

# Pregled čimbenika koji utječu na proizvodnju električne energije fotonaponskih sustava

---

**Pastović, Davor**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2019**

*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:200:136606>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-11**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni studij**

**PREGLED ČIMBENIKA KOJI UTJEČU NA  
PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE  
FOTONAPONSKIH SUSTAVA**

**Diplomski rad**

**Davor Pastović**

**Osijek, 2019.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Osijek, 23.09.2019.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada**

<b>Ime i prezime studenta:</b>	Davor Pastović
<b>Studij, smjer:</b>	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
<b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>	D-1150, 23.09.2018.
<b>OIB studenta:</b>	79337893404
<b>Mentor:</b>	Doc.dr.sc. Danijel Topić
<b>Sumentor:</b>	
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	Doc.dr.sc. Goran Knežević
<b>Član Povjerenstva:</b>	Doc.dr.sc. Krešimir Fekete
<b>Naslov diplomskog rada:</b>	Pregled čimbenika koji utječu na proizvodnju električne energije fotonaponskih sustava
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak diplomskog rada:</b>	Dati osnovne podatke o fotonaponskim sustavima te trenutno stanje tržišta fotonaponskih sustava. Dati pregled čimbenika koji utječu na karakteristike fotonaponskih sustava kao što su temperatura, zasjenjenje, zaprljanje i sl. na temelju pregleda literature. Opisati na koji način svaki od tih čimbenika utječe na fotonaponske sustave. Dati usporedbu utjecajnih faktora.
<b>Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):</b>	Dobar (3)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 1 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
<b>Datum prijedloga ocjene mentora:</b>	23.09.2019.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

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

Osijek, 09.10.2019.

**Ime i prezime studenta:**

Davor Pastović

**Studij:**

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

D-1150, 23.09.2018.

**Ephorus podudaranje [%]:**

13

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Pregled čimbenika koji utječu na proizvodnju električne energije fotonaponskih sustava**

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

i sumentora

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

Potpis studenta:

## Sadržaj

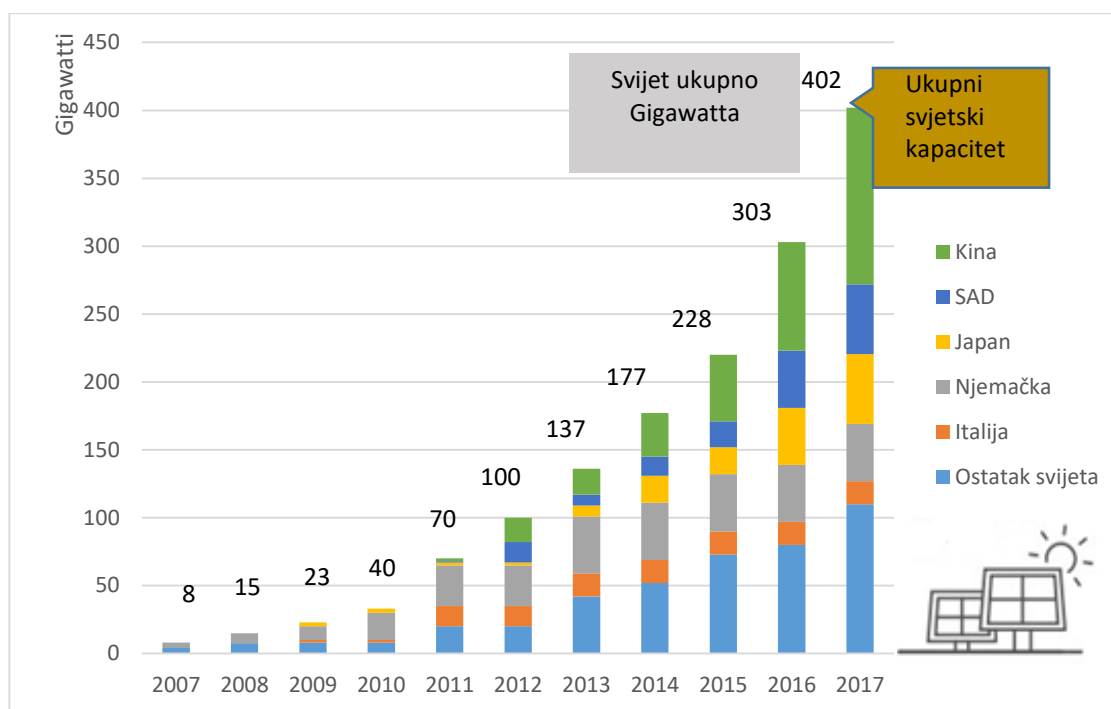
Sadržaj.....	4
1. UVOD.....	1
1.1 Opis zadatka .....	4
2. OSNOVNO O FOTONAPONSKIM SUSTAVIMA.....	5
2.1 Fotonaponska pretvorba i ćelije.....	5
2.2 Fotonaponski moduli i tipovi.....	8
2.3 Tipovi fotonaponskih sustava.....	10
2.4 I – U karakteristike.....	15
3. FAKTORI KOJI UTJEČU NA PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE/KARAKTERISTIKE FOTONAPONSKIH SUSTAVA.....	16
3.1 Temperatura i brzina vjetra.....	16
3.2 Intenzitet zračenja.....	22
3.3 Utjecaj zasjenjenja.....	33
3.4 Utjecaj zaprljanja.....	37
3.5 Utjecaj vlage .....	38
3.6. Utjecaj orijentacije i nagiba modula.....	40
4. PRORAČUN .....	42
5. ZAKLJUČAK.....	63
6. SAŽETAK/ABSTRACT .....	64
7. ŽIVOTOPIS.....	65
8. LITERATURA.....	66

## 1. UVOD

U ovome diplomskom radu opisat će se koji sve čimbenici i na koji način utječu na proizvodnju električne energije fotonaponskih sustava. Najprije, dat će se pregled stanja o fotonaponskim sustavima globalno, za europsku uniju i za Republiku Hrvatsku, prema zadnjim dostupnim podacima.

Globalno, u 2017. godini u svijetu je proizvedeno više električne energije iz fotonaponskih sustava nego u bilo kojoj godini do tada, te je instalirana snaga novih fotonaponskih sustava veća nego instalirana snaga novih elektrana na fosilna i nuklearna goriva.[1] Te godine, od svih obnovljivih izvora energije, fotonaponski sustavi bili su najčešće korišteni na nekoliko velikih svjetskih tržišta kao što su Kina, Indija, Japan i Sjedinjene Američke Države te je instalirano 98 GW fotonaponskih sustava, što znači da je ukupna instalirana snaga porasla za jednu trećinu te ih ima 402 GW za 2017. godinu, što se može vidjeti na slici 1.1.[1] U prosjeku, te godine instalirano je više od 40 000 solarnih panela po satu.[1] Najveći porast u proizvodni električne energije iz fotonaponskih sustava bilježi Kina i Indija koja je gotovo udvostručila svoje tržište.

Pet najvećih svjetskih tržišta – Kina, SAD, Indija, Japan i Turska su bile zaslužne za približno 84 % novih instaliranih kapaciteta. Sljedećih pet su bile Njemačka, Australija, Republika Koreja, Ujedinjeno Kraljevstvo i Brazil. Što se tiče ukupne instalirane snage vodeće zemlje su Kina, SAD, Japan, Njemačka i Italije, a čak ni Indija ne zaostaje previše za njima. Do kraja 2017. godine, svaki kontinent je instalirao najmanje 1 GW i najmanje 29 zemalja je imalo 1 GW ili više kapaciteta. Lideri u kapacitetu fotonaponskih sustava po glavi stanovnika bili su Njemačka, Japan, Belgija, Italija i Australija.



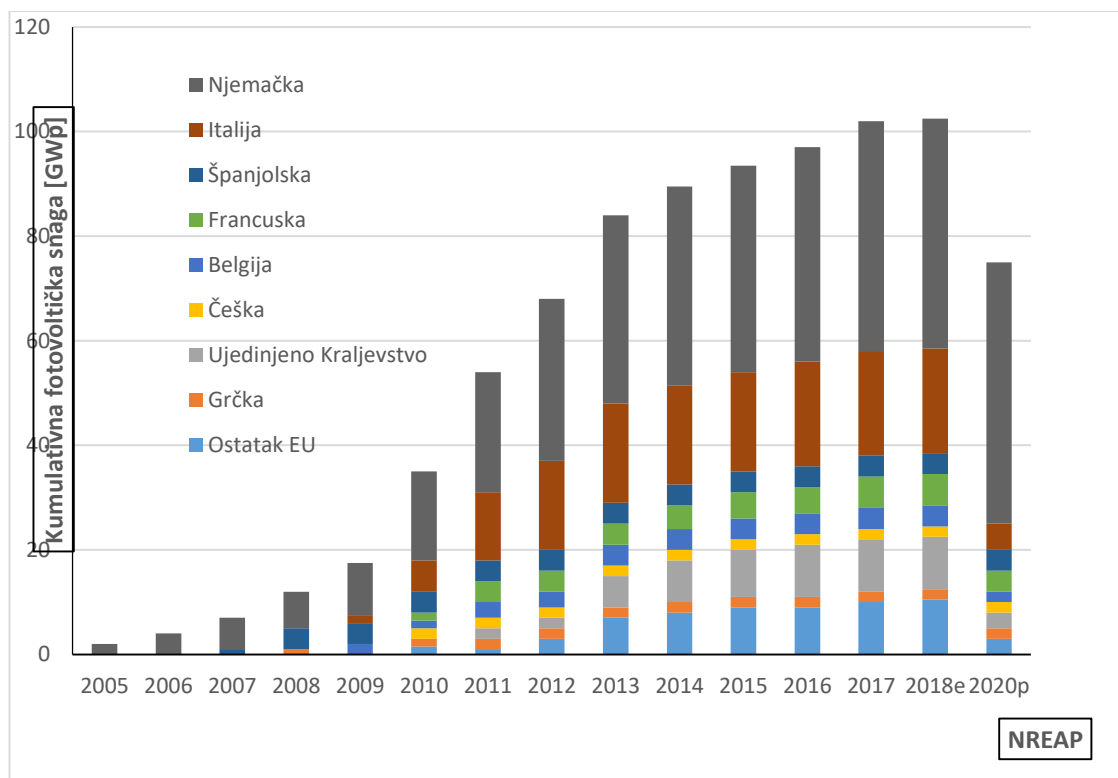
**Slika 1.1** Ukupna instalirana snaga fotonaponskih sustava za velika svjetska tržišta[1]

Prema političkom sporazumu o porastu uporabe obnovljivih izvora energije koji je postignut 14. lipnja 2018. godine od strane Europskog parlamenta, komisije i vijeća donesena je odluka da 32 % električne energije do 2030 godine treba biti dobiveno iz obnovljivih izvora uz podnošenje revizijske klauzule do 2023. godine.[2]

Što se tiče električnog sustava Europe u cjelini, prošle godine u Europskoj Uniji instalirano je 28,1 GW postrojenja za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora, dok je 12,1 GW postrojenja za proizvodnju električne energije iz neobnovljivih izvora povučen, što je rezultiralo sa 15 GW novih postrojenja na obnovljive izvore. Obnovljivi izvori energije obuhvaćaju 23,7 GW ili 84,5 % od svih kapaciteta proizvodnje električne energije nove generacije. Fotonaponski sustavi obuhvaćaju 5,9 GW ili 21 % kapaciteta nove generacije te su na drugom mjestu. Na prvom mjestu je energija vjetra sa 15 GW, a uz njih još prednjače hidroenergija sa 1,1 GW te energija biomase sa 0,96 GW.[5]

Od 2005. godine kapaciteti proizvodnje električne energije iz fotonaponskih sustava su porasli od 1,9 GW do 108 GW do kraja 2017. godine. Već 2014. godine „Nacionalni plan obnovljivih izvora energije 2020 (engl. *National Renewable Energy Action Plan – NREAP*)“, prema kojem su kapaciteti trebali biti 83,7 GW premašen je, dosegovši 88,4 GW. Sa sveukupnim instaliranim kapacitetima od 108 GW EU je izgubila utrku na svjetskom tržištu, predstavljajući sada samo 26 % od globalnih 408 GW proizvodnje električne energije iz fotonaponskih sustava na kraju 2017. godine. To je značajan pad u odnosu na 2012. godinu kada je taj postotak iznosio 66 %.[5]

Instalirani kapaciteti fotonaponskih sustava u EU na kraju 2017. godine mogu proizvoditi oko 120 TWh električne energije ili 4,5 % od ukupne električne energije u uniji. Na slikama 1.2 i 1.3 možemo vidjeti kapacitete fotonaponskih sustava u europskoj uniji spojenih na mrežu i godišnju instalaciju fotonaponskih sustava.[5]

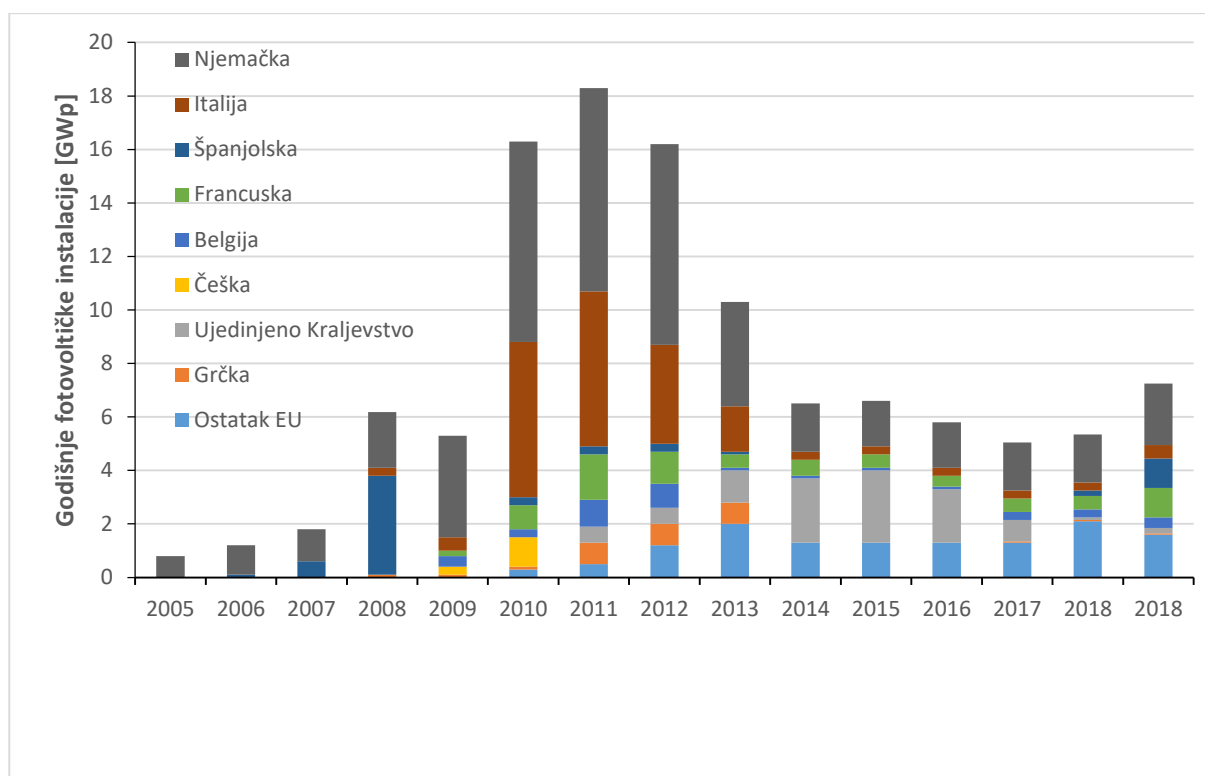


**Slika 1.2** Kapaciteti fotonaponskih sustava u EU spojenih na mrežu[5]

Hrvatska je zemlja koja ima velik potencijal kada je u pitanju proizvodnja električne energije iz fotonaponskih sustava. Taj potencijal posebice dolazi do izražaja u južnom dijelu zemlje (1100 – 1330 kWh po instaliranom kWp snage), dok je u sjevernom i istočnom dijelu nešto manji (1000 – 1100 po instaliranom kWp snage).

Prema izvještajima Hrvatskog operatora tržišta energije (HROTE), ukupna instalirana snaga fotonaponskih sustava u Hrvatskoj iznosila je 52,43 MW na kraju 2018. godine. Također, potpisana su tri projekta instalirane snage 1 MW, ali još uvijek nisu izvršena.





*Slika 1.3 Godišnja instalacija fotonaponskih sustava u EU[1]*

## 1.1 Opis zadatka

Dati osnovne podatke o fotonaponskim sustavima te trenutno stanje tržišta fotonaponskih sustava. Dati pregled čimbenika koji utječu na karakteristike fotonaponskih sustava kao što su temperatura, zasjenjenje, zaprljanje i sl. na temelju pregleda literature. Opisati na koji način svaki od tih čimbenika utječe na fotonaponske sustave. Dati usporedbu utjecajnih faktora.

## 2. OSNOVNO O FOTONAPONSKIM SUSTAVIMA

### 2.1 Fotonaponska pretvorba i ćelije

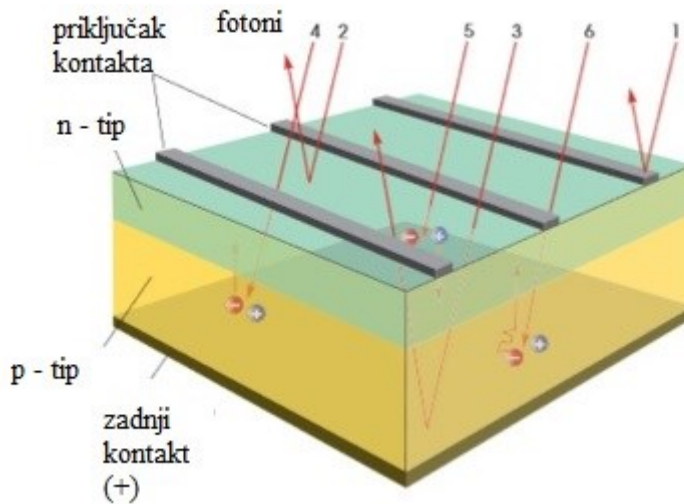
„Fotonaponska pretvorba je izravna pretvorba sunčeve svjetlosti u električnu struju. Sunčevo svjetlo se sastoji od fotona, a energija fotona iznosi  $E = h \cdot \nu$ , gdje je  $h$  Planckova konstanta ( $6.625 \cdot 10^{-34}$  Js), a  $\nu$  frekvencija fotona koja je obrnuto proporcionalna valnoj duljini. Kada fotoni pogode FN ćeliju, oni mogu proći direktno kroz nju, reflektirati se ili biti apsorbirani (upijeni). Samo apsorbirani fotoni omogućuju fotonaponski efekt, odnosno proizvodnju električne struje“.[12]

Dva osnovna tipa uređaja su fotonaponske ćelije koje su izrađene od poluvodičkog materijala (najčešće silicija), kod njih je za gibanje oslobođenih elektrona potreban vanjski izvor energije, odnosno ovise o intenzitetu sunčevog zračenja i foto članak ili foto element koji predstavlja zaporni sloj između poluvodičke elektrode malog izlaznog rada i metalne podloge.

Apsorbiranjem sunčevog svjetla u poluvodiču elektroni se istiskuju iz atoma materijala i sele se na površinu te se oblikuju u šupljine. Kako elektroni putuju prema prednjoj površini ćelije, dolazi do neravnoteže između prednje i stražnje strane ćelije te se stvara naponski potencijal, slično kao kod baterije.

Postoje poluvodiči p – tipa koji imaju slobodne elektrone, nastaju kada se kristal silicija (4 valentna elektrona) dozira 3-valentnim borom i poluvodiče n – tipa koji imaju slobodne šupljine (manjak elektrona) i nastaju dopiranjem silicija 5-valentnim fosforom. Na njihovom spoju je neutralno područje sa električnim poljem i da bi foton u sudaru prebacio elektron kroz to polje treba dobiti najmanje energiju jednaku tom polju. Ta energija se zove energija praga ili energija zabranjenog pojasa. Dakle, svi fotoni koji imaju energiju manju od potrebne ne mogu ostvariti foto efekt.

