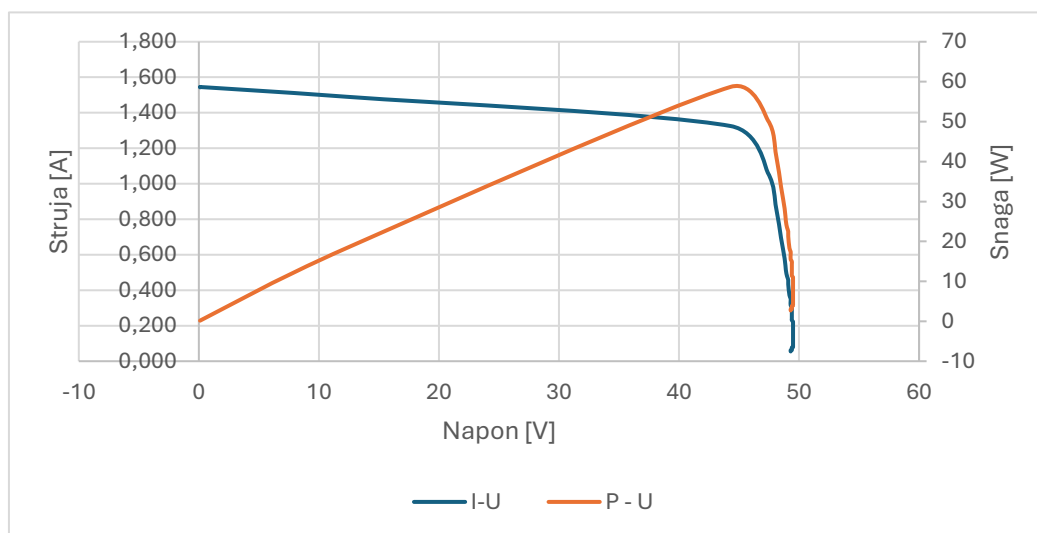
Mjerna metoda prikazana je slikom 5.7. gdje su u krug spojeni modul, promjenjivi otpornik te vatmetar koji mjeri struju i napon dok se mijenja položaj kotve promjenjivog otpornika te u konačnici i snagu. U krug je spojen i piranometar koji mjeri jakost Sunčeva zračenja.



Slika 6.7. Prikaz mjerne metode

### 6.3. Rezultati simulacije zasjenjenja za modul Panasonic VBHN240SE10

#### 6.3.1. Izmjerene vrijednosti za nezasjenjeni FN modul Panasonic VBHN240SE10

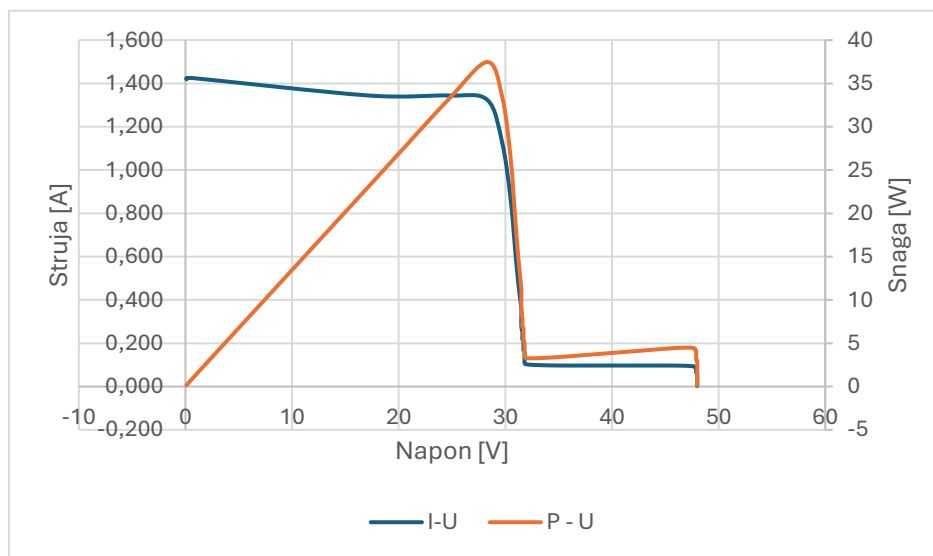


Slika 6.8. Osnovne  $I-U$  i  $P-U$  karakteristike modula Panasonic VBHN240SE10

### 6.3.2 Zasjenjenje 2 ćelije FN modula



Slika 6.9. Zasjenjenje 2 ćelije FN modula Panasonic VBHN240SE10

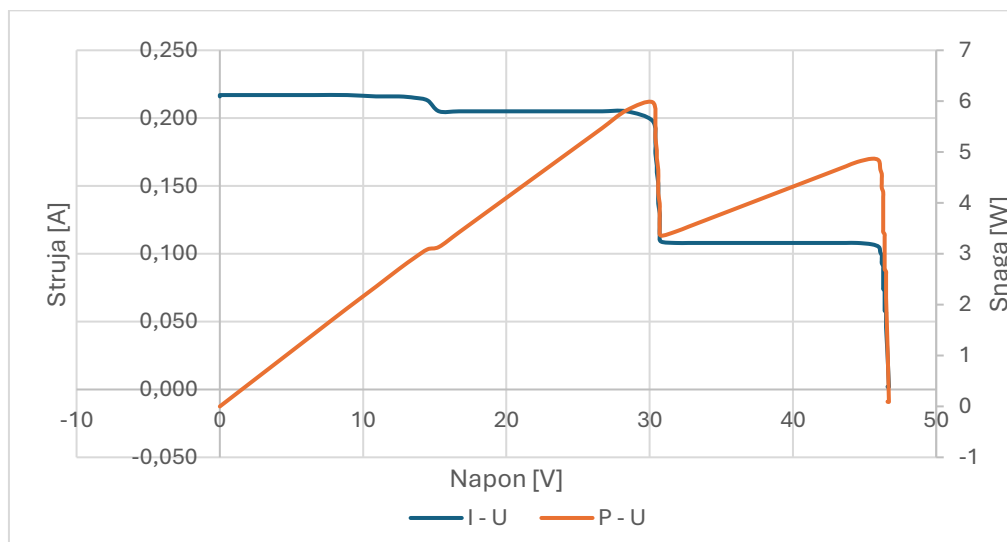


Slika 6.10.  $I-U$  i  $P-U$  karakteristike modula Panasonic VBHN240SE10 pri zasjenjenju 2 ćelije modula

### 6.3.3 Zasjenjenje 1. Reda FN modula

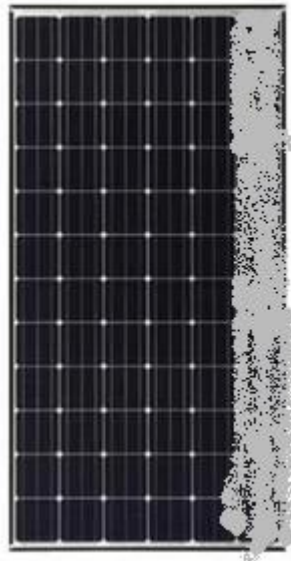


Slika 6.11. Zasjenjenje 1.reda. modula Panasonic VBHN240SE10

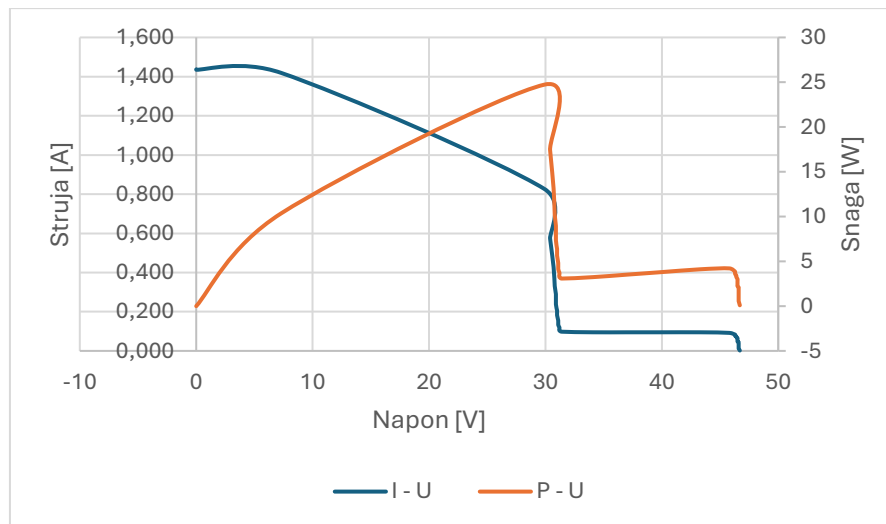


Slika 6.12.  $I-U$  i  $P-U$  karakteristike modula Panasonic VBHN240SE10 pri zasjenjenju prvog reda

### 6.3.4. Zasjenjenje desnog stupca FN modula



Slika 6.13. Zasjenjenje desnog stupca modula Panasonic VBHN240SE10

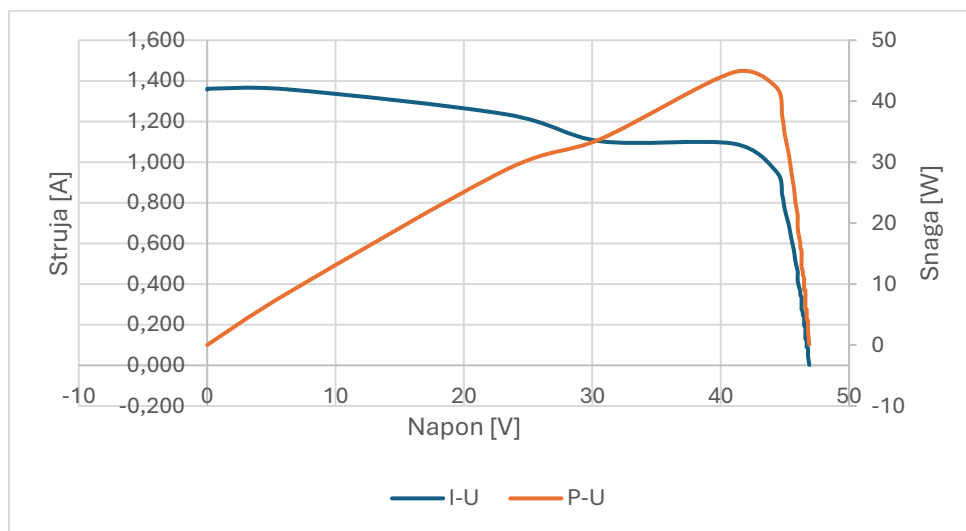


Slika 6.14.  $I-U$  i  $P-U$  karakteristike modula Panasonic VBHN240SE10 pri zasjenjenju desnog stupca modula.