Na slici 2.1 prikazana je osnovna struktura fotonaponske ćelije.

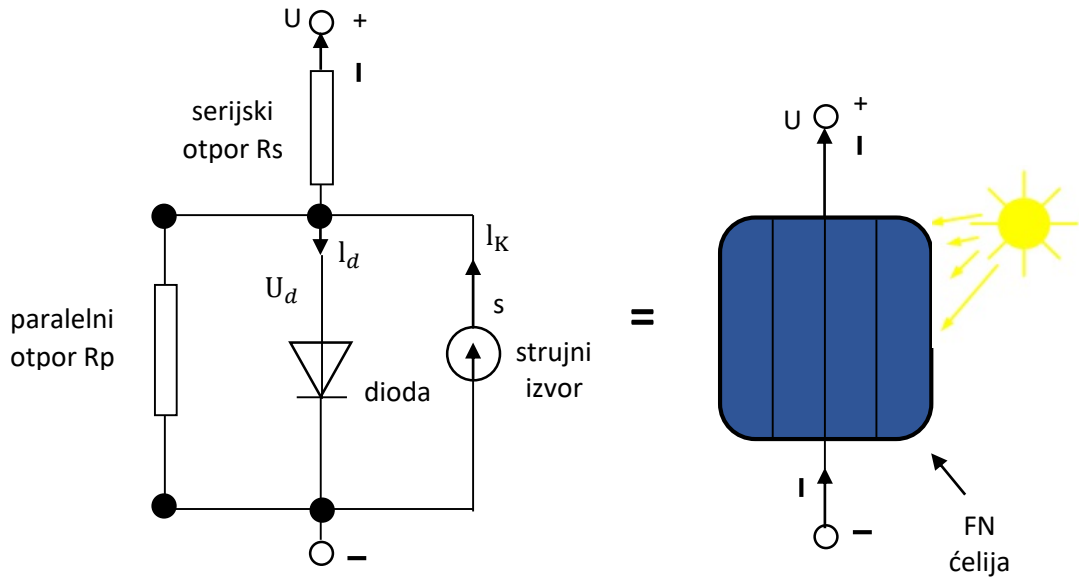


*Slika 2.1. Struktura fotonaponske ćelije[3]*

Na slici se vidi da se na vrhu nalazi nekoliko metalnih kontakata sa negativne strane ćelije. Nakon toga dolazi poluvodički materijal n – tipa koji se povezuje sa debljim slojem p – tipa poluvodiča kako bi došlo do foto efekta. I na kraju se nalazi stražnji kontakt kao pozitivna strana ćelije. Inače, debljina ćelije od vrha prema dnu je manja od 3 mm.[3]

Maksimalan stupanj djelovanja fotonaponskih ćelija ograničen je na oko 35 % zbog sljedećih nekoliko razloga :[12]

- „Gubici energija fotona manjih od zabranjenog pojasa 20,2%
- Gubici energije fotona većih od zabranjenog pojasa 30,2%
- Gubici zbog ograničenja napona na veličinu manju od  $E_g/e$ , gdje je  $E_g$  donja granična energija, a  $e$  jedinični naboj elektrona, npr. kod Silicija  $E_g/e = 0,8$  V, a gubici 12 %
- Gubici iz dodatnih termodinamičkih razloga vezani uz omjer struje kratkog spoja i napona otvorenog kruga, tj. praznog hoda (za Silicij kod omjera 0,9 gubici su oko 3%“



*Slika 2.2. Nadomjesna shema fotonaponske ćelije*

Jednadžba za struju fotonaponske ćelije:[11]

$$I = I_{fs} - I_d - I_p = I_{fs} - I_0 \cdot \left[ e^{\frac{e(U+IR_s)}{mkT}} - 1 \right] - \frac{U}{R_p} \quad (2 - 1)$$

„Ako se zanemari serijski i paralelni otpor“:[11]

$$I = I_{fs} - I_0 \cdot \left[ e^{\frac{e(U+IR_s)}{mkT}} - 1 \right] \quad (2 - 2)$$

gdje je:[11]

- „ $I$  – struja ekvivalentnog sklopa
- $I_{fs}$  – foto struja
- $I_d$  – struja diode
- $I_p$  – struja kroz paralelni otpor
- $U$  – napon

- $R_p$  – paralelni otpor fotonaponske ćelije
- $I_0$  – struja zasićenja
- $e$  – elementarni naboj,  $e=1,602176462 \cdot 10^{-19}$  [As]
- $R_s$  – serijski otpor fotonaponske ćelije
- $m$  – parametar fotonaponske ćelije,  $m = 1$
- $k$  – Boltzmanova konstanta,  $k=1,3806 \cdot 10^{-23}$  [J/K]
- $T$  – apsolutna temperatura“

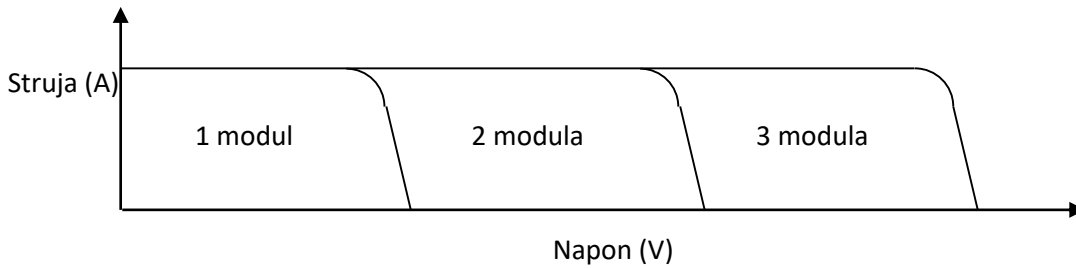
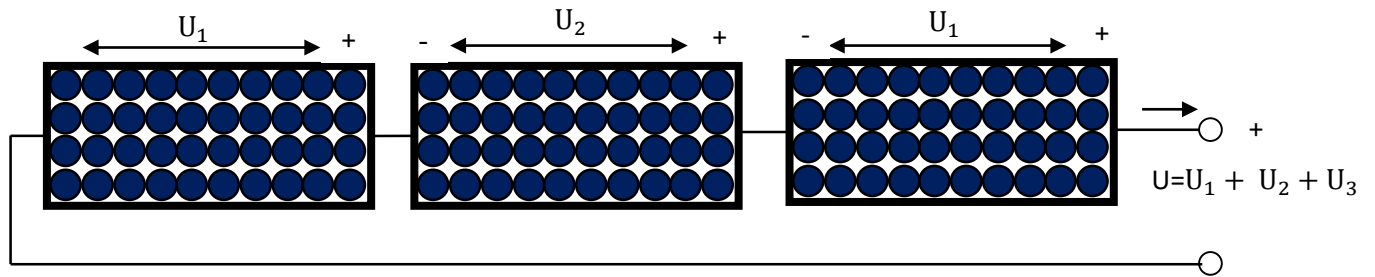
## 2.2 Fotonaponski moduli i tipovi

Fotonaponske ćelije proizvode snagu od 1 do 2 W, uz napone od oko 0,6 V, što je jako malo. Stoga se ćelije povezuju u module. Tehničke karakteristike modula su uglavnom kao i kod ćelija. Spajanjem ćelija u module znatno se poboljšavaju uporabna svojstva kao što su jednostavnost rukovanja, održavanja, otpornost na vanjske utjecaje itd.[12]

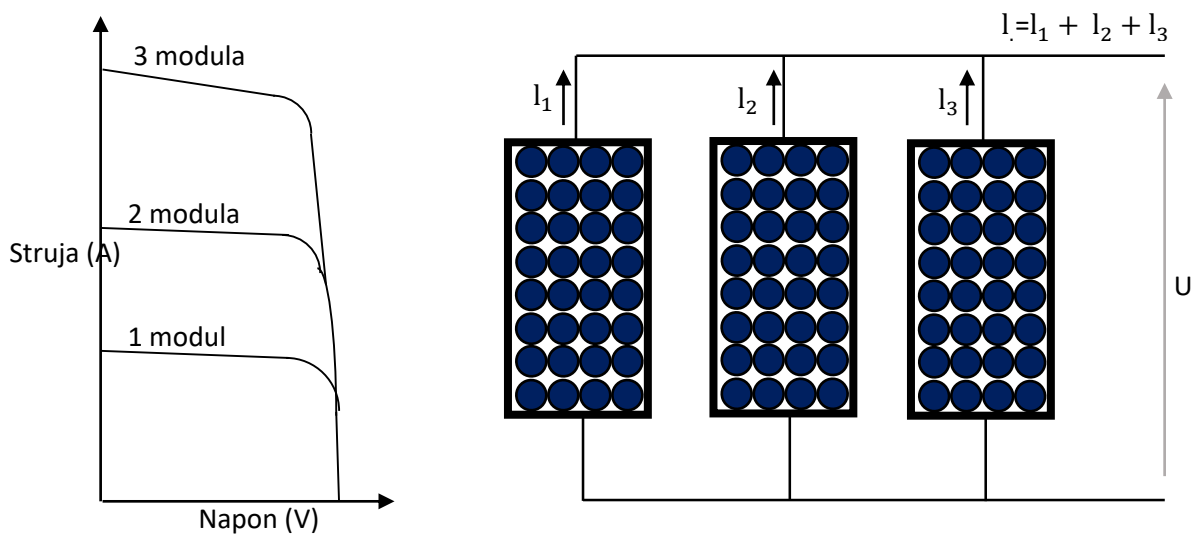
Tehničke karakteristike fotonaponskih modula:[12]

- „nazivna vršna snaga  $P_{MPP}$  (Wp)
- učinkovitost  $\eta$  (%)
- napon praznog hoda UPH (V); struja kratkog spoja IKS (A)
- napon vršne snage UMPP (V); struja vršne snage IMPP (A)
- smanjenje snage zbog povećanja temperature  $\beta$  (V/0C) ili nekada u (%/0C).
- smanjenje napona zbog povećanja temperature  $\alpha$  (%/0C)
- duljina x širina x visina (mm x mm x mm)
- masa  $m$  (kg)“

Moduli se mogu dalje spajati kako bi oblikovali niz. Na slikama 2.2 i 2.3 mogu se vidjeti serijski i paralelni spoj fotonaponskih modula.



*Slika 2.3. Serijski spoj fotonaponskih modula i pripadajuća  $U - I$  karakteristika*



*Slika 2.4. Paralelni spoj fotonaponskih modula i pripadajuća  $U - I$  karakteristika*

Tipovi fotonaponskih modula:[13]

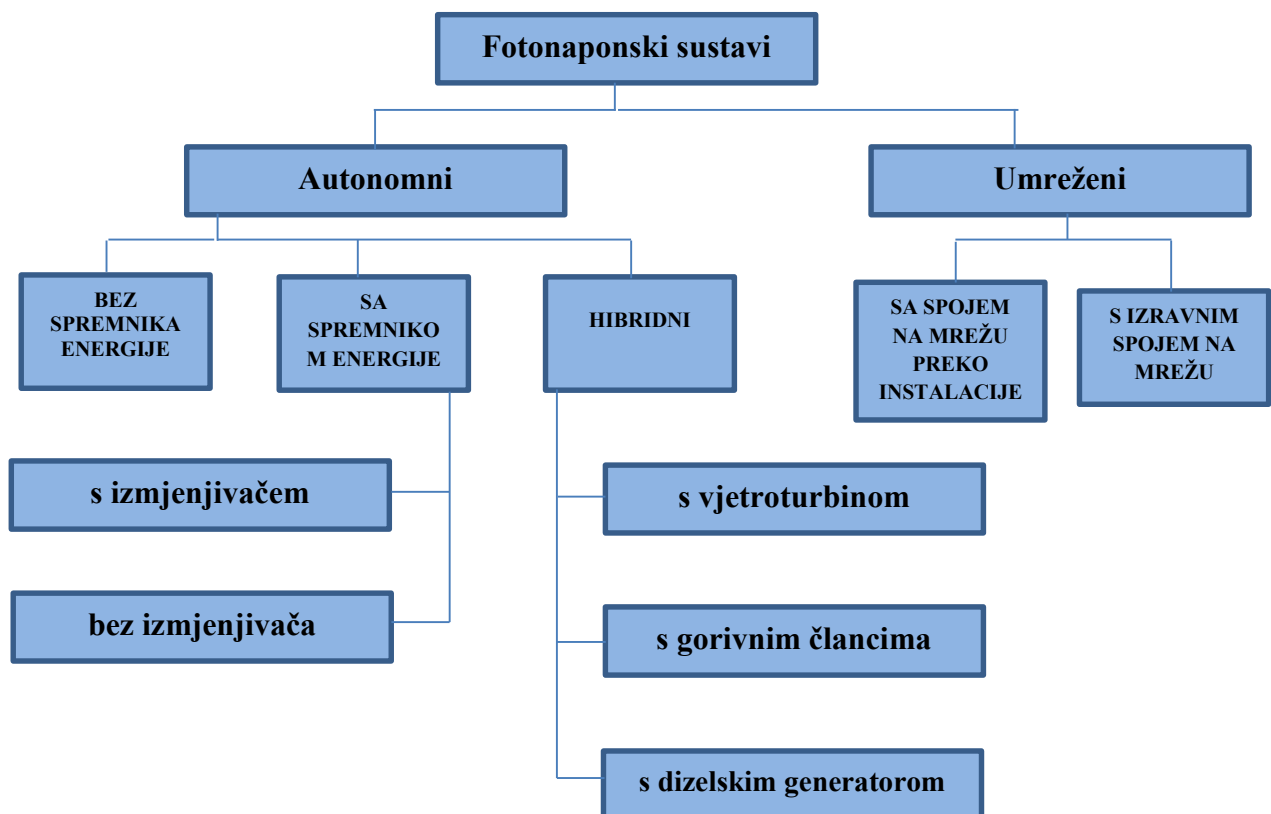
1. „Silicij (Si) - uključujući mono kristalni silicij (c-Si), poli kristalni silicij (p-Si) te amorfni silicij (a-Si)

2. **Poli kristalni tanko slojni materijali** - (poli kristalni tanki film) – uključujući CIS spoj poluvodičkih materijala (Bakar-Indij-Diselenid), CdTe (Kadmij-Telurid) te tankoslojni silicij (većinom amorfni silicij)
3. **Mono kristalni tanko slojni materijali** - (mono kristalni tanki film) – većinom izvedeni od Galij-Arsenida (Ga-As)
4. **Multijunction strukture materijala** - kombinacije raznih poluvodičkih materijala“

### 2.3 Tipovi fotonaponskih sustava

Postoje dva osnovna tipa fotonaponskih sustava, a to su :

- Fotonaponski sustavi koji nisu priključeni na mrežu (engl. *off grid*), često se još zovu samostalni, otočni ili autonomni sustavi
- Umreženi (engl. *on grid*) sustavi, odnosno fotonaponski sustavi priključeni na javnu elektroenergetsku mrežu



*Slika 2.5. Osnovna podjela fotonaponskih sustava*

Otočni sustavi su oni u kojima se proizvodi električna energija za pokrivanje potreba potrošača koji nisu priključeni na javnu elektroenergetsku mrežu (vikendice, objekti van naselja itd.).

Otočne fotonaponske sustavu nužno je opremiti spremnikom energije, odnosno akumulatorom, zato što proizvodnja električne energije uvijek mora odgovarati potrošnji, što nije čest slučaj kod ovakvog tipa sustava.

Otočni sustavi mogu proizvoditi istosmjernu struju, ali i izmjeničnu uz primjenu izmjenjivača.

Tri osnovna tipa otočnih fotonaponskih sustava :

1. Direktni otočni sustav
2. Otočni sustav sa spremnikom energije
3. Hibridni otočni sustav

„Direktni otočni sustav je onaj u kojemu je fotonaponski modul izravno spojen sa trošilom. Često se mogu vidjeti na malim pumpama, malim motorima, pomoćnim ventilatorima itd. koji rade na istosmjernu struju. Glavna mu je prednost jednostavnost i laka montaža. Primjenjuje se tamo gdje promjene osunčanja i neujednačena proizvodnja struje u fotonaponskom modulu nema štetnih posljedica na istosmjernom trošilu. Također, karakteristike modula i trošila moraju biti usklađene“.[13]

„Otočni sustav sa spremnikom energije (baterijom) unaprijed je prilagođen varijacijama između prevelike i premale proizvodnje struje u modulima i neujednačenim potrebama trošila tijekom dana. Takav sustav sadrži nekoliko elemenata“ :[13]

- „Fotonaponski modul
- Punjač baterija
- Regulator punjenja
- Bateriju
- Trošilo“

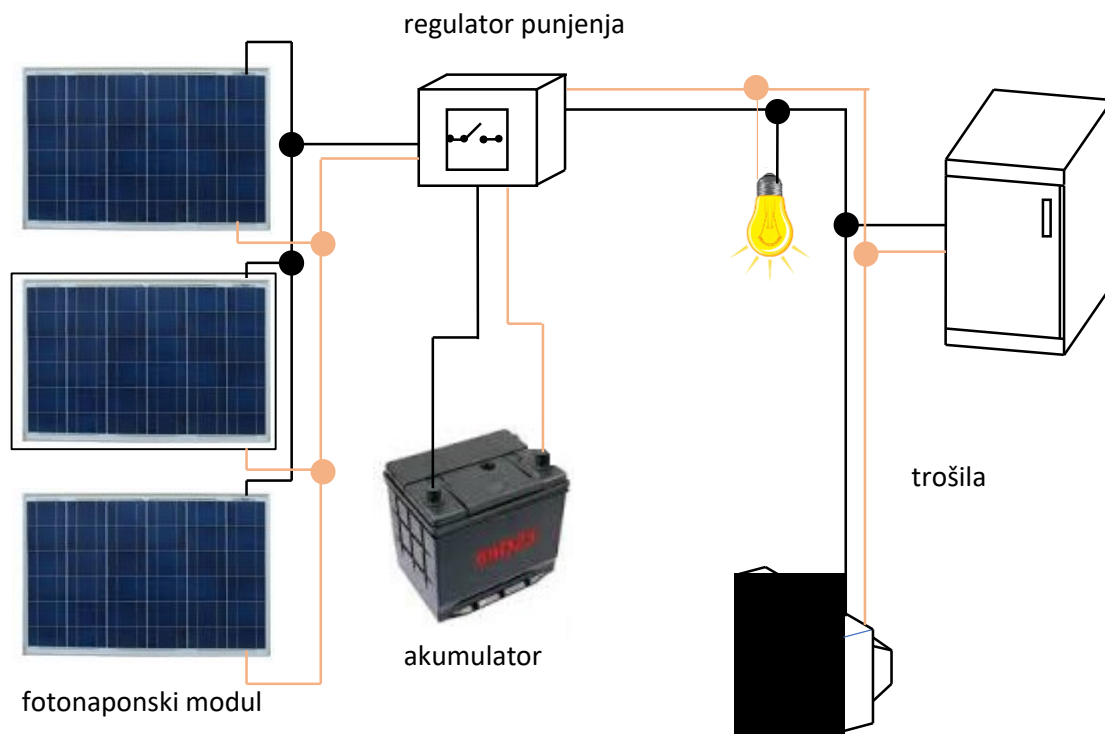
„Hibridni otočni sustav je onaj kod kojeg fotonaponski modul nije jedini izvor energije. Tu je najčešće pomoćni generator, a u nekim situacijama moguća je i dopuna iz javne mreže. Sunce je primarni izvor energije, a sve ostalo je pripomoć u neprikladnim uvjetima“.[14] Tu se najbolje uklapaju pomoćni uređaji s pogonom na prirodne ili obnovljive izvore energije.