### 6.3.5. Zasjenjenje FN modula uzrokovano ptičjim izmetom



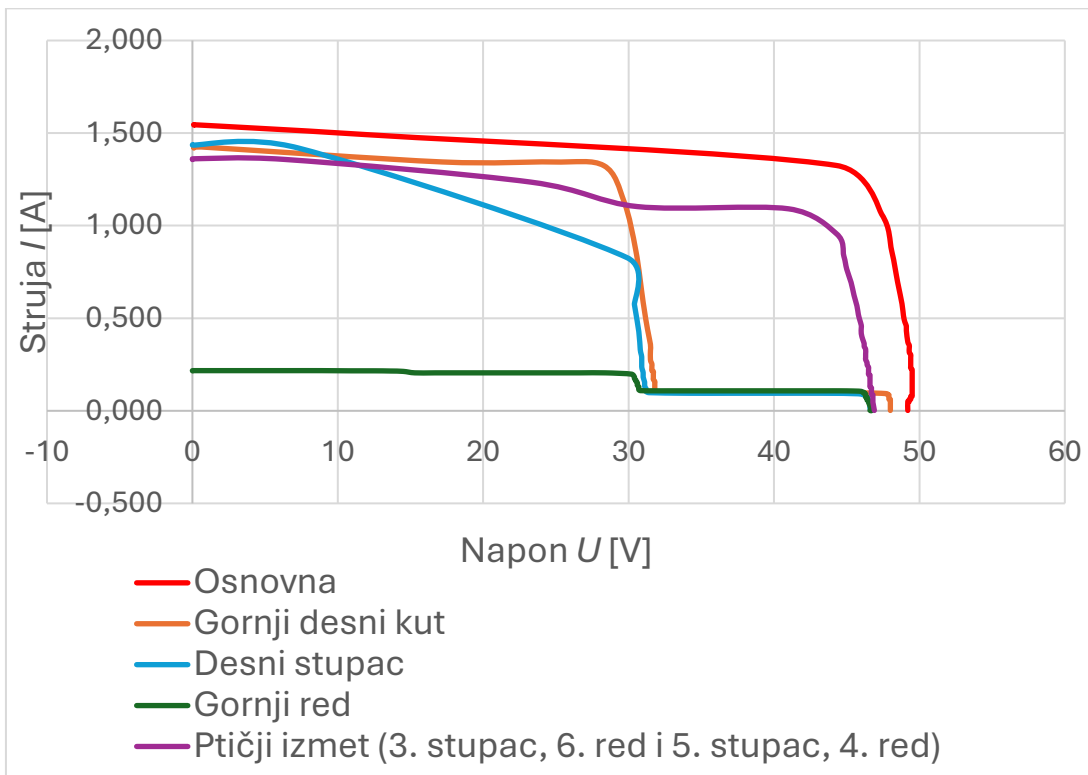
Slika 6.15. Zasjenjenje modula Panasonic VBHN240SE10 uzrokovano ptičjim izmetom



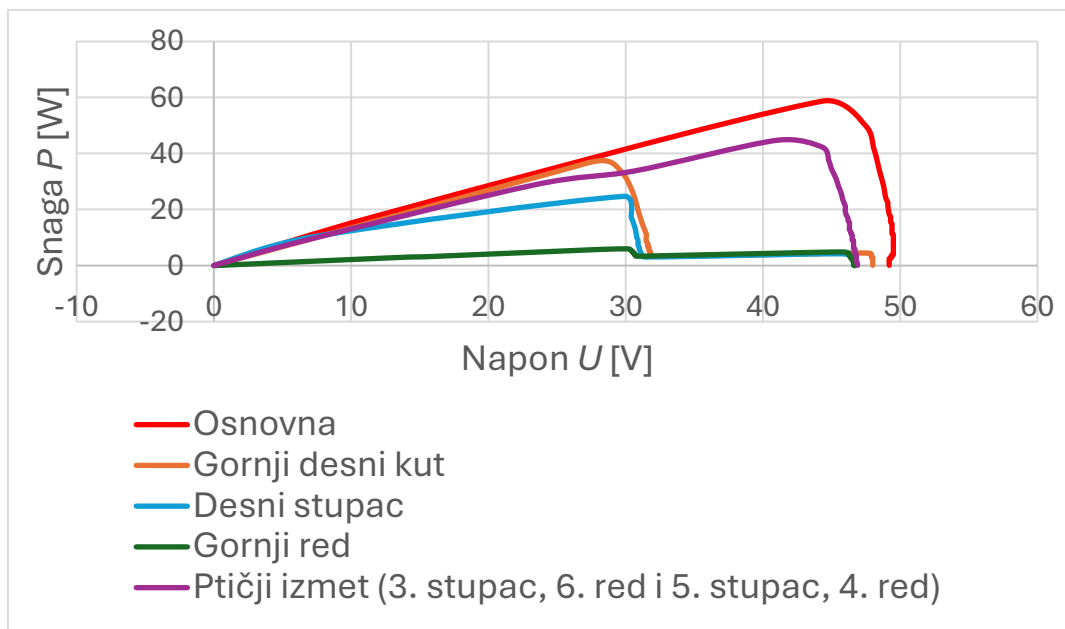
Slika 6.16.  $I-U$  i  $P-U$  karakteristike modula Panasonic VBHN240SE10 pri zasjenjenju uzrokovanom ptičjim izmetom



### 6.3.6. Usporedba dobivenih vrijednosti modula prilikom zasjenjenja



Slika 6.17.  $I-U$  karakteristike modula Panasonic VBHN240SE10 pri različitim zasjenjenjima



Slika 6.18.  $P-U$  karakteristike modula Panasonic VBHN240SE10 pri različitim zasjenjenjima.

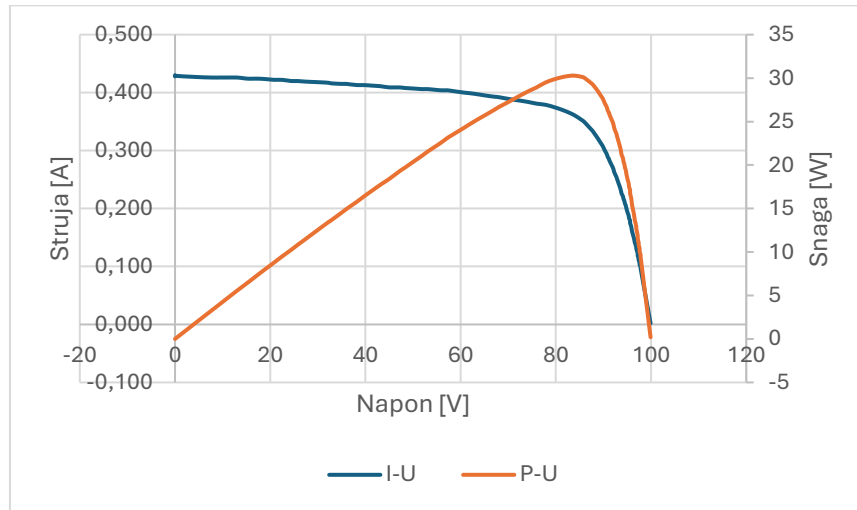
Na slikama 6.17. i 6.18. crvenom bojom prikazane su osnovne karakteristike modula Panasonic VBHN240SE10. Smeđom bojom prikazane su karakteristike pri zasjenjenju 2 ćelije modula te je uočljiv nagli pad struje i snage. Može ga se objasniti tako da je zaobilazna (bypass) dioda prespojila dva stupca i samim time se i snaga smanjila, što se vidi iz grafa. Slične karakteristike uočljive su i kod grafova koji prikazuju zasjenjenje desnog stupca i grafa koji prikazuje zasjenjenje ptičjim izmetom. Zelenom bojom označeni su grafovi koji prikazuju utjecaj zasjenjenja gornjeg reda Uočljive su najmanje vrijednosti struje, napona i snage u tom scenariju zbog toga što su sve 3 zaobilazne (bypass) diode uključene, modul je prespojen i ne pretvara nikakvu količinu energije. Tablica 6.5. prikazuje vrijednosti maksimalne snage za pojedinu vrstu zasjenjenja te postotak maksimalne snage modula za vrijeme istih. Vidljivo je da modul pri zasjenjenju prvog reda ima najmanji postotak maksimalne snage budući da je prespojen dok kod slučaja s ptičjim izmetom postotak maksimalne snage je najbliži osnovnome jer je modul najmanje zasjenjen.

Tablica 6.5. Maksimalne snage i postotak maksimalne snage za različite vrste zasjenjenja FN modula Panasonic VBHN240SE10

	Maksimalna snaga [W]	Postotak max. snage [%]
osnovna	58,6975	100
2 ćelije	37,4692	63,8
1.red	5,9796	10,2
desni stupac	24,7273	42,1
ptičji izmet	44,731	76,2

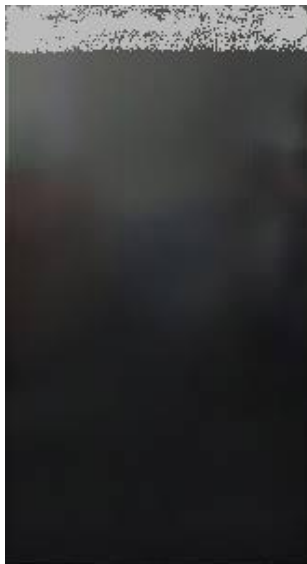
## 6.4. Izmjerene vrijednosti za Solar Frontier SF-150

### 6.4.1. Osnovne izmjerene vrijednosti FN modula

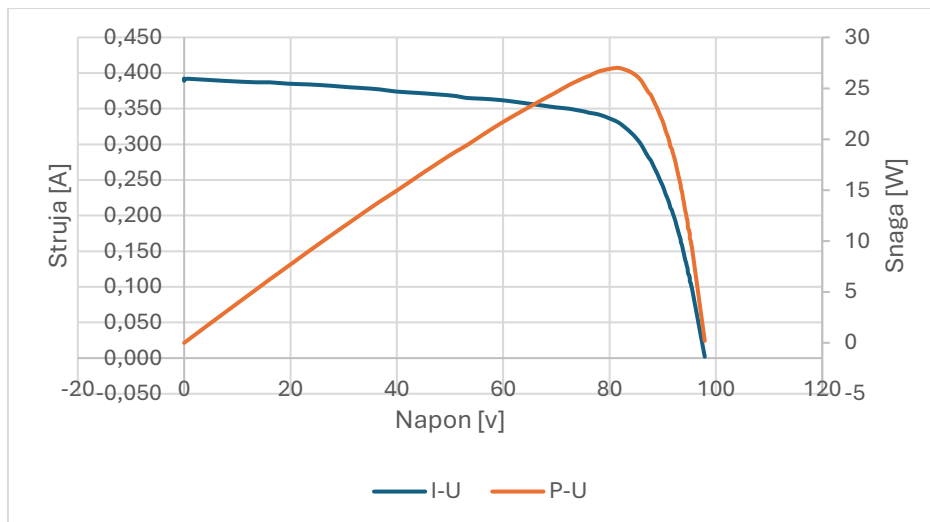


Slika 6.19. Osnovne  $I-U$  i  $P-U$  karakteristike modula Solar Frontier SF-150

### 6.4.2. Zasjenjenje 1. reda FN modula



Slika 6.20. Zasjenjenje prvog reda modula Solar Frontier SF-150.