Sastavni dijelovi otočnog fotonaponskog sustava :[13]

- „Solarni generator
- Priključni ormarić



- Akumulatori
- Regulator punjenja
- Spoj na trošila
- Izmjenjivač (ukoliko su trošila na izmjeničnu struju)“



*Slika 2.6. Otočni fotonaponski sustav za trošila na istosmjernu struju*

„Umreženi fotonaponski sustavi su oni u kojima se električna energija proizvodi za pokrivanje potreba objekata koje obuhvaća taj sustav (obiteljske kuće, stambene zgrade) i javne elektroenergetske mreže. Umreženi sustavi su opremljeni izmjenjivačem, jer proizvode izmjeničnu struju. Izmjenjivač pretvara istosmjernu struju solarnog generatora u izmjeničnu te ju sinkronizira s naponom i frekvencijom mreže“.[13]

Sastavni dijelovi umreženih fotonaponskih sustava :[13]

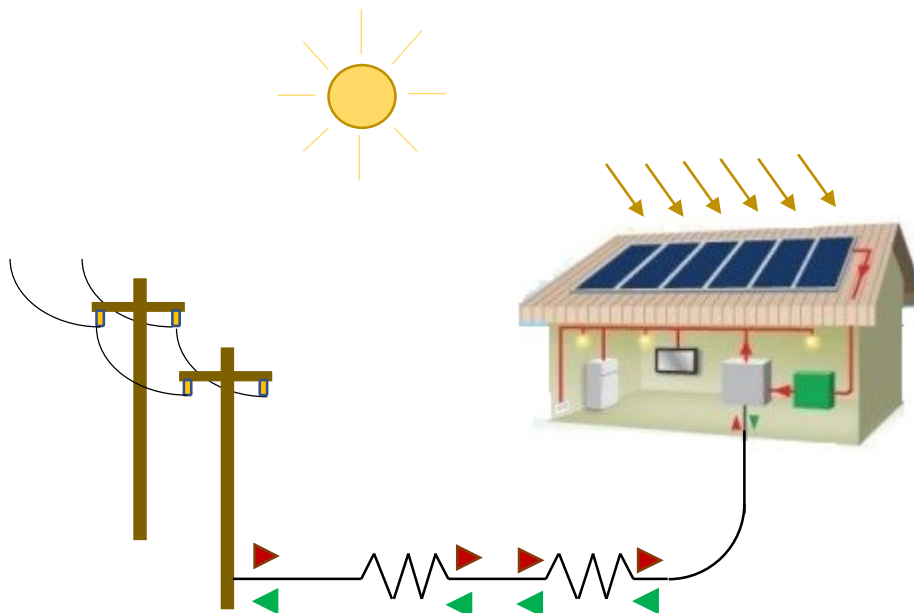
- „Fotonaponski moduli
- Solarni generator
- Priključni ormarić

- Razvod istosmjerne struje
- Glavni prekidač istosmjerne struje
- Izmjenjivač
- Razvod izmjenične struje
- Razvodni ormarić sa zaštitnim i regulacijskim elementima te dvosmjernim električnim brojilom
- Priključak na javnu elektroenergetsku mrežu“

„Umreženi sustavi otklanjaju nedostatke otočnih sustava, a to je nemogućnost usklađivanja proizvodnje i potrošnje, što zahtjeva korištenje skupih akumulatora. Spremnik električne energije kod umreženih sustava čini javna elektroenergetska mreža. Dakle, kada je proizvodnja nedostatna za pokrivanje vlastitih potreba, energija se uzima iz mreže, a kada je proizvodnja električne energije u solarnom generatoru veća od vlastitih potreba objekta, viškovi se isporučuju u mrežu“.[13]

Kod umreženih sustava odabir izmjenjivača od izuzetne je važnosti, jer može doći do problema kod pretvorbe istosmjerne struje u izmjeničnu, kao što su usklađivanje frekvencija, faza i napona na izlazu iz izmjenjivača s vrijednostima iz mreže.

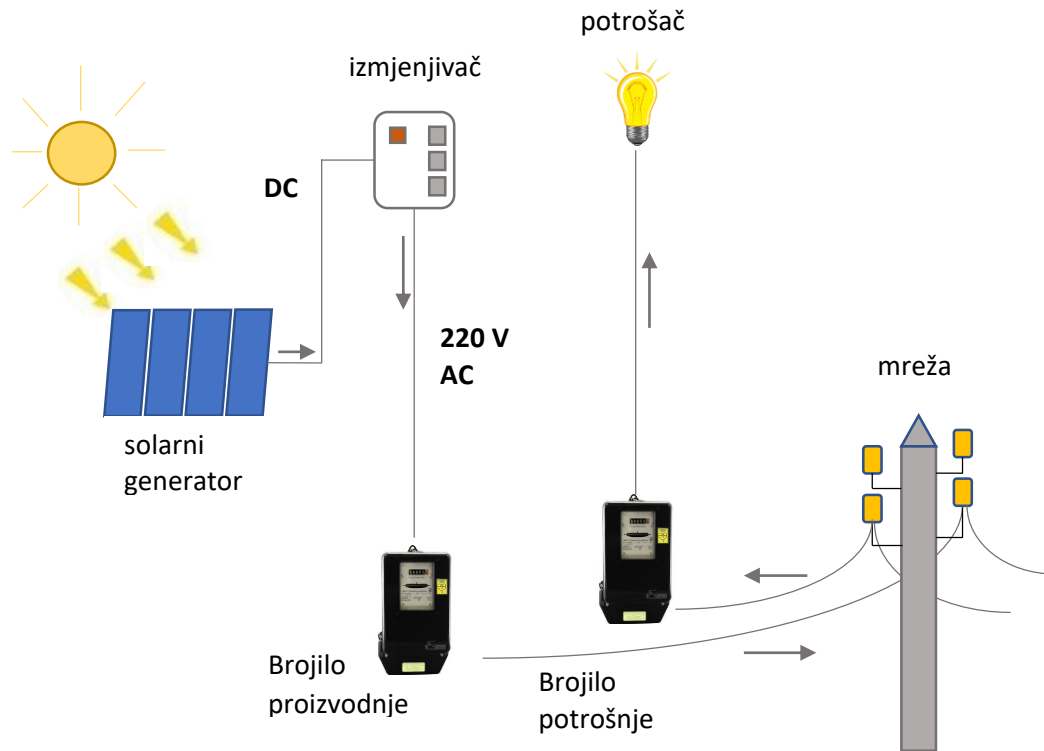
Umreženi sustavi mogu biti priključeni na javnu mrežu izravno ili preko kućne instalacije.



*Slika 2.7. Fotonaponski sustav priključen na javnu mrežu preko kućne instalacije*

„Fotonaponski sustavi priključeni na javnu mrežu preko kućne instalacije pripadaju distribuiranoj proizvodnji električne energije i u paralelnom su spoju s mrežom. Oni tako

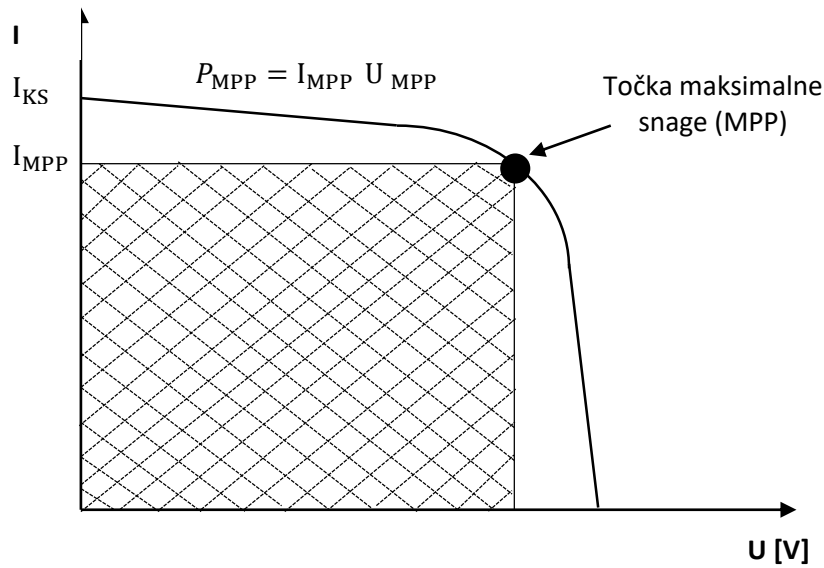
omogućuju povezivanje distribuiranih sustava na centralizirane sustave, odnosno sustave priključene uglavnom na niskonaponsku razinu elektroenergetskog sustava. Takvi se sustavi obično mogu podijeliti na one do 30 kW, od 30 kW do 100 kW i preko 100 kW, dok u Hrvatskoj vrijedi podjela prema instaliranoj snazi do 10 kW, od 10 kW do 30 kW i preko 30 kW“.[13]



**Slika 2.8.** Fotonaponski sustav izravno priključen na javnu elektroenergetsku mrežu

„Posljedično razvoju tržišta fotonaponske tehnologije, fotonaponski se sustavi počinju ugrađivati ne samo na građevinama ili u njihovoj neposrednoj blizini, nego i na slobodnim površinama u blizini elektroenergetske mreže do priključka na nisku, srednju ili visoku razinu napona elektroenergetskog sustava. Ti su sustavi priključeni na javnu elektroenergetsku mrežu i svu proizvedenu električnu energiju predaju izravno u elektroenergetski sustav“.[13]

## 2.4 I – U karakteristike

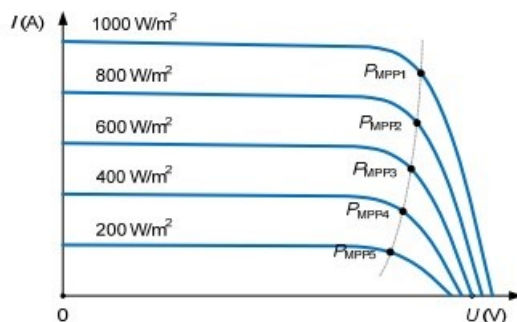


**Slika 2.9.** Strujno - naponska karakteristika FN ćelija pod osvjetljenjem

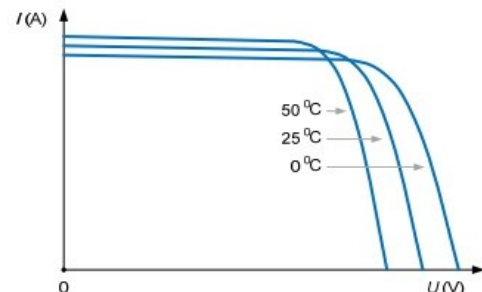
Na strujno – naponskoj karakteristici FN ćelije mogu se vidjeti tri karakteristične točke :[12]

1. „Točka kratkog spoja: struja kratkog spoja  $I_{KS}$  – struja pri kratko spojenim stezaljkama fotonaponske ćelije. Tada je napon  $U=0$ , a struja kratkog spojka je Strujno-naponska (I-U) karakteristika FN ćelije napon  $U=0$ , a struja kratkog spojka je jednaka foto struji,  $I_{KS}=I_{fs}$ .
2. Točka praznog hoda (otvorenog kruga): napon praznog hoda  $U_{PH}$  – napon otvorenih stezaljki fotonaponske ćelije  

$$U_{PH} = \frac{k \cdot T}{e} \ln\left(\frac{I_{KS}}{I_0} + 1\right)$$
3. Točka maksimalne snage (MPP)“.



**Slika 2.10.** Strujno naponska karakteristika FN ćelije u ovisnosti o jakosti sunčevog zračenja



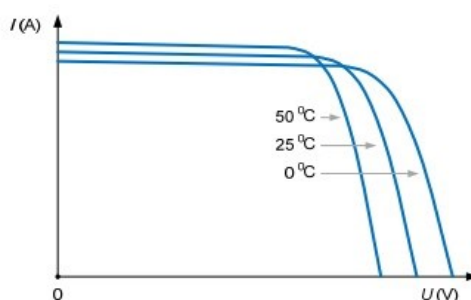
**Slika 2.11.** Strujno naponska karakteristika FN ćelije u ovisnosti o radnoj temperaturi

### 3. FAKTORI KOJI UTJEČU NA PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE/KARAKTERISTIKE FOTONAPONSKIH SUSTAVA

#### 3.1 Temperatura i brzina vjetra

Sunčevo zračenje ima najveći utjecaj na proizvodnju električne energije iz fotonaponskih sustava. Pored zračenja na proizvodnju električne energije utjecaj imaju i drugi vremenski uvjeti kao što su okolna temperatura i drugi koji će biti navedeni u ovom poglavlju. Temperatura fotonaponskih modula je pod utjecajem okolne temperature, naoblake i brzine vjetra, dok stopa promjene temperature ovisi o materijalu i poziciji fotonaponskog modula.

Valja primijetiti da je promjena temperature fotonaponske ćelije izuzetno osjetljiva na promjene brzine vjetra koja predstavlja jedan od najbitnijih utjecajnih faktora na temperaturu ćelije, više nego smjer vjetra. Poznato je da kako temperatura ćelije raste, napon ćelije opada, a odgovarajuća struja je u blagom porastu, što smanjuje izlaznu snagu solarnog generatora što se može vidjeti na slici 3.1.

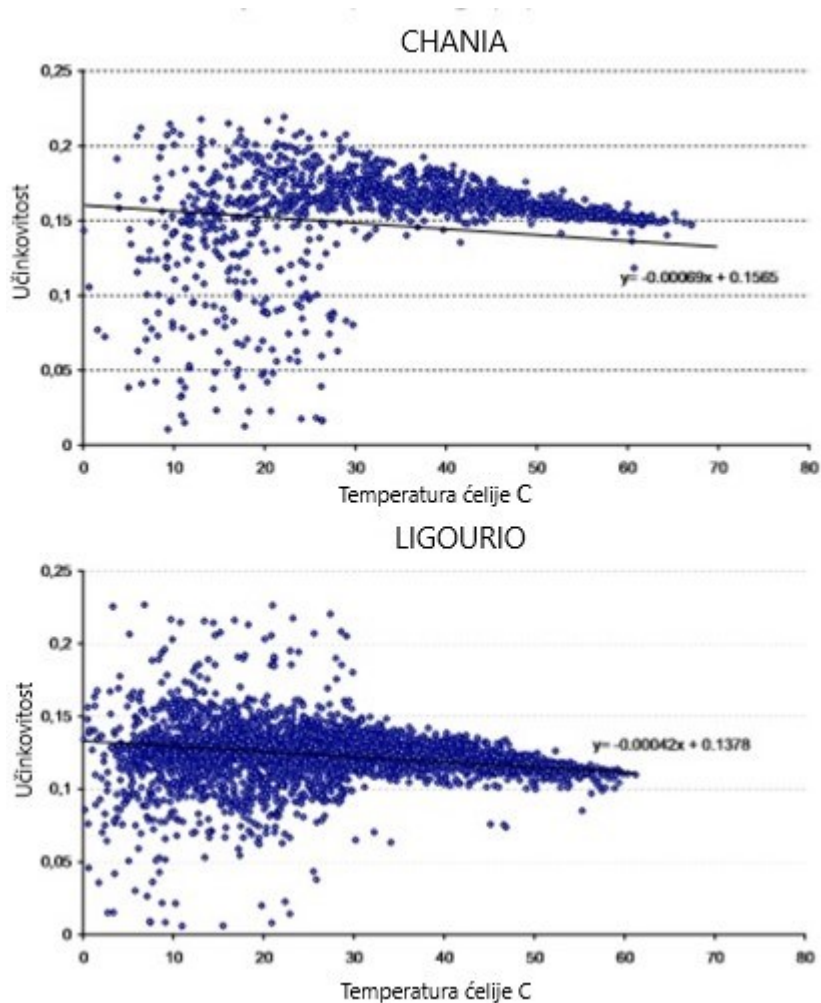


*Slika 3.1 Strujno – naponska karakteristika fotonaponskih modula pri različitim temperaturama ćelije*

Proizvođači fotonaponskih modula predviđaju učinkovitost prema nominalnoj radnoj temperaturi ćelije (NOCT – Nominal operating cell temperature) , gdje se temperatura ćelije mjeri u otvorenom krugu kada je okolna temperatura 20 °C, intenzitet sunčevog zračenja 0,8 kW/m<sup>2</sup> i brzina vjetra 1 m/s; T<sub>NOCT</sub> inače poprima vrijednost od oko 45 °C, uključujući također i neke druge koeficijente napona i struje kao funkcija temperature ćelije. Dakle, povećanjem temperature ćelije, može se očekivati pogoršanje u performansama fotonaponskih modula.

Prema istraživanju Soft Energy Applications and Environmental Protection Lab, vidi se utjecaj na učinkovitost fotonaponskih modula kako temperatura ćelija raste. Prikazani podaci odnose se na dvije instalacije srednje veličine (80 – 150 kWp) postavljenih na jugu Grčke i prikazuju značajno opadanje učinkovitosti kako temperatura ćelija raste (Slika 3.2).[6]

### 3. FAKTORI KOJI UTJEČU NA PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE/KARAKTERISTIKE FOTONAPONSKIH SUSTAVA



*Slika 3.2. Dvije instalacije na jugu Grčke u pokrajinama Chania i Ligourio[6]*

Učinkovitost fotonaponske ćelije u ovisnosti o temperaturi[6]:

$$\eta_C = \eta_{T_{ref}} [1 - \beta_{ref} (T_C - T_{ref})] \quad (3 - 1)$$

, gdje je :

$\eta_{T_{ref}}$  – električna učinkovitost modula

$T_{ref}$  – referentna temperatura

$\beta_{ref}$  – temperaturni koeficijent koji se odnosi na materijal ćelije

$T_C$  – radna temperatura ćelije/modula

Prema rezultatima različitih eksperimenata (provedenih korištenjem umjetne svjetlosti i ventilatora) koji su provedeni u unutarnjim uvjetima, izlazna snaga fotonaponskog modula opada za oko 0,5% po C kako temperatura ćelije raste. (0,5%/C). Međutim, ovo smanjenje također

### 3. FAKTORI KOJI UTJEČU NA PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE/KARAKTERISTIKE FOTONAPONSKIH SUSTAVA

ovisi i o materijalu od kojeg je fotonaponski modul izrađen. Također, prethodne studije su pokazale da temperaturni utjecaj na performanse fotonaponskih modula je puno ozbiljniji za c-Si module, koji trenutno imaju najveću primjenu na tržištu fotonaponskih sustava, nego za tanke filmove (kadmij teluridne(CdTe) i bakar, indij, galij, diselenide (CIGS)) ili solarne ćelije od amorfnog silicija. Opadanje efikasnosti ćelija od multi kristalnog silicija(m-Si) i ćelija od tankih filmova je od 15% do 5%, kako temperatura modula raste od 300 K do 330 K(27 C-57 C). Najniži temperaturni koeficijent snage, odnosno najmanji utjecaj na performanse od približno 0,20 % smanjenja po K je kod ćelija od amorfnog silicija, dok su brojna istraživanja pokazala da visoka radna temperatura modula može poboljšati performanse modula od amorfnog silicija zbog toplinskog žarenja.[6]

**Tablica 3.1** Temperaturni koeficijenti različitih tehnologija izrade fotonaponskih ćelija[6]

Tehnologija	Temperaturni koeficijent(%/K)
Mono-c-Si	0,40
Multi-c-Si	0,45
a-Si	0,20
a-Si/ $\mu$ c-Si	0,26
CIGS	0,36
CdTe	0,25

Prema podacima jednog eksperimenta za temperaturni utjecaj na učinkovitost fotoelektrične pretvorbe i izlaznu snagu termo osjetljivih solarnih ćelija(DSSCs) kod kojeg je mjerni temperaturni raspon bio od 5 C do 80 C u intervalima od 10 C, rezultati su pokazali da opadajuća stopa izlazne snage ima rastući trend kako temperatura raste, za maksimalne vrijednosti smanjenja unutar ispitivanog temperaturnog ranga iznosi 55 %.[6]

#### Teorijska analiza

Izlazna snaga P fotonaponske instalacije određena je sljedećim izrazom [6]:

### 3. FAKTORI KOJI UTJEČU NA PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE/KARAKTERISTIKE FOTONAPONSKIH SUSTAVA

---

$$P = \eta \cdot G_T \cdot A_C \quad (3 - 2)$$

, gdje je :

$A_C$  – površina fotonaponskog panela

$G_T$  – jakost Sunčevog zračenja

$\eta$  - učinkovitost fotonaponskog generatora,

gdje učinkovitost fotonaponskog generatora ovisi o različitim faktorima, kao što su Sunčevo zračenje, sustav za praćenje (zbog kuta Sunčevog zračenja na površinu kolektora), proizvodne karakteristike fotonaponskih komponenti, nakupljanju prljavštine itd.

Stvarna učinkovitost instalacije  $\eta$  (ekvivalentna sa učinkovitošću ćelije  $\eta_C$ ) dana je sljedećim izrazom [6] :

$$\eta = \eta_0 - \delta\eta \quad (3 - 3)$$

, gdje je:

$\eta_0$  – učinkovitost generatora (NOCT)

$\delta\eta$  - pad učinkovitosti izazvan temperaturom

Jedna od glavnih jednadžbi za analizu energetske ravnoteže fotonaponskih panela je: [6]

$$\cdot (T_C - T_a) = G_T \cdot (\tau \cdot \alpha - \eta) \quad (3 - 4)$$

, gdje je:

$T_C$  – temperatura ćelije

$T_a$  – okolna temperatura

$\alpha$  – koeficijent apsorpcije Sunčevog zračenja

$\tau$  – propusnost fotonaponske površine (uobičajena vrijednost  $\tau \cdot \alpha \approx 0,9$ )

$U$  – faktor toplinskog gubitka (ukupni koeficijent gubitka topline), koji se odnosi također na način ugradnje modula

$\eta$  - učinkovitost ćelija



### 3. FAKTORI KOJI UTJEČU NA PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE/KARAKTERISTIKE FOTONAPONSKIH SUSTAVA

---

Kod većine fotonaponskih instalacija postoje tri mehanizma za prijenos topline, a to su : zračenje, slobodna konvekcija i prisilna konvekcija pod utjecajem brzine vjetra.

Faktor toplinskog gubitka jednak je:[6]

$$U = U_0 + U_w \quad (3 - 5)$$

, gdje je :

$U_0$  – konstanta koja je rezultat specifičnih karakteristika instalacija i odnosi se na okolnu temperaturu i temperaturu ćelije

$U_w$  – utjecaj brzine vjetra na promatranom području

Faktor toplinskog gubitka može se još izraziti na način:[6]

$$U = U_0 + \lambda_w \cdot V \quad (3 - 6)$$

, gdje je:

$V$  – brzina vjetra

$\lambda_w$  – empirijski koeficijent

Za module postavljene bez leđne potpore sa slobodnom cirkulacijom zraka i nižom brzinom vjetra vrijedi :  $U_0 = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$ , ....  $\lambda_w = 6 \text{ W/m}^2/\text{m/s}$ .[6]

Ukoliko je brzina vjetra u prosjeku 4 – 5 m/s vrijedi:[6]

$U_0 = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ , ....  $\lambda_w = 1,2 \text{ W/m}^2/\text{m/s}$ .[6]

Kada brzina vjetra poprima prosječnu vrijednost 1,5 – 3,3 m/s, vrijedi :

$U_0 = 29 \text{ W/m}^2\text{K}$ , ....  $\lambda_w = 0 \text{ W/m}^2/\text{m/s}$  ili za potpuno izolirane pojase  $U_0 = 15 \text{ W/m}^2\text{K}$ , ....  $\lambda_w = 0 \text{ W/m}^2/\text{m/s}$ .[6]

Za procjenu temperature fotonaponske ćelije /modula može se koristiti sljedeća linearna jednadžba koja povezuje  $T_c$ ,  $T_a$  i Sunčevo zračenje.[6]

$$T_c = T_a + k \cdot G_T \quad (3 - 7)$$

, gdje je:

### 3. FAKTORI KOJI UTJEČU NA PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE/KARAKTERISTIKE FOTONAPONSKIH SUSTAVA

---

$T_C$  – temperatura ćelije

$T_a$  – okolna temperatura

$G_T$  – jakost Sunčevog zračenja

$k$  – Rossov koeficijent, uglavnom u rasponu od 0,02 do 0,05 K m<sup>2</sup>/W, ovisi najviše o vrsti fotonaponskog modula i načinu na koji je montiran (prozračeno ili neprozračeno), kao i o brzini vjetra na mjestu na kojem je instalacija postavljena.

Prema kombinaciji jednadžbi (3 - 4), (3 - 6) i (3 - 7) dobijemo:[6]

$$k = \frac{\tau \cdot \alpha - \eta}{U} = \frac{\tau \cdot \alpha - \eta}{U_0 + \lambda_W \cdot V} \quad (3 - 8)$$

ili ekvivalentno:[6]

$$U_0 + \lambda_W \cdot V = \frac{\tau \cdot \alpha - \eta}{k} \quad (3 - 9)$$

Uzimajući u obzir opisane analize i opće izraze te utjecaj temperature modula na energetske učinkovitost, imamo sljedeći izraz:[6]

$$\delta \cdot \eta = \beta_{ref} \cdot (T_C - T_{NOCT}) \cdot \eta_0 \quad (3 - 10)$$

, gdje je:

$\delta\eta$  - pad učinkovitosti izazvan temperaturom

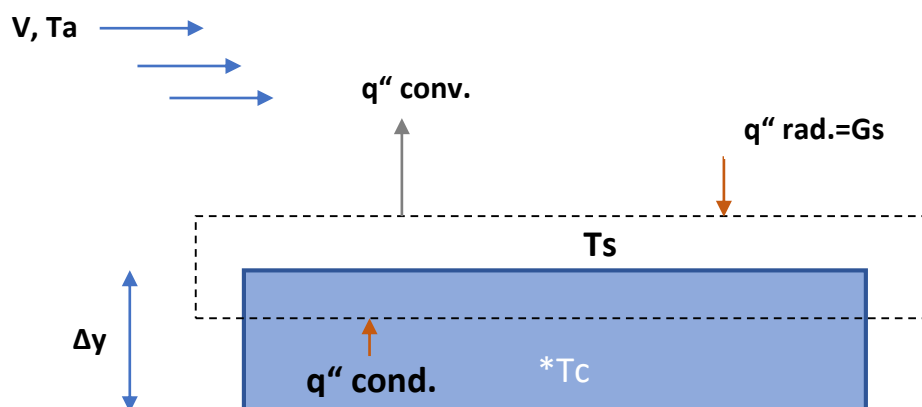
$T_C$  – temperatura ćelije

$T_{NOCT}$  – maksimalna radna temperatura ćelije

$\eta_0$  – učinkovitost generatora

$\beta_{ref}$  – koeficijent čija se vrijednost nalazi između 0,3 – 0,5 %/K

Kao što je prethodno navedeno, performanse fotonaponskih modula prilično su osjetljive na promjene temperature. Temperatura fotonaponske ćelije je funkcija različitih parametara poput vremenskih varijabli (okolne temperature, brzine vjetra itd.), Sunčevog zračenja, materijala ćelije i svojstvima ovisnim os sustavu (propusnost staklenog poklopca, apsorpcija ploče).



*Slika 3.3. Načini prijenosa topline na površini fotonaponske ćelije*

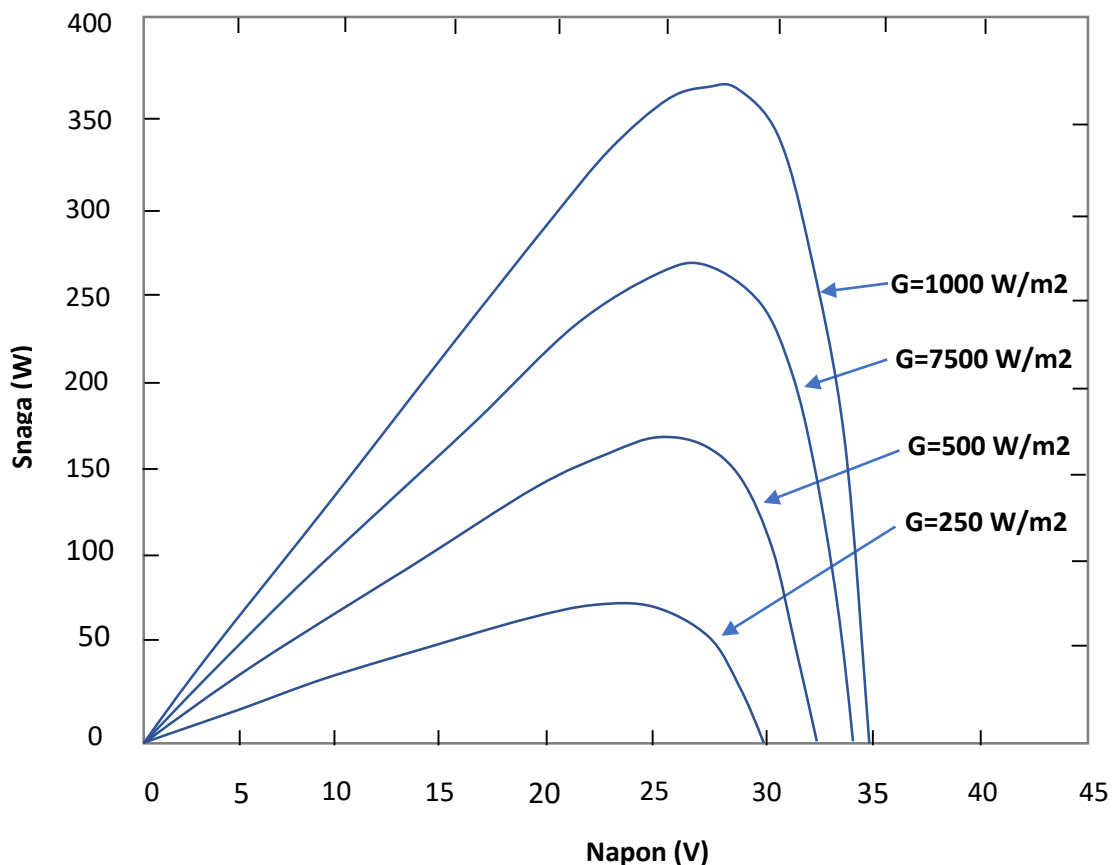
Kako je prikazano na slici postoje tri načina prijenosa topline koji se pojavljuju u ili izvan kontrolne površine tipične fotonaponske ćelije. Pojednostavljeno, pretpostavlja se da je prijenos topline jednodimenzionalan, a brzina  $v$  na površini fotonaponskog modula smatra se vodoravnom i jednoličnom. Temperaturna ovisnost performansi fotonaponskih ćelija uvelike je povezana s tipom ćelije.

### 3.2 Intenzitet zračenja

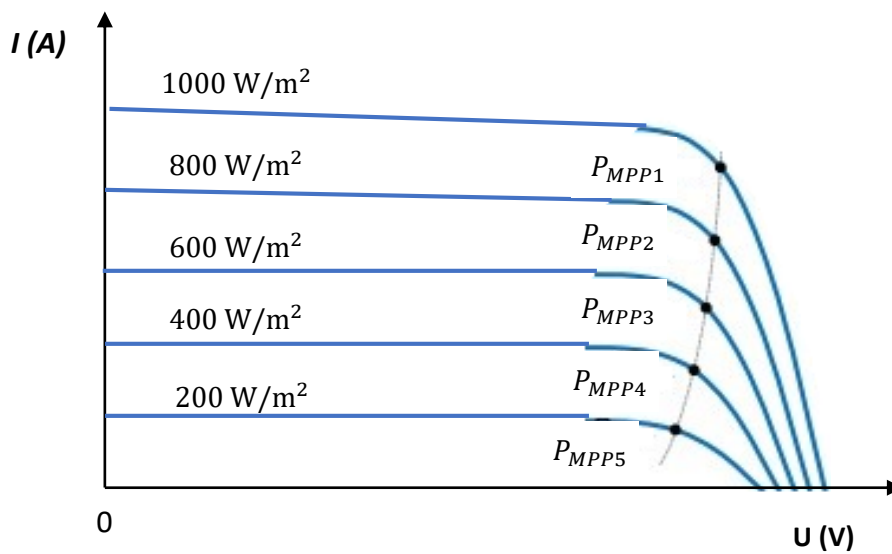
Sunčevo zračenje poznato je kao količina energije koju Sunce daje po jedinici površine. Energija dobivena iz fotonaponskih modula u direktnoj je vezi s dostupnošću solarne energije i mjestu na kojem su moduli postavljeni. Zračenje obično oscilira u ovisnosti o vremenu i položaju Sunca za vrijeme dana. Kada se sunce u podne nalazi na najvišoj točki, sakupi se najviše Sunčeve energije i tu dolazi do porasta uzlazne snage. Za vrijeme oblačnijih dana, oblaci reflektiraju sunčeve zrake i smanjuju modulima mogućnost apsorpcije sunčevih zraka, pa tu dolazi do smanjenja izlazne snage.

Na sljedeće dvije slike mogu se vidjeti  $P - V$  i  $U - I$  karakteristike pri različitim intenzitetima zračenja.

### 3. FAKTORI KOJI UTJEČU NA PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE/KARAKTERISTIKE FOTONAPONSKIH SUSTAVA



Slika 3.4.  $P - V$  karakteristika pri različitim intenzitetima zračenja



Slika 3.5.  $U - I$  karakteristika pri različitim intenzitetima zračenja

## Utjecaj atmosfere na intenzitet Sunčevog zračenja

Sunčevo zračenje prolaskom kroz Zemljinu atmosferu postaje sve slabije jer se raspršuje na molekulama plinova, česticama prašine i dimu, a apsorbira prilikom međudjelovanja s molekulama plinova. Tu je riječ o ekstinkciji Sunčevog zračenja, prema kojemu je definiran koeficijent ekstinkcije<sup>1</sup>  $a$ , čija vrijednost primjerice za Osijek varira između 0,2 i 0,8. Za vrijeme sumaglice i magle vrijednost ovog koeficijenta je visoka, a za vedroga vremena je visoka.

Slabljenje Sunčevog zračenja definirano je Bouguer – Lambertovom jednadžbom[8]:

$$B = I_0 \cdot e^{-am} \quad (3 - 11)$$

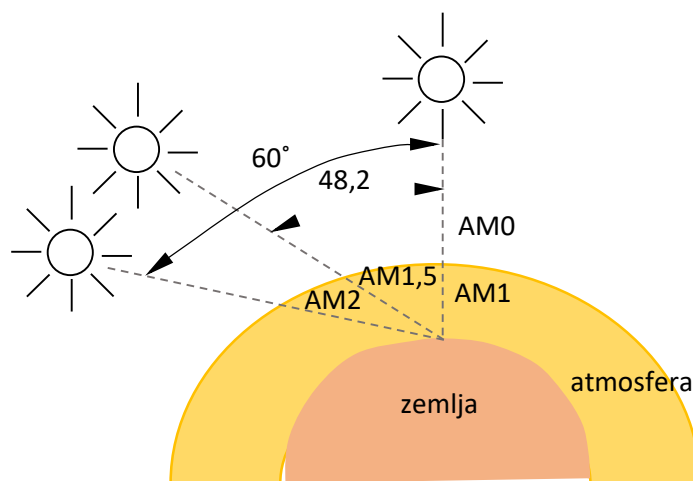
,gdje je :[8]

„ $B$  – ozračenje na tlu

$I_0$  – ozračenje u gornjoj granici atmosfere

$m$  – optička masa zraka; omjer stvarne duljine puta Sunčevih zraka na putu kroz atmosferu i najkraćeg mogućeg puta te je funkcija upadnog kuta Sunca i najvažniji parametar koji određuje snagu upadnog Sunčevog zračenja

$a$  – koeficijent ekstinkcije“



*Slika 3.6. Optička masa zraka[8]*

<sup>1</sup> Ekstincija - slabljenje jakosti zračenja pri prolasku kroz atmosferu uslijed apsorpcije

$$m = \frac{BA}{CA} = \frac{1}{\cos\theta_z} \quad (3 - 12)$$

Relativna optička masa zraka, odnosno optička masa izračunata za tlak od 1000 mbar[8]:

$$m_r = m \cdot \frac{p}{1000} \quad (3 - 13)$$

, gdje je p tlak zraka [mbar]

Za Sunčeve zrake koje dolaze na površinu okomito iznos optičke mase zraka je  $m = 1$ , a za zrake koje s obzorom zatvaraju kut od  $30^\circ$  optička masa zraka je  $m = 2$ .

### **Efekti spektralnog zračenja**

Na vanjske performanse fotonaponskih modula utječe spektralni zračenje. Čak i ako je razina zračenja i radna temperatura ista, razlika u performansama fotonaponskih modula može se povećati do 15 %, ovisno o vrsti fotonaponskih modula.

Fotonaponski moduli se ocjenjuju prema njihovoj izlaznoj snazi u standardnim testnim uvjetima (Standard Test Conditions(STC)), koji su skup referentnih uvjeta koji se sastoje od zračenja  $1000 \text{ W/m}^2$ , AM1,5G spektra i temperature modula od  $25 \text{ C}$ . Međutim, STC uvjeti nisu zastupljeni u svim regijama svijeta. Stoga se sumnja da je snaga fotonaponskih modula dobivena STC metodom različita od stvarnih performansi u vanjskim uvjetima. Performanse fotonaponskih modula instaliranih na otvorenom su pod velikim utjecajem različitih faktora okoliša kao što su već spomenuta temperatura modula, brzina vjetera i raspodjela spektralnog zračenja[7].

Tik iznad zemljine atmosfere, intenzitet solarnog zračenja ili solarna konstanta iznosi oko  $1,335 \text{ kW/m}^2$  i spektralna raspodjela odnosi se na spektralni zračenje zračne mase (air mass zero(AMO)). Zračna masa je mjera koliko apsorbira u atmosferi utječe na spektralni sadržaj i intenzitet Sunčevog zračenja koji doseže zemljinu površinu.

Iznos zračne mase dan je relacijom:[7]

$$AM = \frac{1}{\cos\theta} \quad (3 - 15)$$

, gdje je:

$\theta$  – kut upada ( $\theta = 0$  kad je sunce direktno iznad).

Također, raspodjela spektralnog zračenja se mijenja tijekom dana, zbog aerosola i vodene pare. Stoga, teško je odgovoriti standardima spektralnog zračenja (Slika) AM 1,5G definiranih u ASTM G173-03 i standardu IEC 60904-3. Izmjereni podaci o spektralnog zračenju ne mogu se koristiti u jednostavnim pristupima analize ili modeliranja, jer se sastoje od cjeline mjerenja.

U idealnom slučaju spektralna analiza sažela bi se kao jedinstveni parametar, koji se može upotrijebiti na gotovo isti način kao i širokopojasno zračenje i temperatura uređaja za izoliranje i kvantificiranje različitih utjecaja na okoliš koji djeluju na fotonaponske uređaje.