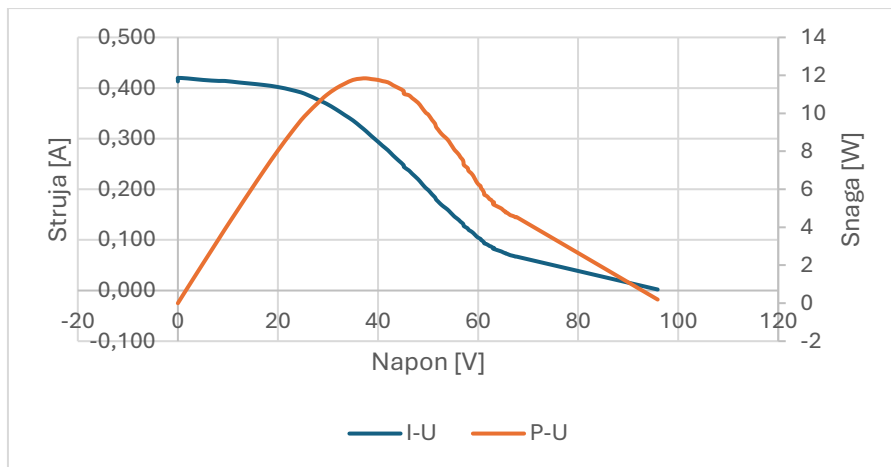


Slika 6.21.  $I-U$  i  $P-U$  karakteristike modula Solar Frontier SF-150 pri zasjenjenju prvog reda

### 6.4.3. Zasjenjenje 1. Stupca FN modula

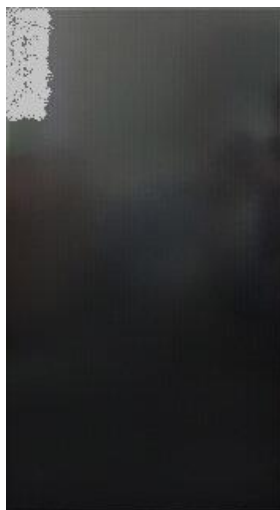


Slika 6.22. Zasjenjenje 1.stupca modula Solar Frontier SF-150.

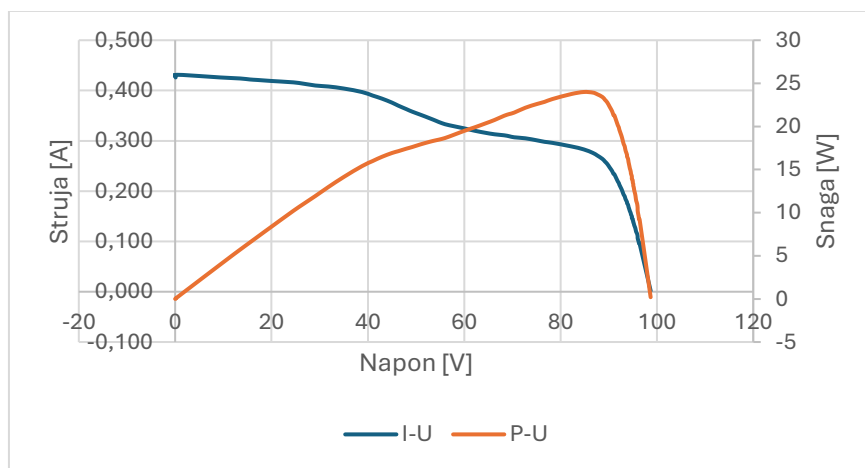


Slika 6.23.  $I-U$  i  $P-U$  karakteristike modula Solar Frontier SF-150 pri zasjenjenju prvog stupca modula

#### 6.4.4. Zasjenjenje 2 ćelije FN modula



Slika 6.24. Zasjenjenje dvije ćelije modula Solar Frontier SF-150.

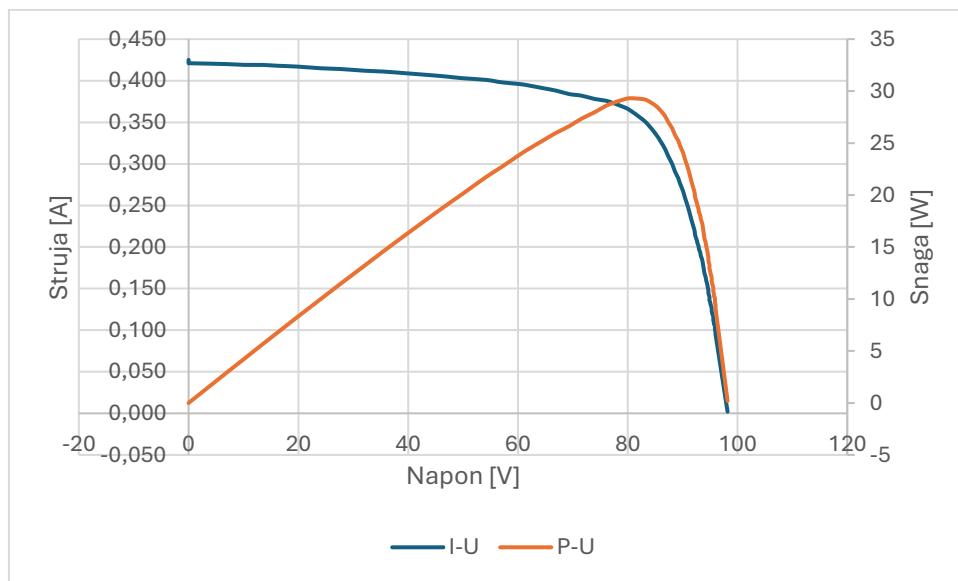


Slika 6.25.  $I-U$  i  $P-U$  karakteristike modula Solar Frontier SF-150 pri zasjenjenju 2 ćelije modula

### 6.4.5. Zasjenjenje FN modula uzrokovano pticama

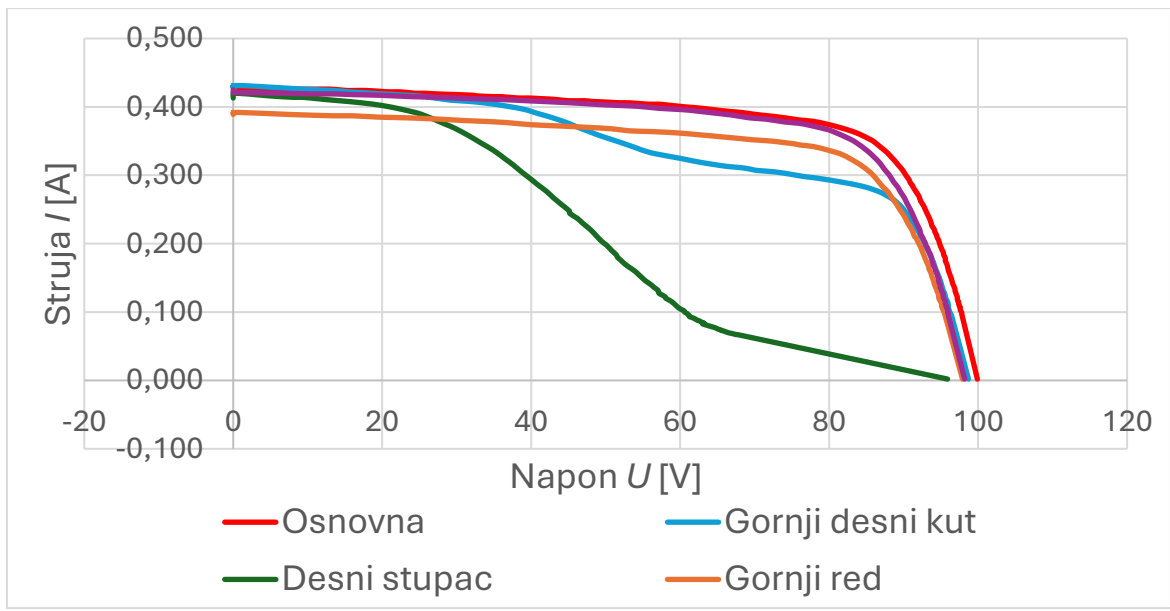


Slika 6.26. Zasjenjenje modula Solar Frontier SF-150 uzrokovano ptičjim izmetom.

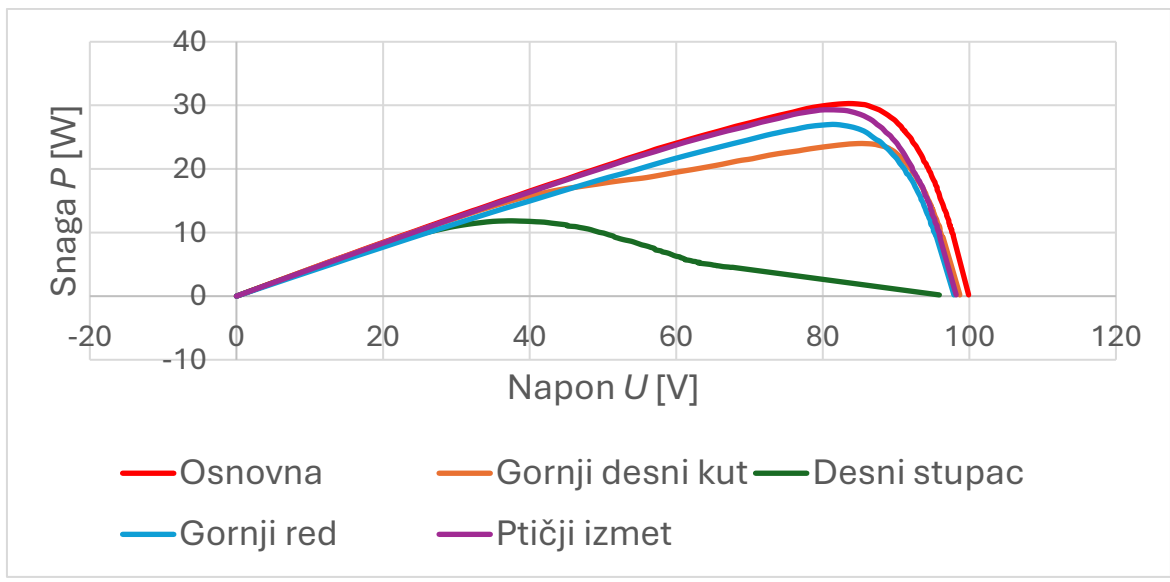


Slika 6.27.  $I-U$  i  $P-U$  karakteristike modula Solar Frontier SF-150 pri zasjenjenju uzrokovanom ptičjim izmetom

### 6.4.6. Usporedba dobivenih rezultata za modul Solar Frontier SF-150 pri različitim uvjetima zasjenjenja



Slika 6.28.  $I-U$  karakteristike modula Solar Frontier SF-150 pri različitim zasjenjenjima



Slika 6.29.  $P-U$  karakteristike modula Solar Frontier SF-150 pri različitim zasjenjenjima.

Na slikama 6.28 i 6.29. prikazane su vrijednosti struje, napona i snage za modul Solar Frontier SF-150. Na prvu je uočljivo kako su karakteristike homogenijeg oblika odnosno nema velike razlike u vrijednostima između pojedinačnih utjecaja zasjenjenja. Na slici 6.29 gdje su prikazane snage vidljiv je blagi pad snaga, ovisno o pojedinom slučaju zasjenjenja, no ne kao kod modula Panasonic VBHN240SE10 iz čega proizlazi zaključak da tankoslojni fotonaponski moduli imaju manje gubitke pri zasjenjenju modula što ih čini pouzdanijima iako imaju manju učinkovitost. Potrebna im je veća površina za istu količinu proizvedene energije kao kod polikristalnih fotonaponskih modula. Tablicom

6.6. prikazane su maksimalne snage i postotak maksimalne snage za pojedini slučaj zasjenjenja FN modula Solar Frontier SF-150. Vidljivo je kako su dobiveni postotci maksimalne snage puno veći nego za prethodni modul što dovodi do zaključka da je modul Solar Frontier SF-150 otporniji na zasjenjenje. Najmanja izmjerena vrijednost je za slučaj zasjenjenja desnog stupca te iznosi 39,1 %, dok je pri zasjenjenju ptičjim izmetom modula najveći izmjereni postotak maksimalne snage i on iznosi 96,8 %.