Položaj Sunca na nebu u odnosu na položaj na površini zemlje može se odrediti pod dva kuta, a to su:[7]

$\alpha$  – kut solarne visine

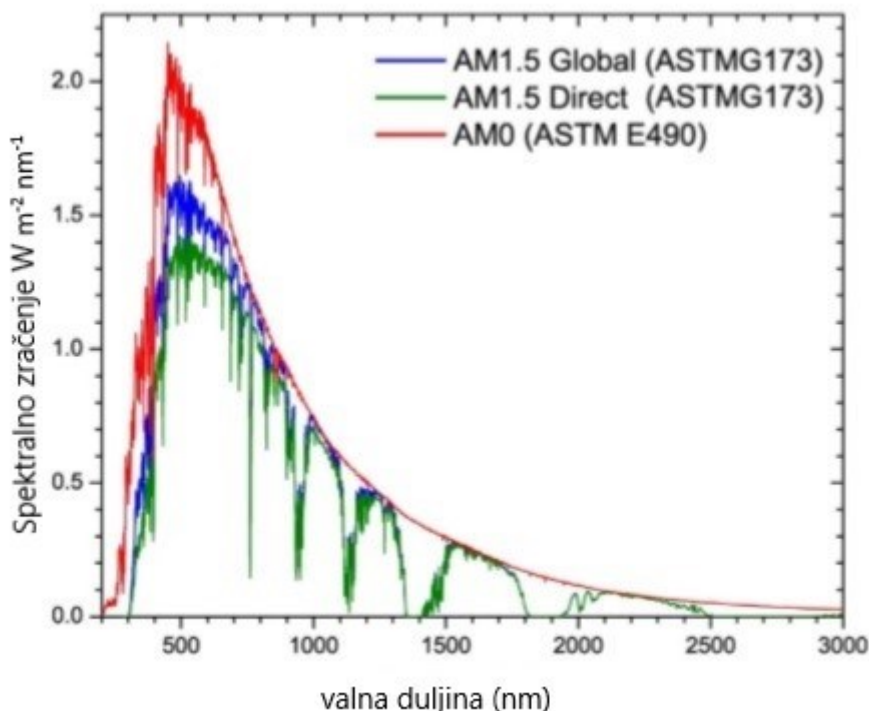
$\beta$  – solarni azimutni kut

Kut  $\alpha$  je kut između položaja Sunca i vodoravne ravnine zemljine površine, dok kut  $\beta$  određuje kut između vertikalne ravnine koja sadrži solarni disk i linije koja teče prema sjeveru. Stoga je definiran novi parametar, kut upada (angle of incidence (AOI)) kako bi se objasnio položaj Sunčevih zraka u ravnini. AOI je mjera odstupanja od nečega što je „ravno“. Površina koja je izravno okrenuta Suncu ima AOI 0, a površina koja je paralelna sa Suncem (poput izlaska Sunca koji udara u vodoravnu ravninu) ima AOI 90°. Sunčeva svjetlost s upadnim kutom od 90° ima tendenciju apsorbiranja, dok se niži kutovi obično reflektiraju. Drugi važan parametar koji utječe na Sunčevo zračenje je indeks jasnoće  $K_T$ , koji se definira kao vrijednost određenog dnevnog zračenja za izvanzemaljsko zračenje za taj dan ili satni indeks jasnoće može biti definiran u obliku jednadžbe:[7]

$K_T = \frac{H}{H_0}$  (dan) i  $k_T = \frac{I}{I_0}$ , gdje su  $H$  i  $I$  izmjerene vrijednosti ukupnog Sunčevog zračenja te  $H_0$  i  $I_0$  su izvanzemaljske vrijednosti koje se mogu izračunati pomoću nekoliko metoda. Ova vrijednost ovisi o atmosferskim uvjetima; obično se vrijednost nalazi između 0 i 1. U vedrim vremenskim uvjetima indeks jasnoće je visok, a ako je atmosfera mutna ili je oblačno, vrijednost indeksa je niska ( $K_T \leq 0,4$  za vrijeme jako oblačnog vremena).

Vanjski učinak i energetski prinos fotonaponskih modula ovise o velikom broju faktora. Najvažniji faktor je količina zračenja koja stiže na ravninu fotonaponskog modula, a ovisi o vremenskim uvjetima kao što su kiša, temperatura okoline i vjetar.

Da bi se omogućila šira primjena fotonaponskih modula, važno je analizirati utjecaje okolišnih čimbenika na performanse fotonaponskih modula na otvorenom. Smanjena je referentna apsorpcija kemijskih elemenata u atmosferi. Intenzitet svjetlosti u frekvenciji upadajućih fotona je apsorbiran. Postoje neki računalni modeli koje su razvili neki laboratoriji koji računaju spektralno zračenje vedrog neba i hemisferična zračenja u ravnini (nagnuta ili vodoravna) na odabranoj lokaciji u vremenu.[7]



*Slika 3.7. Standardni referentni solarni spektri[7]*

### Faktor neusklađenosti spektra (Spectral Mismatch Factor (MMF))

Jedna od razlika između unutarnjih i vanjskih mjerenja su pogreške spektralne neusklađenosti. Pogreške spektralne neusklađenosti mogu utjecati na procjenu struje kratkog spoja i nastati pri korištenju referentne ćelije s spektralnim odzivom (spectral response(SR)) različitim od stvarnog spektra uređaja koji se ispituje. Količina spektralne neusklađenosti znatno ovisi o razlici raspodjele spektralnog zračenja spektralnog zračenja solarnog simulatora u odnosu na referentni spektar AM 1,5G. Prema normi IEC 60904 – 7 faktor neusklađenosti spektra definiran je:[7]

$$MMF = \frac{\int E_{AM1,5}(\lambda) SR_{ref}(\lambda) d\lambda \int E_{\lambda}(\lambda) SR_{DUT}(\lambda) d\lambda}{\int E_{\lambda}(\lambda) SR_{ref}(\lambda) d\lambda \int E_{AM1,5}(\lambda) SR_{DUT}(\lambda) d\lambda} \quad (3 - 16)$$

, gdje je :

$E_{AM1,5}(\lambda)$  – raspodjela spektralnog zračenja spektra AM 1,5 prema normi IEC 60904 – 3

$E_{\lambda}(\lambda)$  – distribucija spektralnog zračenja dolazne svjetlosti u vrijeme mjerenja

$SR_{ref}(\lambda)$  – solarni odziv referentne ćelije

$SR_{DUT}$  – solarni odziv uređaja koji se ispituje

Da bi se prikazao efekt solarnih spektralnih varijacija korisno je odrediti parametar koji može predstavljati spektralni pomak prema višim energijama (što rezultira većim udjelom plave ili ultraljubičaste svjetlosti).



### 3. FAKTORI KOJI UTJEČU NA PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE/KARAKTERISTIKE FOTONAPONSKIH SUSTAVA

Ako je spektralno zračenje određenog uređaja/ćelije (serijski ili paralelno spojenih ćelija fotonaponskih modula)  $G(\lambda)$ , ukupno zračenje  $G$  je definirano kao [7] :  $G = \int_0^{\infty} G(\lambda) d\lambda = \int_0^{\infty} \epsilon_{\lambda} b(\lambda) d\lambda$ , gdje je:

$b(\lambda)$  – gustoća fluksa (broj po jedinici površine i jedinici vremena)

$\epsilon_{\lambda}$  – valna duljina energije fotona

$\lambda$  – valna duljina

UF je omjer sunčevog zračenja unutar korisnog raspona valnih duljina PV uređaja prema ukupnom solarnom zračenju i definiran je kao: [7]

$UF = \frac{1}{G} \int_0^{\lambda(E_g)} G(\lambda) d\lambda$ , gdje je  $E_g$  pojas razmaka solarnog uređaja / ćelije koji se izjednačava s dugim rezom valne duljine valne duljine  $\lambda$ .

#### Prosječna energija fotona (Average photon energy(APE))

Još jedna vrijednost za karakterizaciju oblika spektra je prosječna energija fotona. APE je trenutna vrijednost koja je definirana kao omjer ukupnog zračenja spektra u odnosu na gustoću fotona.

$$APE = \frac{\int_{\lambda_b}^{\lambda_a} G(\lambda) d\lambda}{q_e \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \phi(\lambda) d\lambda} \quad (3 - 17)[7]$$

, gdje je:

$q_e$  – naboj elektrona

$\phi(\lambda)$  – spektralna gustoća fluksa fotona

$\lambda_a$  i  $\lambda_b$  viša i niža granica valne duljine apsorpcije uređaja

Treba napomenuti da izračunata vrijednost APE ovisi o granicama integracije u Eq. Taj interval valne duljine prikazan je u tablici za standardni spektar AM1,5 G.

**Tablica 3.2.** APE standardnog spektra procijenjen iz različitih granica spektralne integracije [7]

Raspon valne duljine (nm)	APE, prosječna energija fotona (eV)
300 – 4000	1,43
300 – 2500	1,48
300 – 1700	1,62
300 - 1100	1,86

Spektralna gustoća fluksa pri određenoj vrijednosti valne duljine  $\lambda$  može se odrediti dijeljenjem spektralnog zračenja procijenjenog na  $\lambda$  između energije fotona  $\epsilon_\lambda$  s tom valnom duljinom (u džulima) :[7]

$$\phi(\lambda) = \frac{G(\lambda)}{\epsilon_\lambda} = \frac{G(\lambda)}{\frac{hc}{\lambda}} \quad (3 - 18)$$

$$\phi(\lambda) = \frac{G(\lambda)}{\epsilon_\lambda} = \frac{G(\lambda)}{\frac{hc}{\lambda}} \quad [7], \text{ gdje je :}$$

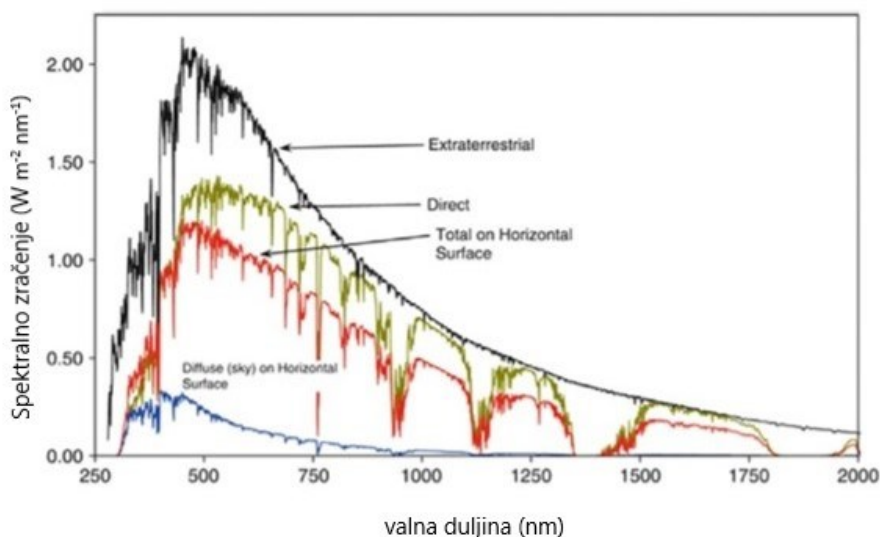
$h$  – Planckova konstanta,  $h = 6.62606877 \times 10^{-34}$  Js

$c$  – brzina svjetlosti u vakuumu,  $c = 2,99792458 \times 10^8$  m/s

Koristeći se ovim veličinama konačni rezultat APE-a će biti izražen u J, ali obično se izražava u elektronvoltima(eV), uzimajući u obzir da je  $1 \text{ eV} = 1,602176463 \cdot 10^{-19}$  J.

### Prirodna solarna spektralna varijacija

Kada Sunčevo zračenje uđe u zemljinu atmosferu, nije prisutan samo utjecaj zračenja, nego i spektralni sadržaj. Standardni solarni spektar koji se koristi za testiranje fotonaponskih uređaja dan je na slici 1., ali općenito oblik spektra je promjenjiv tijekom dana. Povećanje zračne mase pomiče solarni spektar prema crvenom. Sunčevo zračenje koje zrači nebom može biti izravno, difuzno i odbijano zračenje. Ukupno ili globalno Sunčevo zračenje mjereno na površini zbroj je snopa i difuznog zračenja. Snop ili izravno zračenje je Sunčevo zračenje primljeno od Sunca bez da se rasprši po atmosferi. Sunčevo zračenje primljeno od Sunca nakon što se njegov smjer promijenio rasipanjem u atmosferi definirano je kao difuzna komponenta ukupnog sunčevog zračenja. Učinak u spektralnoj raspodjeli prikazan je na slici 2.



Slika 3.8. Solarna spektralna raspodjela[7]

Globalno Sunčevo zračenje sastoji se od izravnog i difuznog zračenja, a raspodjela solarnog spektralnog zračenja ima značajan utjecaj na izlaz fotonaponskog uređaja. Kada je nebo vedro i Sunce je visoko na nebu, izravno zračenje iznosi oko 85% ukupne insolacije koja udara o tlo, a difuzno zračenje je oko 15%. Kako se Sunce spušta na nebu, postotak difuzne radijacije se povećava dok ne dosegne 40% kada je sunce 10° iznad horizonta. Atmosferski uvjeti poput oblaka i zagađenja također povećavaju postotak difuznog zračenja. U slučaju izuzetno oblačnog vremena, gotovo cijelo sunčevo zračenje opada na difuzno zračenje. To bi značilo da što je veći postotak difuznog zračenja, manji je iznos ukupnog sunčevog zračenja. Dakle, ukupni spektar ovisi o omjeru snopa i difuznog zračenja.

Najveći iznos difuznog zračenja je kada su fotonaponski moduli postavljeni horizontalno. Fotonaponski moduli se obično smještaju s nagnutim kutovima kako bi se maksimiziralo ukupno zračenje, a to također povećava količinu izravnog zračenja. Što su fotonaponski moduli strmiji, manji dio neba je okrenut prema njima i propuštaju više difuznog zračenja. Odbijeno zračenje opisuje Sunčevu svjetlost koja je odbijena od ne atmosferskih tvari, kao što je tlo. Asfalt odbija oko 4% svjetlosti koja ga pogađa, a travnjak oko 25%. Međutim fotonaponski moduli imaju tendenciju da se nagnu dalje od mjesta na kojem se odbija odbijena svjetlost, a odbijeno zračenje rijetko predstavlja značajan dio Sunčeve svjetlosti koji udara u njihovu površinu. Pored toga i kristalni silicij i tanki fotonaponski moduli trebaju staklo, a komercijalno staklo ima solarni prijenos od 83,7%, tj. 16,3% sunčeve energije ne dopijeva do fotonaponskog materijala i otkrivanje prednjeg stakla fotonaponskog modula utječe na spektar djelovanja aktivnih slojeva.[7]

Kako bi se prikazale sezonske varijacije vrijednosti UF i APE tijekom dana, prvo, dva reprezentativna dana u srpnju i siječnju odabrani su za lokaciju širine od 37°N. Potom se izračunavaju UF i APE vrijednosti od izlaska i zalaska Sunca uz pomoć SPCTRAL2. Sezonski nagibi od 15° i 35° prihvaćaju se za ljeto i zimu. Vrijednosti od UF i APE gotovo su stalne tijekom dana, osim u ranim i kasnim satima dana. Ljeti se UF i APE vrijednosti povećavaju u tim satima zbog rastuće komponente upotrebe globalnog zračenja kada je Sunce iza ravnine polja, ali zimi se vrijednosti smanjuju u tim vremenskim intervalima.

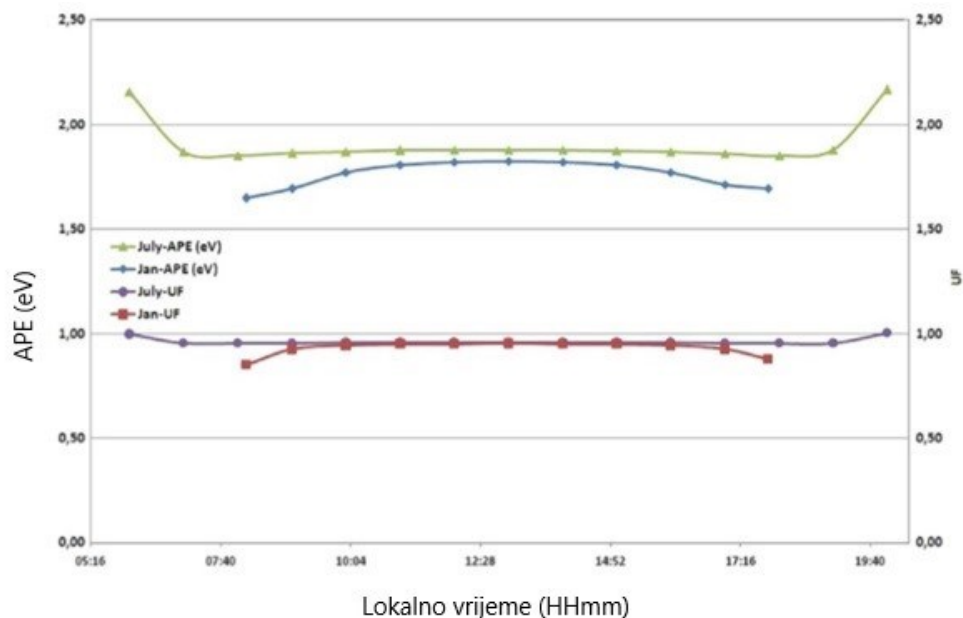
$$\eta = \frac{P_{mpp}}{P_{in}} [7], \text{ gdje je :}$$

$P_{mpp}$  – snaga uređaja/ćelije ili modula u točki maksimalne snage

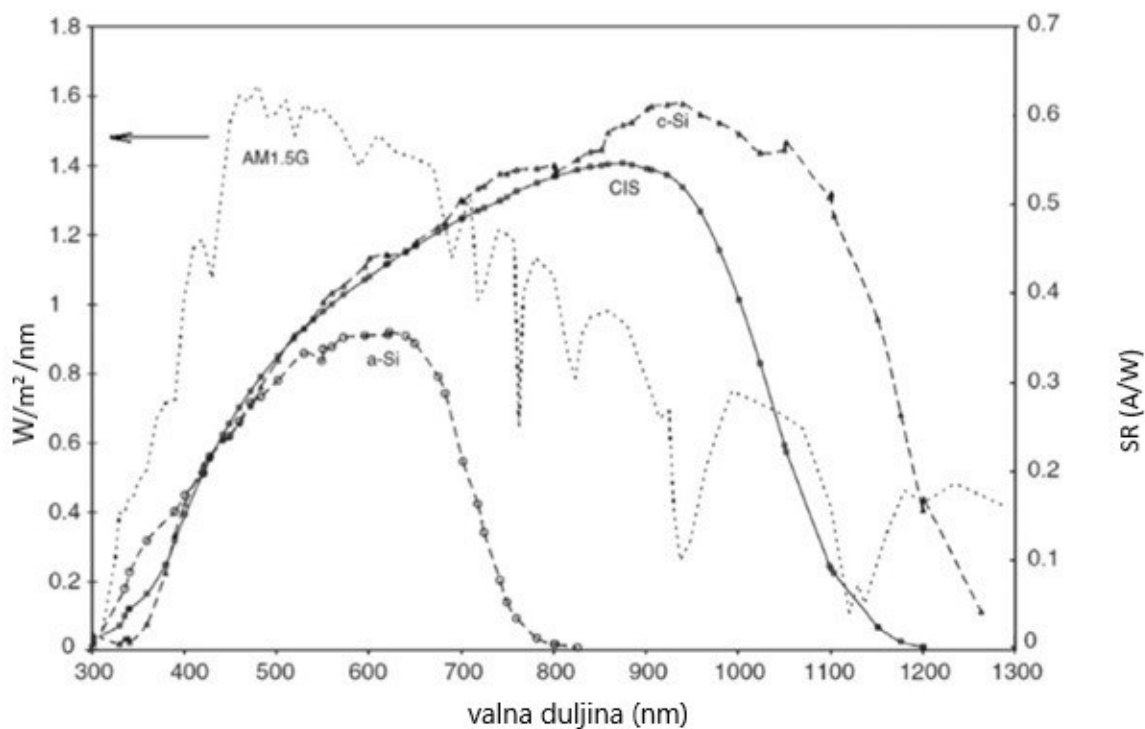
$P_{in}$  – snaga svjetlosti određeno svojstvima spektra svjetlosti koji padaju na uređaj/ćeliju ili modul

### Spektralni odziv

Postoje velike razlike u osjetljivosti različitih fotonaponskih materijala na spektralne varijacije. To se u prvom slučaju određuje razmakom pojasa materijala, koji postavlja gornju granicu valne duljine spektralnog odziva (slike 3.13. i 3.14.).