Tablica 6.6. Maksimalne snage i postotak maksimalne snage za različite vrste zasjenjenja FN modula Solar Frontier SF-150

	Maksimalna snaga [W]	Postotak max. snage [%]
osnovna	30,276	100
2 ćelije	23,998	79,3
1.red	26,994	89,2
desni stupac	11,844	39,1
ptičji izmet	29,309	96,8



## 7. ZAKLJUČAK

Zaključak ovog rada ističe ključne aspekte utjecaja zasjenjenja na fotonaponske module i proizvodnju električne energije, kao i povezanost sa Sunčevim zračenjem. Zasjenjenje, bilo djelomično ili potpuno, jedno je od ključnih ograničenja učinkovitosti fotonaponskih sustava, budući da fotonaponski moduli ovise o Sunčevom zračenju kao primarnom izvoru energije. Svako smanjenje dostupne radijacije, bilo zbog oblačnog vremena, prepreka poput zgrada ili vegetacije, ili nepovoljnog postavljanja modula, rezultira smanjenom proizvodnjom električne energije. Budući da Sunčevo zračenje, direktno ili difuzno, čini osnovni izvor energije za fotonaponske module, smanjenje dostupnog zračenja zbog zasjenjenja izravno se odražava na smanjenu proizvodnju električne energije. Analizom različitih tehnologija izrade modula te različitih utjecaja zasjenjenja utvrđeno je da se gubi značajan dio potencijalne energije zbog smanjene apsorpcije Sunčevog zračenja. Neravnomjerna raspodjela zračenja uzrokuje neravnotežu u radu pojedinih modula, što dodatno doprinosi smanjenju učinkovitosti sustava. Korištenje zaobilaznih (bypass) dioda pokazalo se ključnim za ublažavanje ovih efekata, omogućujući modulima da zaobiđu zasjenjena područja i smanje gubitke snage. Međutim, čak i uz primjenu ovih tehnologija, gubici zbog nesklada i dalje predstavljaju značajan izazov, posebno u sustavima s većim brojem serijski povezanih modula, gdje razlike u dostupnom Sunčevom zračenju mogu dodatno utjecati na ukupnu učinkovitost. Ipak, učinkovitost tankoslojnih modula je manja što za rezultat daje to da ukoliko se želi izjednačiti proizvodnja tankoslojnih i polikristalnih modula potrebna je veća površina a samim time i više tankoslojnih fotonaponskih modula. S druge strane tankoslojni moduli jeftiniji su za izradu i postavljanje, lakši te imaju veću otpornost na niske temperature i daju bolje performanse pri nedostatku Sunčeve svjetlosti. Pravilno projektiranje, pozicioniranje i održavanje fotonaponskih sustava ključno je za minimiziranje negativnih učinaka zasjenjenja i maksimiziranje korištenja Sunčevog zračenja. Time se osigurava veća proizvodnja električne energije i doprinosi se održivosti obnovljivih izvora energije u kontekstu rastuće globalne potražnje za čistom i učinkovitom energijom.

## LITERATURA

- [1] IEA, Trends 2017 in Photovoltaic applications, IEA, Pariz, 2017.
- [2] IEA, Solar Photovoltaic Energy, Technology Roadmap, No.1., vol.1., str. (1), rujan 2014.
- [3] N.Kushwaha, V. K. Yadav, Effect of partial shading on photovoltaic systems performance and its mitigation techniques – a review article, Energy Sources Part A, No.4, Vol.45, veljača 2023.
- [4] P. Sawarkar, S.Bodkhe, M. Bopche, P. Kumbhare, Partial Shading Effects and Solution for Photovoltaic String, Helix, No.2., vol.10., str. (58-62), travanj 2020.
- [5] Y. Mahmoud, E. F. El-Saadany, “Enhanced Reconfiguration Method for Reducing Mismatch Losses in PV Systems,” IEEE J. Photovoltaics, No. 6, vol.7., str. (1746–1754), lipanj 2017.
- [6] G. Spagnuolo, G. Petrone, B. Lehman, C. A. Ramos Paja, Y. Zhao, M. L. Orozco Gutierrez, “Control of photovoltaic arrays: Dynamical reconfiguration for fighting mismatched conditions and meeting load requests,” IEEE Ind. Electron. Mag., No.1., vol. 9, str. (62–76), 2015.
- [7] H. Haeblerlin, Photovoltaics – system design and practice, John Wiley & Sons LTD., str. (160-163), Chichester, 2012.
- [8] G. M. Masters, Renewable and Efficient Electric Power Systems, John Wiley & Sons LTD., str. (477-485), New Jersey, 2004.
- [9] T. Pale, Z. Meštrović, I. Marković, Analiza utjecaja sjene na fotonaponski modul, Polytechnic & Design, No. 3., vol. 10., str. (207 – 209), ožujak 2022.
- [10] Lj., Majdandžić, Solarni sustavi, Graphis, Zagreb, 2010.
- [11] HVAC/R & SOLAR, Characteristics of Solar radiation [online], HVAC/R & SOLAR, dostupno na: <https://hvac-eng.com/characteristics-of-solar-radiation/> , [27.3.2024.]
- [12] T., Rončević, Obnovljivi izvori energije: Fotonaponska elektrana, diplomski rad, 2018.
- [13] B., Agić, S., Grbeš, J., Šilić, Priroda 6, Profil Klett, Zagreb, 2020.
- [14] CE Bright Futures, Incident angle sunlight [online], CE Bright Futures, Portland 2023., dostupno na: <https://cebrightfutures.org/learn/incident-angle-sunlight> , [18.4.2024.]

- [15] Atria Designs, Reduce heat gain and glare a guide to sun control and shading devices [online], Atria Designs, Vancouver BC, 2022., dostupno na: <https://www.atriadesigns.ca/blog/reduce-heat-gain-and-glare-a-guide-to-sun-control-and-shading-devices> , [19.4.2024.]
- [16] Eko.Zagreb.hr, Fotonaponske ćelije [online], Eko.Zagreb.hr, Zagreb 2024., dostupno na: <https://eko.zagreb.hr/fotonaponske-celije/87> , [21.4.2024.]
- [17] NREL, Crystalline Silicon Cells, Photovoltaic Device Performance Calibration Services [online], NREL, Washington D.C. 2020, dostupno na : <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/cell-pv-eff-crysi.pdf> , [2.6.2024.]
- [18] FER Zagreb, Tehnologije solarnih ćelija [online], FER Zagreb, Zagreb 2017., dostupno na: [https://aolab.fer.hr/\\_download/repository/Tehnologije\\_solarnih\\_celija\\_20170127\\_ATS.pdf](https://aolab.fer.hr/_download/repository/Tehnologije_solarnih_celija_20170127_ATS.pdf) , [21.4.2024.]
- [19] DSNEG, DS New Energy, Advantages and disadvantages of GaAs solar cell [online], DSNEG, Hangzhou 2021., dostupno na: <https://www.dsnerg.com/info/advantages-and-disadvantages-of-gaas-solar-cel-54235610.html> , [22.4.2024.]
- [20] Kulišić, P.; Vuletin, J.; Zulim, I.: Sunčane ćelije, Školska knjiga, Zagreb, 1994.
- [21] FKIT Zagreb, Karakteristika solarne ćelije [online], FKIT Zagreb, dostupno na: [Karakteristika solarne celije.pdf \(unizg.hr\)](Karakteristika_solarne_celije.pdf) , [4.6.2024.]
- [22] I. Čurčić, Modeliranje fotonaponskih modula, diplomski rad, 2017.
- [23] D. Šljivac , D. Topić, Obnovljivi izvori električne energije, FERIT Osijek, 2018.
- [24] Sino Voltaics, Blocking diode and bypass diode for solar panels [online] , Sino Voltaics, Lausanne 2019., dostupno na: <https://sinovoltaics.com/learning-center/off-grid/blocking-diode-bypass-diode-solar-panels/> , [7.6.2024.]

## SAŽETAK

Ovaj rad istražuje utjecaj zasjenjenja na performanse fotonaponskih modula. Rad započinje pregledom literature u kojemu je objašnjeno kako zasjenjenje utječe na module. Obraduje se pojam Sunčeve energije te samih karakteristika Sunca i vrsta Sunčevih zračenja. Radom su prikazane i karakteristike fotonaponskih modula, vrste istih te matematički model fotonaponskog modula. Navedene su, imenovane i opisane fizikalne veličine ključne za razumijevanje funkcioniranja modula. Detaljno se opisuje način rada fotonaponskih modula prilikom zasjenjenja. Mjerenja su provedena u Laboratoriju za obnovljive izvore energije na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku te je navedena i opisana sva oprema korištena pri mjerenjima koja su bila potrebna za pisanje ovoga završnog rada. Analiza dobivenih rezultata prikazuje utjecaj korištenja zaobilaznih (bypass) dioda te se jasno vidi kako tankoslojni fotonaponski moduli imaju homogenije rezultate odnosno nema prevelikih oscilacija između pojedinih slučajeva zasjenjenja. Zaključno, zasjenjenje fotonaponskih modula ima veliku ulogu pri proizvodnji električne energije te je vrlo bitno pravilno odabrati lokaciju i vrstu modula pri projektiranju solarne elektrane kako bi se maksimizirala korisnost ulaganja.

**Ključne riječi:** sunčeva energija, fotonaponski moduli, zasjenjenje, proizvodnja električne energije, zaobilazne diode, učinkovitost

## **ABSTRACT**

This thesis investigates the impact of shading on the performance of photovoltaic (PV) modules. The study begins with a literature review explaining how shading affects the modules. It covers the concept of solar energy, characteristics of the Sun, and types of solar radiation. The thesis also presents the characteristics of photovoltaic modules, their types, and a mathematical model of a PV module. It lists, names, and describes the physical quantities essential for understanding how modules work. The thesis provides a detailed description of how photovoltaic modules operate under shading conditions. Measurements were conducted in the Renewable Energy Laboratory at the Faculty of Electrical Engineering, Computer Science, and Information Technology in Osijek, with a description of all equipment used for the measurements necessary for writing this thesis. The analysis of the results demonstrates the impact of using bypass diodes and shows that thin-film photovoltaic modules exhibit more homogeneous results, with less variation between different shading scenarios. In conclusion, shading of photovoltaic modules plays a significant role in electricity production, and it is crucial to properly select the location and type of modules when designing a solar power plant to maximize the return on investment.

**Key words:** solar energy, photovoltaic modules, shading, electricity generation, bypass diodes, efficiency

## **ŽIVOTOPIS**

Toni Bungić rođen je 19. ožujka 2003. godine u Osijeku. Nakon završetka osnovne škole Vladimira Nazora u Čepinu, upisuje III. Gimnaziju u Osijeku, a zatim 2021. godine upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, gdje trenutno pohađa treću godinu studija na smjeru elektrotehnika, elektroenergetika.