*Slika 3.9. Izračunate APE i UF vrijednosti za dane vedrog neba za lokaciju od 37 ° N širine (Sezonski nagib od 15 ° i 35 ° uzima se za ljeto i zimu)[7]*



*Slika 3.10. Spektralni odgovori nekih tipova modula i AM1.5 G spektar (do 1300 nm)[7]*

Osjetljivost različitih električnih parametara fotonaponskih uređaja/modula na različite utjecaje okoline ovisi o tehnologiji (materijali i struktura uređaja), a izvedba je direktno proporcionalna spektralnom odzivu gdje je spektralni odziv omjer struje koju generira fotonaponski uređaj prema solarnoj energiji koja pada na njegovu površinu. Spektralni odziv fotonaponskog uređaja izražava se vjerojatnošću da će apsorbirani foton dovesti do nosioca  $I_{ph}$  fotogenirane struje ćelije, a spektralni odgovor je određen razmakom pojasa, debljinom ćelije i transportom u materijalu. Spektralni odziv definira se kao struja kratkog spoja  $I_{sc}(\lambda)$ , koja proizlazi iz jedne valne duljine svjetlosti normalizirane maksimalnom mogućom strujom.

$$SR = \frac{I_{sc}(\lambda)}{qAf(\lambda)} \quad (3 - 19)[7]$$

, gdje je:

$q$  – električni naboj iznosa  $1,6 \times 10^{-19}$  C

$A$  – površina fotonaponskog uređaja

$f(\lambda)$  – protok fotona (broj fotona po jedinici površine u sekundi po valnoj duljini)

Stupanj podudaranja spektralnog odziva i spektra incidentnog zračenja varira kako se spektar mijenja i uzrokuje spektralni utjecaj na struju i efikasnost uređaja. Spektralni odzivi nekih tipova modula i AM1,5G spektra (do 1300 nm) prikazani su na slici.. kako bi se prikazale razlike u različitim tehnologijama. Za kvantificiranje stvari potrebna je neka efikasna mjera spektralne raspodjele, ona koja obuhvaća ideju da će spektralni pomak prema višim energijama rezultirati veći udjelom plave ili ultraljubičaste svjetlosti nego spektralni pomak prema nižim energijama. Budući da a-Si uređaji snažnije apsorbiraju plavu nego crvenu svjetlost, a uopće ne infracrvenu, takvi pomaci neizbježno će utjecati na parametre uređaja, čak i ako svi drugi faktori (npr. Ukupno zračenje, kut upada, temperatura) ostaju konstantne. Radna temperatura fotonaponskog uređaja može utjecati na strujni tok na dva načina : kroz promjenu koeficijenta apsorpcije prikazane trenutnim temperaturnim koeficijentom ili materijalnim promjenama uzrokovanih oživljavanjem obnavljanja razgradnje izazvane svjetlošću.

Temperaturni koeficijenti  $I_{sc}$ ,  $U_{oc}$ , i  $P_{mpp}$  obično se daju u podacima s podacima proizvođača, mjereno pod STC zračenjem i spektrom. Dakle, promjene u radnoj temperaturi rezultiraju istim razinama zračenja s povećanjem do 2 % i zimskim smanjenjem do 1 %. Taj je učinak ozbiljan za tank svjetlosne uređaje, ali parametrijska osjetljivost tih uređaja na promjene u incidentnom spektru još uvijek nije u potpunosti razumljiva, ali nekoliko studija je provedeno da utvrde glavni razlog varijacije za različite materijale, posebno za a – Si solarne ćelije.

$I_{sc}$  je spektar u ovisnosti kako je dno u jednadžbi, stoga ostali parametri učinkovitosti kao FF,  $\eta$  i  $V_{oc}$  su također pod utjecajem varijacije spektra. Provedene su brojne studije analiza učinkovitosti kako bi se procijenila veličina ovih utjecaja na fotonaponske uređaje temeljene na različitim tehnologijama. Dakle, za razinu zračenja od  $100 \text{ W/m}^2$ , radna temperatura fotonaponskog uređaja prenosi se na vrijednost na STC što je poznato kao proces korekcije temperature. Postoji nekoliko analitičkih i numeričkih metoda prevođenja izmjerenih vrijednosti u željene uvjete. Temperaturno korigirana struja kratkog spoja tijekom izmjene ( $I_{sc}/G$ ) ćelije/modula u odnosu na ozračenje dati će znanje o spektralnoj ovisnosti koja se eliminira iz toplinskih efekata.

U ovom poglavlju opisan je utjecaj spektra na performanse fotonaponskih modula. Dakle, može se zaključiti da varijacije performansi dosta ovise o vrsti modula te na temelju toga, omjer dostupnog globalnog zračenja ima sezonsku varijaciju od 5%. Za dane vedrog neba, spektar ima malo utjecaja na fotonaponske module na bazi niskog zazora (učinkovitost varira između 4% i 5% između sezona, kao npr. Za kristalne silicijske solarne ćelije), ali za materijale na bazi visokog zazora između pojasa poput a – Si, utjecaj spektra je ozbiljan (učinkovitost između sezona varira od – 10 % do + 15 %).

### 3.3 Utjecaj zasjenjenja

Zasjenjenje ima velik utjecaj na izlazne karakteristike fotonaponskih modula. Gubici snage uslijed zasjenjenja ovise o veličini i položaju zasjenjene površine fotonaponskog modula te konfiguraciji fotonaponskih ćelija i zaobilaznih dioda. Zasjenjenje površine fotonaponskih modula može nastati i uslijed taloženja čestica tijekom vremena, čija količina ovisi o geografskom položaju, uvjetima instalacije fotonaponskog sustava te o klimatskim uvjetima. Također, u slučaju da dođe do dugog razdoblja bez kiše proizvodnja električne energije fotonaponskog sustava može se značajno smanjiti.

Postotni gubitak snage uslijed zasjenjenja fotonaponskog modula u odnosu na izlaznu snagu nezasjenjenog modula :

$$P_{g\%} = \frac{P_n - P_s}{P_n} \cdot 100[\%] \quad (3 - 20)$$

, gdje je :

$P_{g\%}$  - postotni gubitak snage

$P_s$  – snaga u točki maksimalne snage za pojedini scenarij zasjenjenja

$P_n$  – snaga u točki maksimalne snage nezasjenjenog fotonaponskog modula

Zasjenjenje je utjecaj kojeg je u praksi gotovo nemoguće izbjeći te može imati veliki utjecaj na korisnost fotonaponskih modula. Kako bi fotonaponska elektrana bila što isplativija, potrebno je uzeti u obzir kretanje Sunca tijekom godine i područje na kojem će elektrana biti postavljena. Također, bitno je prilikom postavljanja fotonaponskog sustava izbjeći zasjenjenje što je više moguće da bi elektrana mogla raditi punim kapacitetom. Postoje trajna zasjenjenja poput položaja okolnih zgrada i drveća, dimnjaka i druga, kojima treba posvetiti dosta pažnje jer imaju dosta velik utjecaj. S druge strane, zasjenjenje mogu stvarati prašina, izmet ptica, snijeg i drugo, koji se mogu kontrolirati urednim održavanjem modula. Zasjenjenje je utjecaj koji se ne može izbjeći, stoga je važno na odgovarajući način projektirati fotonaponsku elektranu i optimizatore snage koji imaju ulogu smanjenja utjecaja zasjenjenja.

Zasjenjenje ima veliki utjecaj na korisnost fotonaponskih modula. Čak i ako je mali dio fotonaponskog modula pod utjecajem zasjenjenja, smanjuje se korisnost cijelog modula. Uzrok tomu je što se fotonaponski modul sastoji od niza serijski spojenih fotonaponskih ćelija. Kada se smanji izlazna snaga pojedine ćelije, izlazna snaga cjelokupnog sustava spojenog u seriju svodi se na razinu struje koja prolazi kroz ćeliju na kojoj se prikuplja najmanje svjetlosti.

Djelomično zasjenjenje, osim što smanjuje korisnost fotonaponskog modula, stvara opasnost da ćelija prestane proizvoditi električnu energiju te postane trošilo. Zato je fotonaponski sustav potrebno adekvatno zaštititi.

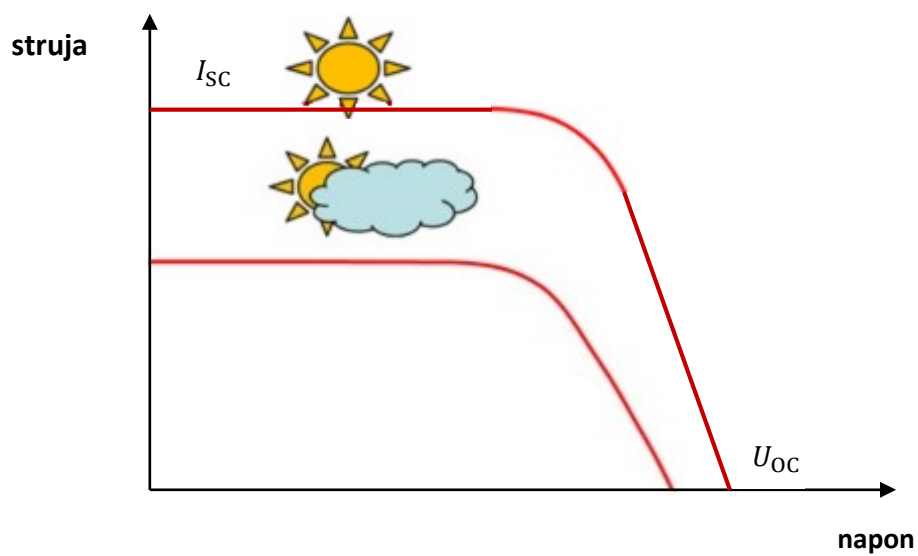
Utjecaj zasjenjenja smanjuje se dodavanjem premosne diode ili dodavanjem nekoliko dioda unutar jednog modula, po jednu za svaku grupu od nekoliko ćelija. Može se koristiti i blokirajuća dioda ako je niz spojen paralelno, a ona u tom slučaju sprječava povratnu struju kroz module koji ne funkcioniraju ispravno.



### 3. FAKTORI KOJI UTJEČU NA PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE/KARAKTERISTIKE FOTONAPONSKIH SUSTAVA



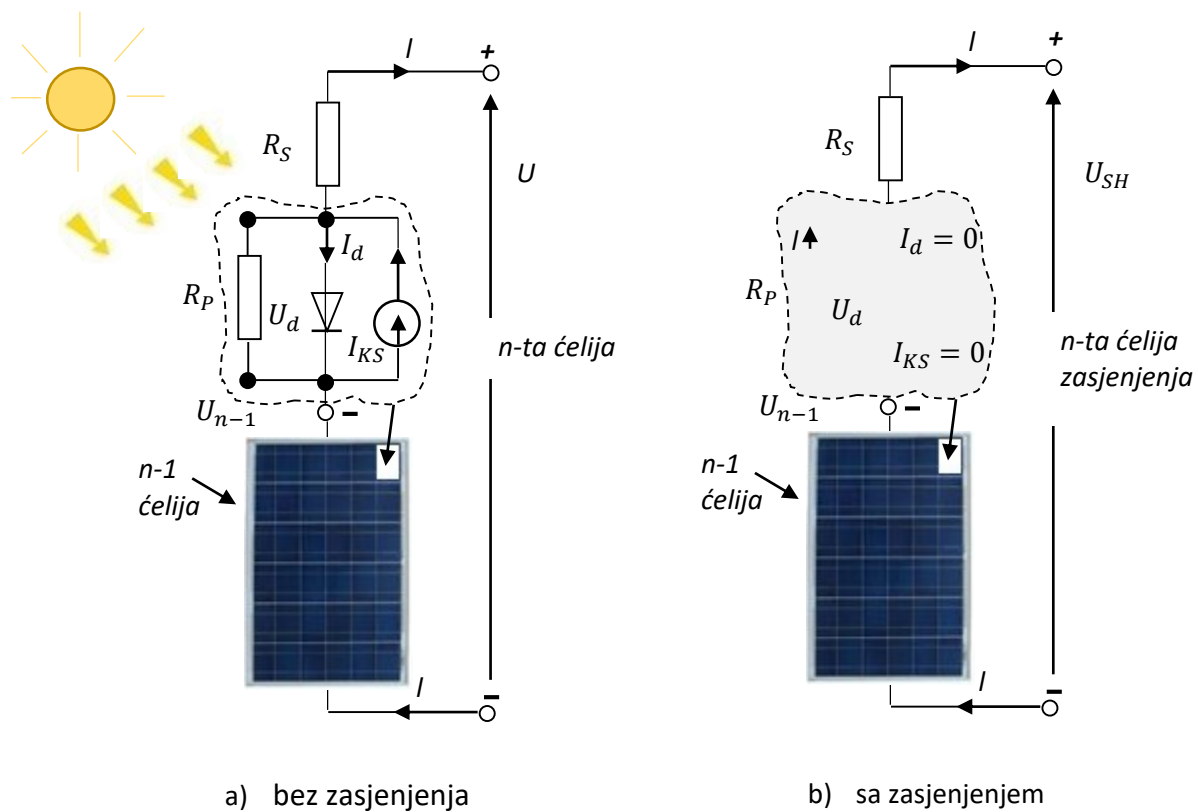
*Slika 3.11. Trajno zasjenjenje fotonaponskih modula[9]*



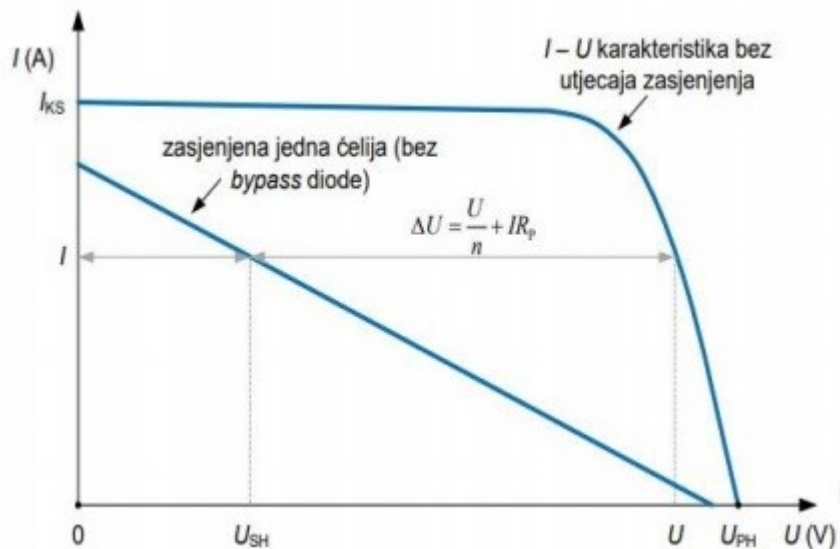
*Slika 3.12. Utjecaj razine osunčanja na strujno naponsku karakteristiku fotonaponske ćelije*



### 3. FAKTORI KOJI UTJEČU NA PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE/KARAKTERISTIKE FOTONAPONSKIH SUSTAVA



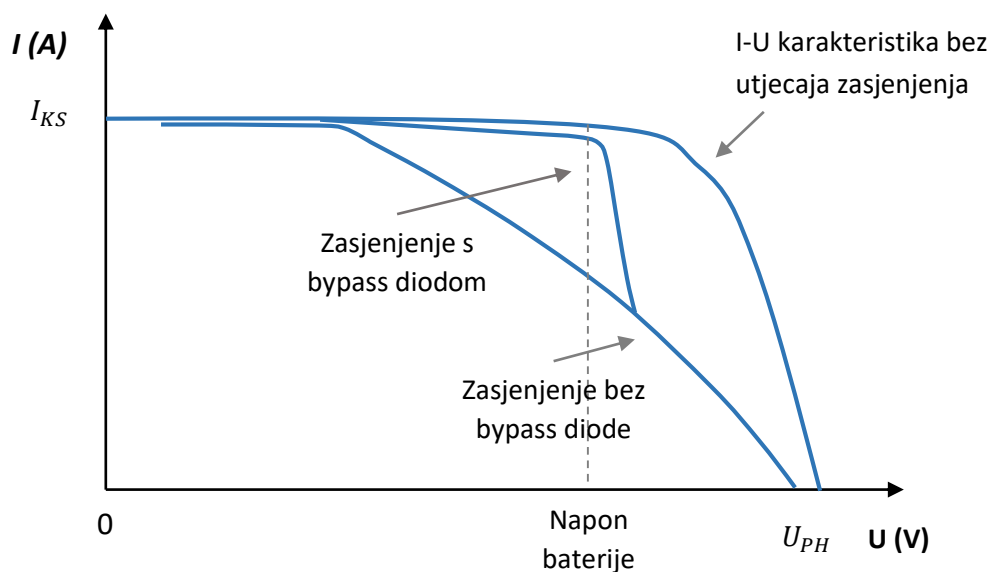
**Slika 3.13.** Fotonaponski moduli sa i bez zasjenjenja



**Slika 3.14.** Strujno naponska karakteristika s obzirom na zasjenjenje

Iz karakteristike na slici 3.15 vidi se strujno-naponska karakteristika zasjenjenja sa i bez premosne diode. Zasjenjenje jedne ćelije znatno je smanjilo snagu. Da bi se smanjio utjecaj

zasjenjenja na fotonaponski modul dodaju se premosne diode svakoj FN ćeliji. Kada dođe do zasjenjenja modula, takva diode počne voditi, te na njoj bude pad napona od oko 0,6 V što je znatno manje nego u slučaju bez premosne diode. Kada modul opet dođe pod utjecaj Sunčevog zračenja, tada struja neće prolaziti kroz premosnu diodu. Takve diode već budu dodane od strane proizvođača fotonaponskih modula. Na slici 3.16 prikazana je karakteristika koja prikazuje utjecaje zasjenjenja sa i bez premosne diode.



Slika 3.15. Utjecaj premosne diode na karakteristike FN modula

### 3.4 Utjecaj zaprljanja

Prašina se definira kao nakupina sitnih krutih čestica manjih od 500  $\mu\text{m}$  u promjeru. Sitne nakupine poput peludi, bakterija, gljivica, mikrofibre odvojene od odjeće, tepiha i tkanina također su poznate kao prašina koja se taloži na površinama.

Nakupljanje prašine je funkcija različitih okolišnih i vremenskih uvjeta. Aktivnosti pješaka i automobila, vulkanske erupcije, zagađenja i vjetar mogu podići prašinu i rasipati je u atmosferi. Prašina se uglavnom zasniva na svojstvima prašine (kemijska svojstva, veličina, oblik, težina itd.), kao i uvjetima okoliša (čimbenici specifični za lokaciju, ekološke značajke i vremenski uvjeti). Oblik površine, kut nagiba, vlaga i brzina vjetra također utječu na količinu nakupljanja prašine.

Provedena su različita istraživanja kako bi se ispitao utjecaj prašine na učinkovitost fotonaponskih ćelija. Zabilježen je širok raspon smanjenja performansi, uključujući prosječno smanjenje od 1% s maksimumom od 4,7% tijekom dvomjesečnog razdoblja u Sjedinjenim Državama, 40% - tno pogoršanje u šestomjesečnom razdoblju u Saudijskoj Arabiji, 32% - tno smanjenje u osmomjesečnom razdoblju ponovo u Saudijskoj Arabiji, 17% - tno do 65% - tno smanjenje u ovisnosti o kutu nagiba za 38 dana u Kuvajtu. U drugom istraživanju provedenom u Egiptu zabilježeno je smanjenje učinka za 33,5% do 65,8% u trajanju od jednog do šest mjeseci. U tropskoj klimi Tajlanda zabilježeno je 11% - tno smanjenje prijenosa električne energije u trajanju od jednog mjeseca. Za proračun je formulirano Sunčevo zračenje s izravnim snopom na nagnutim modulima prekrivenim prašinom.

To se može zaključiti iz rezultata da moduli nagnuti s većim kutovima omogućuju manje nakupljanja prašine na površinama, što dovodi do manjeg pada propusnosti. Također se može zaključiti da sitnije čestice značajnije utječu na učinkovitost fotonaponskih modula nego grube čestice.

Kako se brzina vjetera povećava, prašina se više taloži na modulima u odnosu na tlo. Prekomjerno nakupljanje prašine rezultira s pogoršanjem faktora kvalitete i punjenja fotonaponskih ćelija. Performanse fotonaponskih modula se eksponencijalno smanjuju nakupljanjem više prašine. Također, velika vlaga pomaže stvaranju rose na površini fotonaponskih modula što dovodi do bržeg nakupljanja prašine.

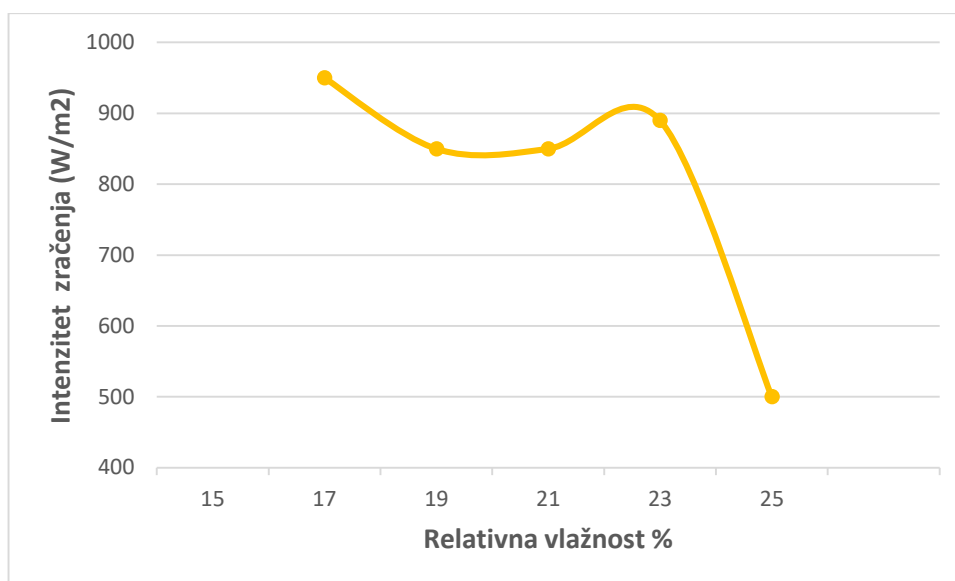
### **3.5 Utjecaj vlage**

Pri analizi utjecaja vlage potrebno je uzeti u obzir dva scenarija. Prvi scenarij je utjecaj čestica vodene pare na razinu zračenja Sunčeve svjetlosti, a drugi scenarij je ulazak vlage u kućište solarne ćelije.

Kad svjetlost udari kapljice vode, moguća su tri slučaja. Svjetlost može biti prelomljena (refrakcija), odbijena (refleksija) i ogibljena (difrakcija). Ti efekti smanjuju razinu prijenosa izravne komponente Sunčevog zračenja. Vlaga mijenja zračenje nelinearno, a samo zračenje uzrokuje male promjene  $V_{OC}$  nelinearno i velike promjene  $I_{SC}$  linearno.

Na slici je prikazan utjecaj vlage na zračenje.

### 3. FAKTORI KOJI UTJEČU NA PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE/KARAKTERISTIKE FOTONAPONSKIH SUSTAVA



**Slika 3.16.** Varijacija razine zračenja s relativnom vlagom

Neravnomjerna raspodjela i širok raspon čestica vodene pare u atmosferi osnova su za nelinearna odstupanja zračenja s relativnom vlagom. Veći kutovi raspršivanja javljaju se s manjim česticama vodene pare. Veći ogib je također rezultat više čestica vodene pare u atmosferi. Jasno je da će u tropskim zemljama s višom relativnom vlagom poput Malezije pad razine zračenja biti veći. Brzina vjetra ima obrnuti utjecaj na relativnu vlažnost zraka što utječe na primljeno zračenje (veća brzina vjetra, manja vlažnost zraka).

U drugom scenariju utjecaja vlage na performanse fotonaponskih ćelija proučava se ulazak vlage. Kada su fotonaponske ćelije dugoročno izložene vlazi, dolazi do smanjenja performansi, kao što se vidi na slici.



**(a) početni (b) test poslije 24 h (c) test poslije 120 sati**

**Slika 3.17.** Uništavajući prodor vlage u solarne ćelije[14]

### 3.6. Utjecaj orijentacije i nagiba modula

Vrijednost Sunčevog zračenja na okomitu plohu je[10]:

$$E_0 = E_{0SR} \left(\frac{r}{R}\right)^2 \quad (3 - 21)$$

, gdje je:[10]

„ $r$  – srednja udaljenost Zemlje od Sunca

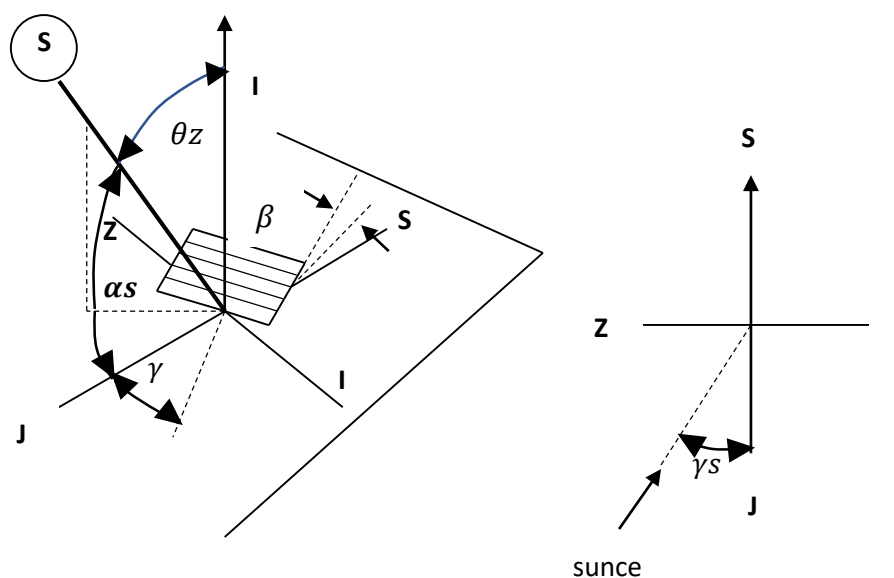
$R$  – stvarna udaljenost Zemlje od Sunca“

Raspon sučevog zračenja mijenja se tijekom godine zbog različite udaljenosti Zemlje i Sunca.

Razradom prethodne jednadžbe dobije se složenija i točnija jednadžba Sunčeve ozračenosti koja pada na površinu[11]:

$$E_0 = E_{0SR} \left(1 + 0,033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right)\right) \quad (3 - 22)$$

, gdje je  $n$  broj dana u godini.



**Slika 3.18.** Kutovi upada zraka i položaja modula

- „Geografska širina ( $\phi$ ) - kutna lokacija sjeverno ili južno od ekvatora, izražava se u stupnjevima, sjeverno do  $+90^\circ$  i južno do  $-90^\circ$ .
- Deklinacija ( $\delta$ ) - kutna lokacija sunca u podne, a mjeri se južno i sjeverno od ekvatora u rasponu od  $-23,45^\circ$  do  $+23,45^\circ$  te je određena nagibom Zemlje što ne daje uvijek podnevno Sunce u istoj točki

### 3. FAKTORI KOJI UTJEČU NA PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE/KARAKTERISTIKE FOTONAPONSKIH SUSTAVA

---

- Nagib ( $\beta$ ) - kut između površine modula i horizontale, moguće je postaviti ga u rasponu od  $0^\circ$  do  $180^\circ$  s time da  $\beta > 90^\circ$  znači okrenutost prema dolje
- Azimut modula ili orijentacija ( $\gamma$ ) - kut između orijentacije modula i pravca prema lokalnom meridijanu, odnosno odstupanje od pravca prema jugu, istočno ( $-180^\circ$ ) ili zapadno ( $+180^\circ$ )
- Kut zenita ( $\theta_z$ ) koji je kut između okomice i pravca Sunca, odnosno, kut incidencije zračenja na postavljenu površinu
- Kut prema horizontali ( $\alpha_s$ ) - kut između horizontale i pravca sunca, komplementarni kut zenita
- Azimut sunca ( $\gamma_s$ ) – kut između pravca juga i upadnih zraka Sunca“

Kut incidencije ( $\theta$ ) je kut između Sunčevog zračenja na površinu i normale na tu površinu, odnosno normale na modul. Računa se po formuli[10]:

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \sin(\delta) \sin(\varphi) \cos(\beta) - \sin(\delta) \cos(\varphi) \cos(\gamma) & (3 - 23) \\ & + \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(\beta) \cos(\omega) \\ & + \cos(\delta) \sin(\varphi) \sin(\beta) \cos(\gamma) \cos(\omega) \\ & + \cos(\delta) \sin(\beta) \sin(\gamma) \sin(\omega) \end{aligned}$$

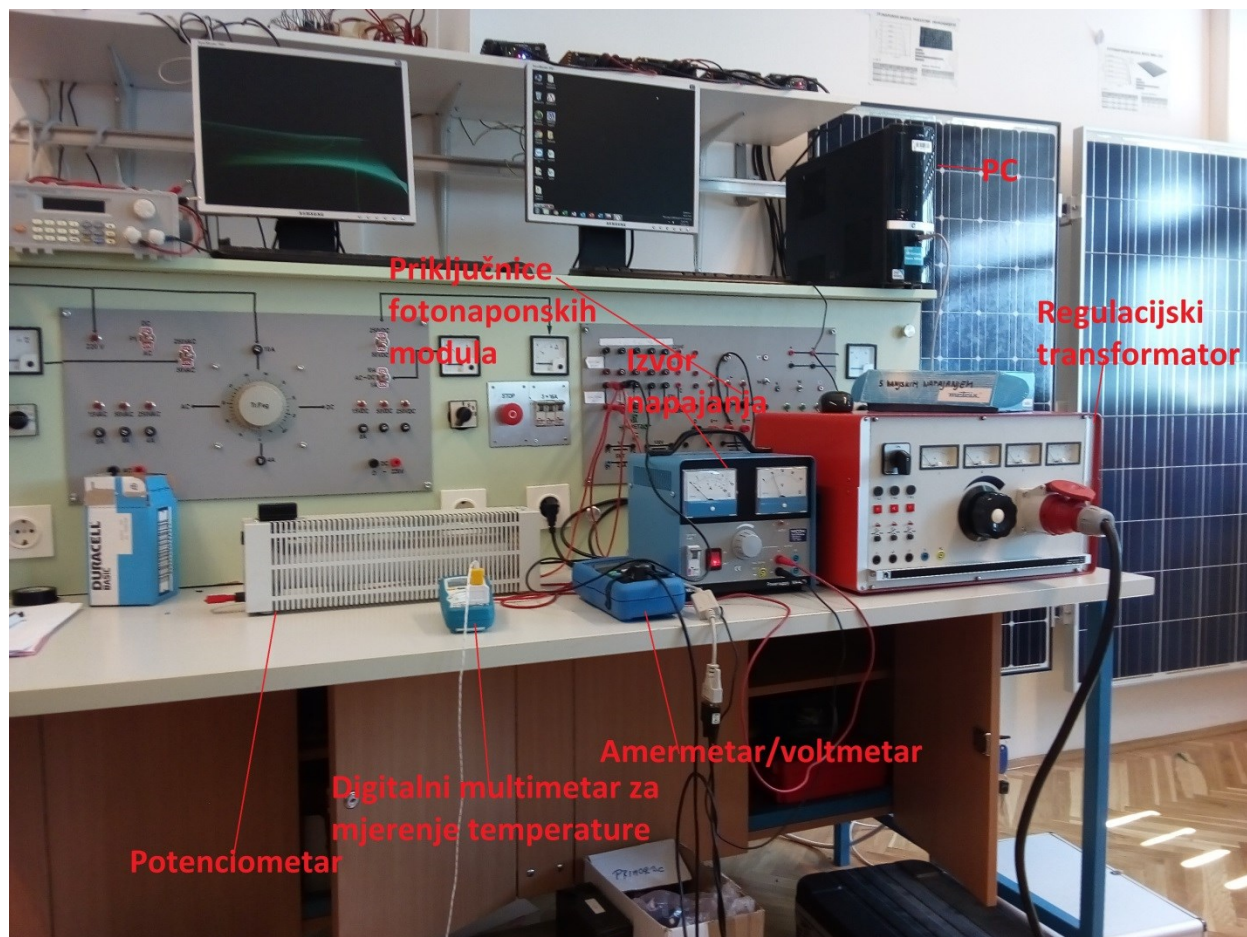
„U idealnoj situaciji koristimo modul koji prati putanju Sunca. Takve sustave zovu se dvoosni sustavi jer pomiču svoj nagib i svoju orijentaciju. Nagib doprinosi povećanju proizvodnje energije najviše tijekom sezona, a azimut može povećati dnevnu proizvodnju svojim zakretanjem oko osi“. [10]



## 4. PRORAČUN

U proračunu su odrađena tri pokusa za tri fotonaponska modula, pomoću umjetnog izvora Sunčevog zračenja snage 5 kW, na računalnom softveru Wattcom u laboratoriju FERIT - a.

Moduli su: SOLAR FRONTIER SF 150 – S, Bisol BMU 250 polikristalni i Bisol BMO 250 monokristalni.



*Slika 4.1. Instrumenti kojima je izvedeno mjerenje*



*Slika 4.2. Umjetni izvor Sunčevog zračenja snage 5 kW*





*Slika 4.3. Fotonaponski modul SOLAR FRONTIER SF 150-S*



*Slika 4.4. Fotonaponski modul Bisol BMU - 250*



*Slika 4.5. Fotonaponski modul Bisol BMO - 250*

U prvom pokusu obrađen je utjecaj jakosti Sunčevog zračenja na I – U karakteristiku, u drugome utjecaj zasjenjenja i u trećem utjecaj temperature na napon.

U sljedećim tablicama prikazane su tehničke karakteristike modula bitne za ovaj rad i proračun pri nominalnoj radnoj temperaturi modula, osim učinkovitosti modula, koju proizvođači ne navode za nominalnu radnu temperaturu, nego za standardne testne uvjete.

**Tablica 4.1.** Tehničke karakteristike za modul SOLAR FRONTIER SF150 - S

Temperaturni koeficijent struje $\alpha$ [%/K]	0,01
Temperaturni koeficijent napona $\beta$ [%/K]	-0,30
Temperaturni koeficijent snage $\gamma$ [%/K]	-0,31
NOCT[°C]	47
Raspon temperature[°C]	40 do 85
Struja kratkog spoja $I_{sc}$ [A]	1,76
Napon strujnog kruga $U_{oc}$ [V]	98,3
Vršna snaga $P_{MPP}$ [W]	111
Učinkovitost modula $\eta_M$ [%]	11,8

**Tablica 4.2.** Tehničke karakteristike modula Bisol BMU 250

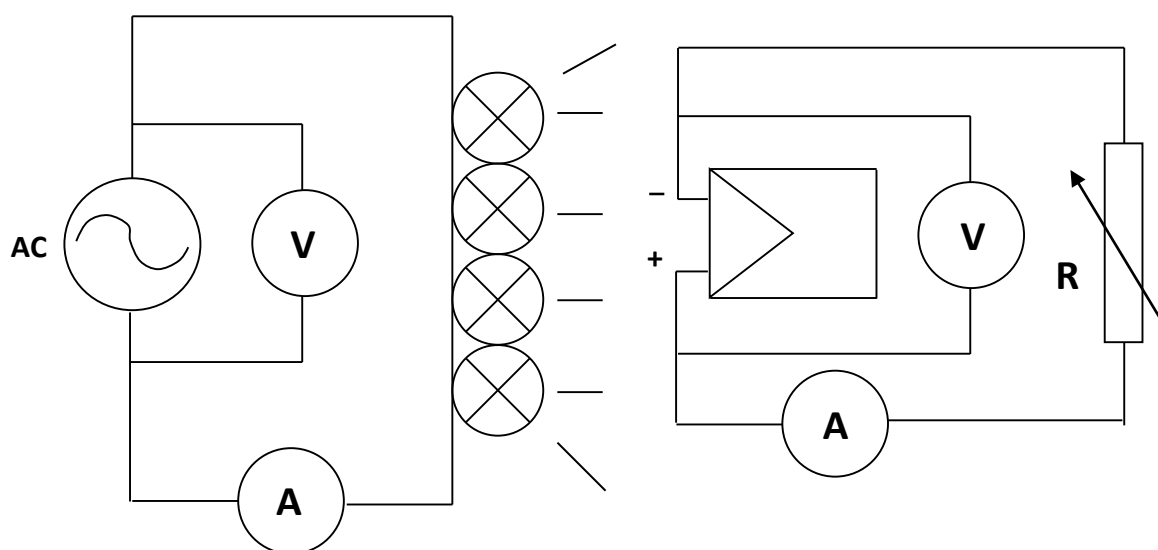
Temperaturni koeficijent struje $\alpha$ [%/K]	0,069
Temperaturni koeficijent napona $\beta$ [%/K]	-0,34
Temperaturni koeficijent snage $\gamma$ [%/K]	-0,40
NOCT[°C]	44
Raspon temperature [°C]	40 do 85
Struja kratkog spoja $I_{sc}$ [A]	7,08
Napon strujnog kruga $U_{oc}$ [V]	35,1
Vršna snaga $P_{MPP}$ [W]	185
Učinkovitost modula $\eta_M$ [%]	15,3

**Tablica 4.3.** Tehničke karakteristike modula Bisol BMO 250

Temperaturni koeficijent struje $\alpha$ [%/K]	0,069
Temperaturni koeficijent napona $\beta$ [%/K]	-0,34
Temperaturni koeficijent snage $\gamma$ [%/K]	-0,40
NOCT[°C]	44
Raspon temperature [°C]	40 do 85
Struja kratkog spoja $I_{sc}$ [A]	7,08
Napon strujnog kruga $U_{oc}$ [V]	35,1
Vršna snaga $P_{MPP}$ [W]	185
Učinkovitost modula $\eta_M$ [%]	15,3

### Utjecaj jakosti Sunčevog zračenja na I – U karakteristiku

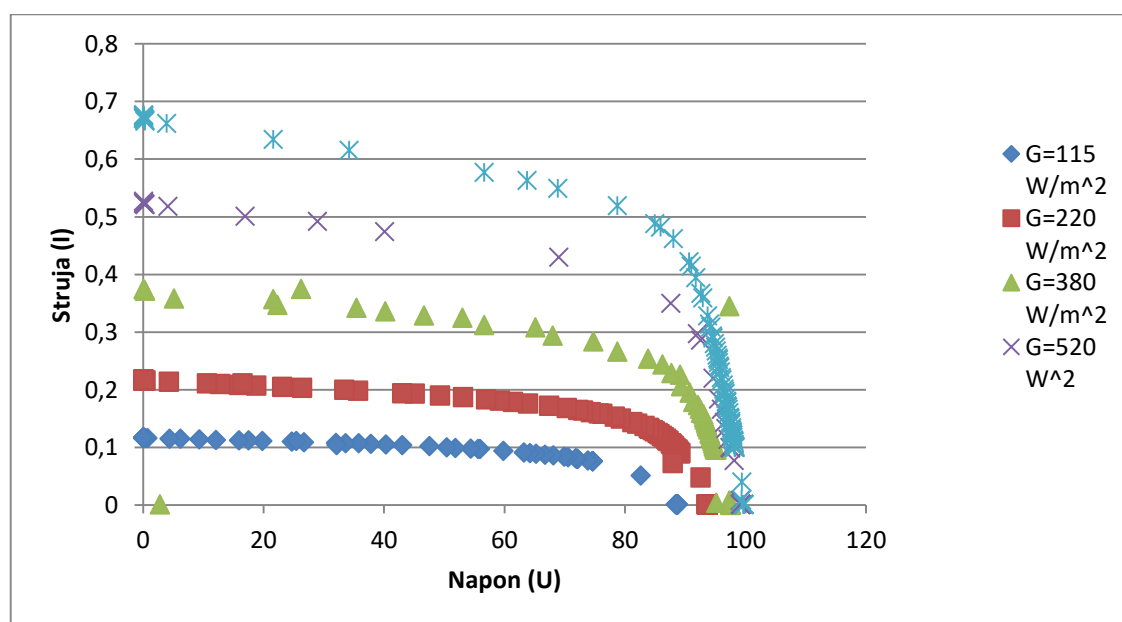
U ovom pokusu promatrane su U – I karakteristike za tri modula pri promjeni jakosti Sunčevog zračenja. Na grafovima su prikazane U – I karakteristike za različite intenzitete jakosti Sunčevog zračenja i ovisnost struje o promjeni intenziteta jakosti Sunčevog zračenja. Vrijednosti intenziteta jakosti sunčevog zračenja i vrijednosti napona i struje u točki maksimalne snage dane su u tablicama.



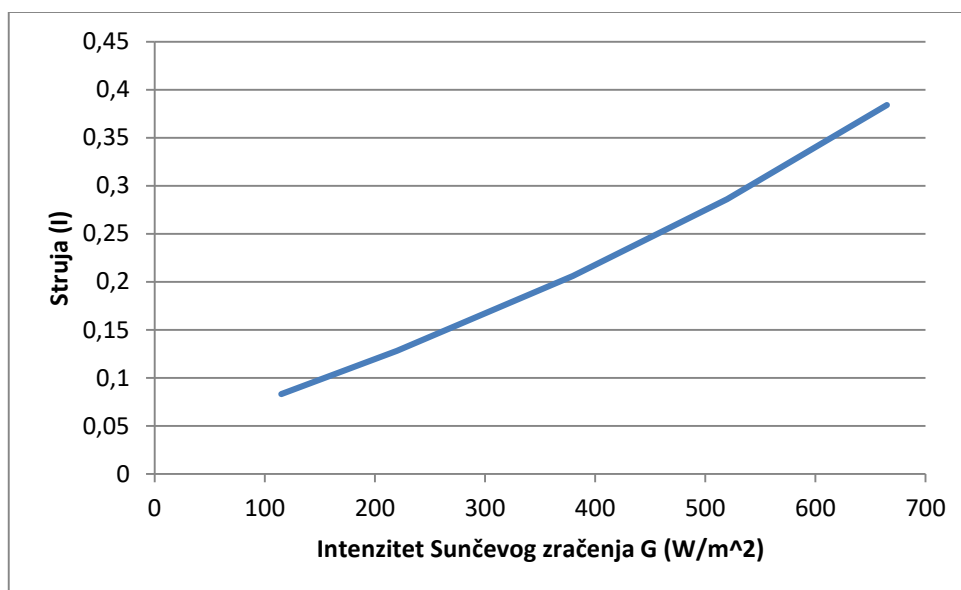
*Slika 4.6. Shema spoja*

U ovom pokusu promatrane se  $U - I$  karakteristike za tri modula pri promjeni jakosti Sunčevog zračenja. Kao što se može vidjeti iz dijagrama i rezultata mjerenja najveću izlaznu snagu daje modul SOLAR FRONTIER SF150 – S, a najmanju Bisol BMU – 250.

SOLAR FRONTIER SF150 – S



*Slika 4.7.  $U - I$  karakteristike pri različitim vrijednostima intenziteta Sunčevog zračenja za modul SOLAR FRONTIER SF150 - S*

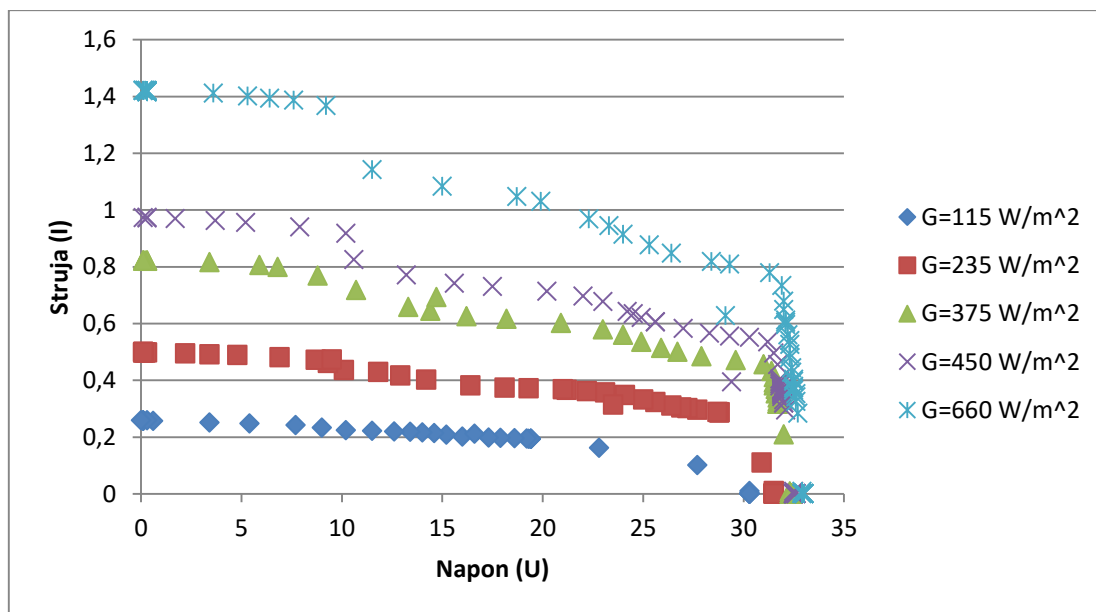


**Slika 4.8.** Ovisnost struje o promjeni intenziteta Sunčevog zračenja za modul SOLAR FRONTIER SF150 - S

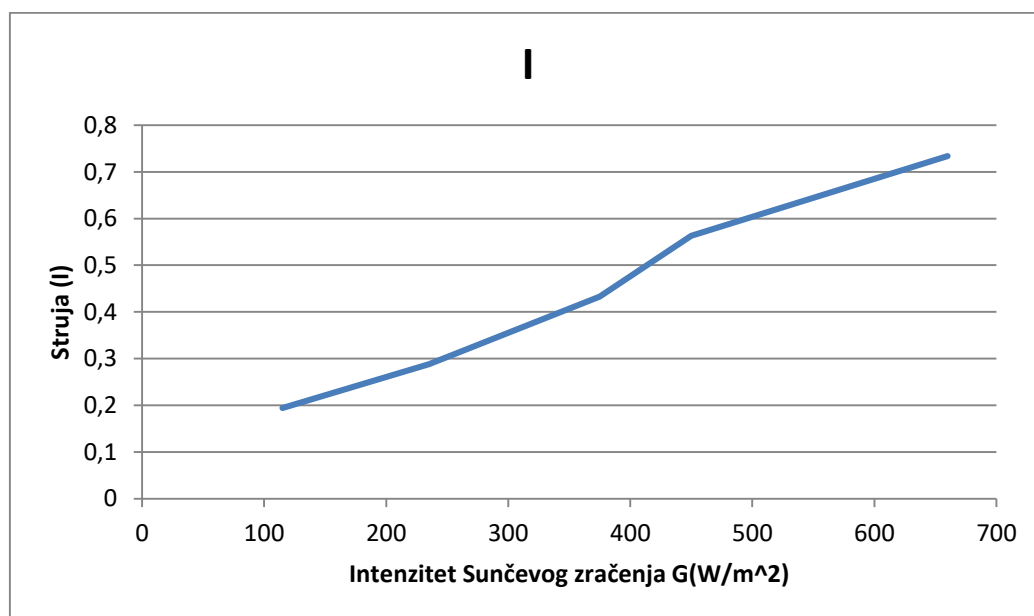
**Tablica 4.4.** Vrijednosti intenziteta Sunčevog zračenja, napona, struje i snage u točki maksimalne snage

$G[W/m^2]$	115	220	380	520	665
$U_{MPP}[V]$	70,5	89,4	90,7	92,5	91,7
$I_{MPP}[A]$	0,083	0,128	0,206	0,286	0,384
$P_{MPP}[W]$	5,85	11,44	18,68	26,45	35,21
$\eta[\%]$	4,14	4,23	4,003	4,14	4,31

Bisol BMU 250



*Slika 4.9. U – I karakteristike pri različitim vrijednostima intenziteta Sunčevog zračenja za modul Bisol BMU - 250*



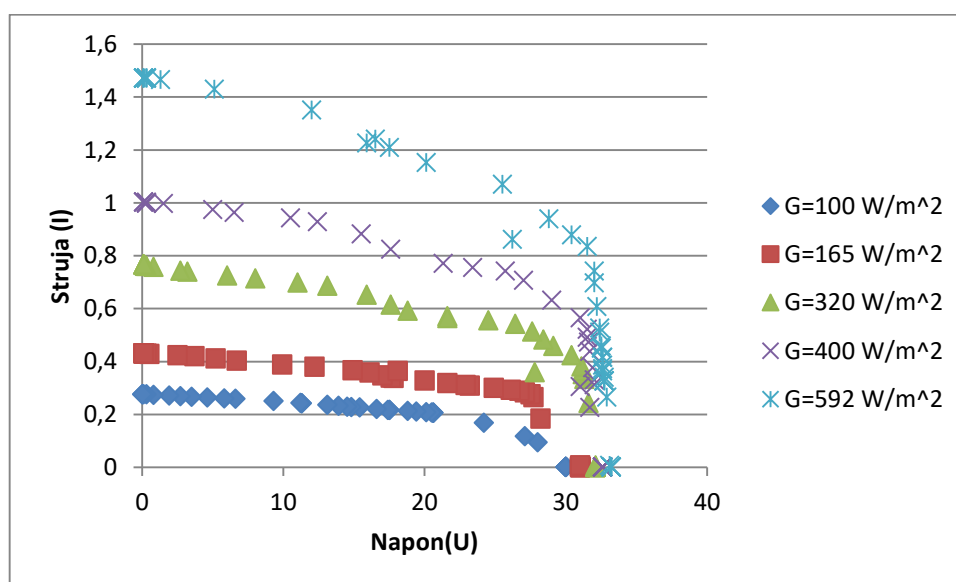
*Slika 4.10. Ovisnost struje o promjeni intenziteta Sunčevog zračenja za modul Bisol BMU - 250*



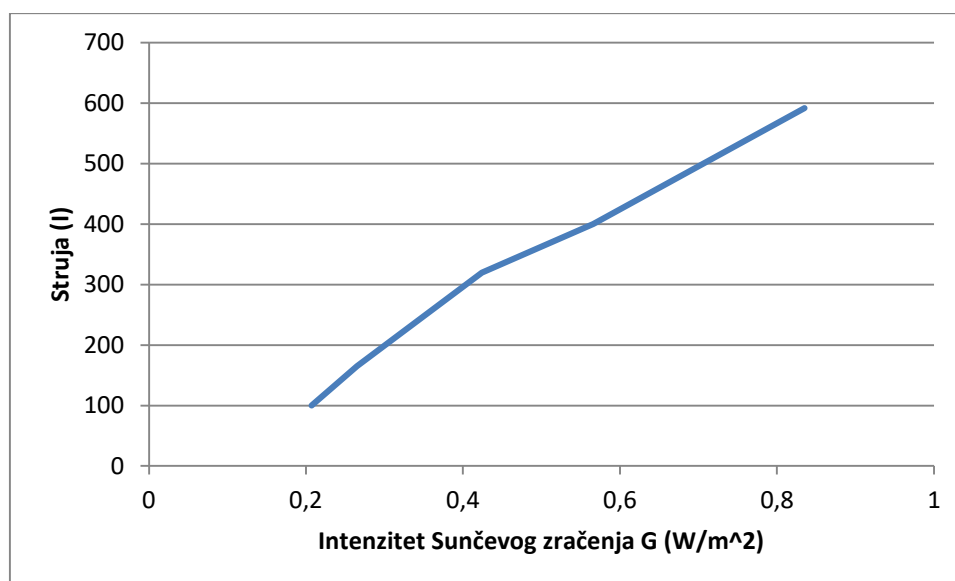
**Tablica 4.5.** Vrijednosti intenziteta Sunčevog zračenja, napona, struje i snage u točki maksimalne snage

$G[\text{W}/\text{m}^2]$	115	235	375	450	660
$U[\text{V}]$	19,3	28,8	31,4	31,2	31,9
$I[\text{A}]$	0,194	0,288	0,433	0,563	0,734
$P[\text{W}]$	3,74	8,29	13,6	17,57	23,41
$\eta[\%]$	1,99	2,16	2,2	2,39	2,17

Bisol BMO - 250



**Slika 4.11.**  $U - I$  karakteristike pri različitim vrijednostima intenziteta Sunčevog zračenja za modul Bisol BMO - 250



**Slika 4.12.** Ovisnost struje o promjeni intenziteta Sunčevog zračenja za modul Bisol BMO - 250

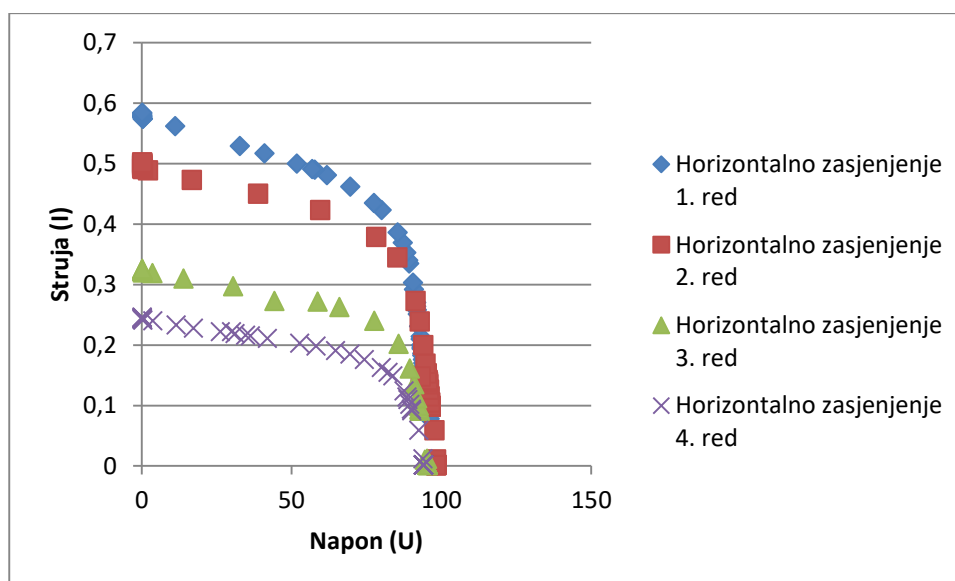
**Tablica 4.6.** Vrijednosti intenziteta Sunčevog zračenja, napona, struje i snage u točki maksimalne snage

$G[\text{W}/\text{m}^2]$	100	165	320	400	592
$U[\text{V}]$	20,6	27,7	30,4	31	31,5
$I[\text{A}]$	0,207	0,265	0,424	0,566	31,5
$P[\text{W}]$	4,26	7,34	12,89	17,55	26,3
$\eta[\%]$	2,6	2,72	2,47	2,69	2,72

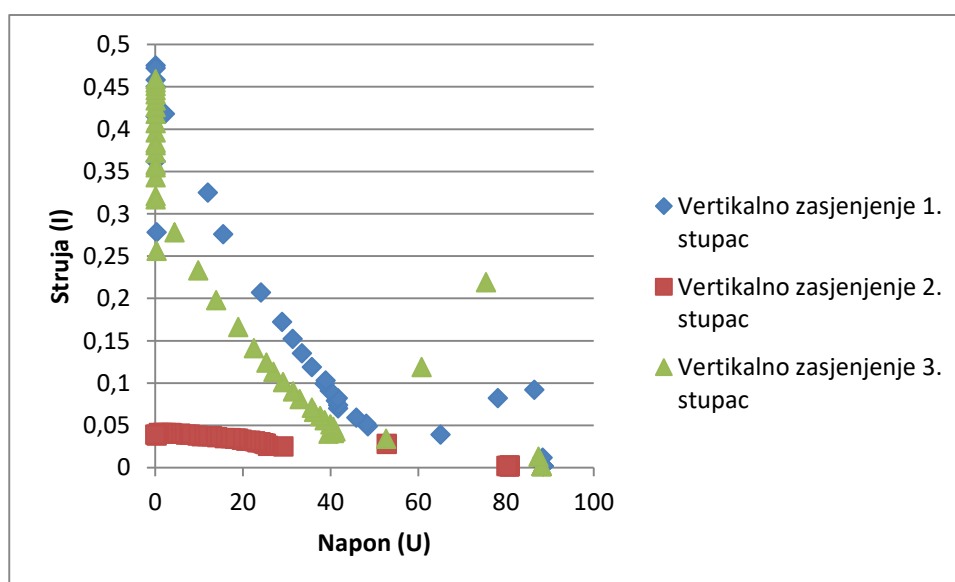
## Utjecaj zasjenjenja

### SOLAR FRONTIER SF150 –S

U ovome dijelu proračuna rađen je utjecaj zasjenjenja na snagu fotonaponskih modula. Zasjenjenje se simuliralo pomoću umjetnog sjenila, a rađeno je horizontalno zasjenjenje za četiri reda i vertikalno zasjenjenje za tri stupca. Što je zasjenjenje veće, snaga modula je manja. Snaga značajno opada kod svakog modula, najučinkovitiji je SOLAR FRONTIER SF150 – S, a najmanju učinkovitost ima Bisol BMU -.250.



*Slika 4.13. U – I karakteristike za četiri stupnja horizontalnog zračenja za modul SOLAR FRONTIER SF150 - S*



*Slika 4.14. U – I karakteristike za tri stupnja vertikalnog zračenja za modul SOLAR FRONTIER SF150 - S*

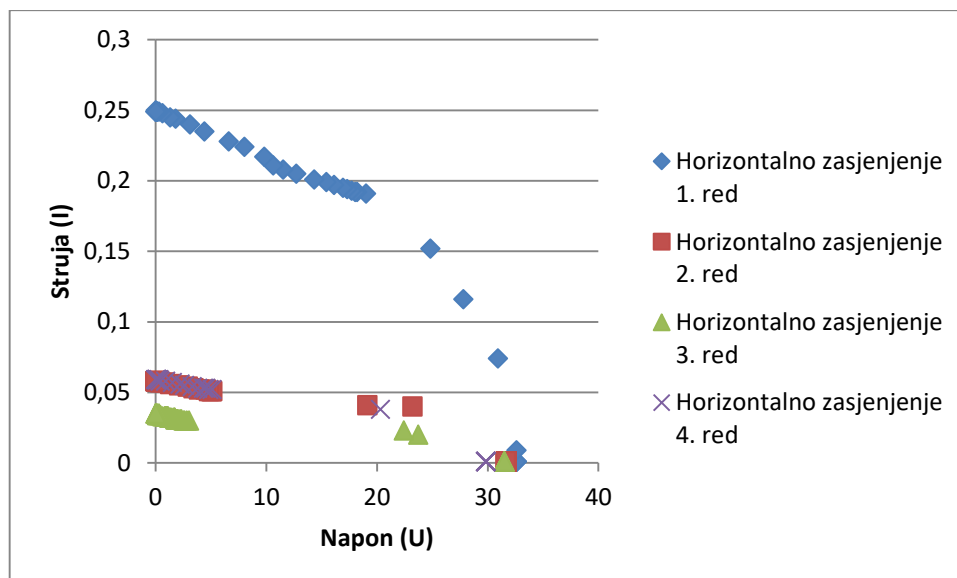
**Tablica 4.7.** Vrijednosti intenziteta Sunčevog zračenja, napona, struje, snage u točki maksimalne snage za četiri stupnja horizontalnog zasjenjenja

Redni broj	Horizontalno zasjenjenje 1. red	Horizontalno zasjenjenje 2.red	Horizontalno zasjenjenje 3.red	Horizontalno zasjenjenje 4.red
$G[\text{W}/\text{m}^2]$	665	665	665	665
$U[\text{V}]$	85,4	85,2	77,6	86,4
$I[\text{A}]$	0,386	0,345	0,240	0,092
$P[\text{W}]$	32,96	29,39	18,62	7,95
$\eta[\%]$	4,03	3,598	2,28	0,98

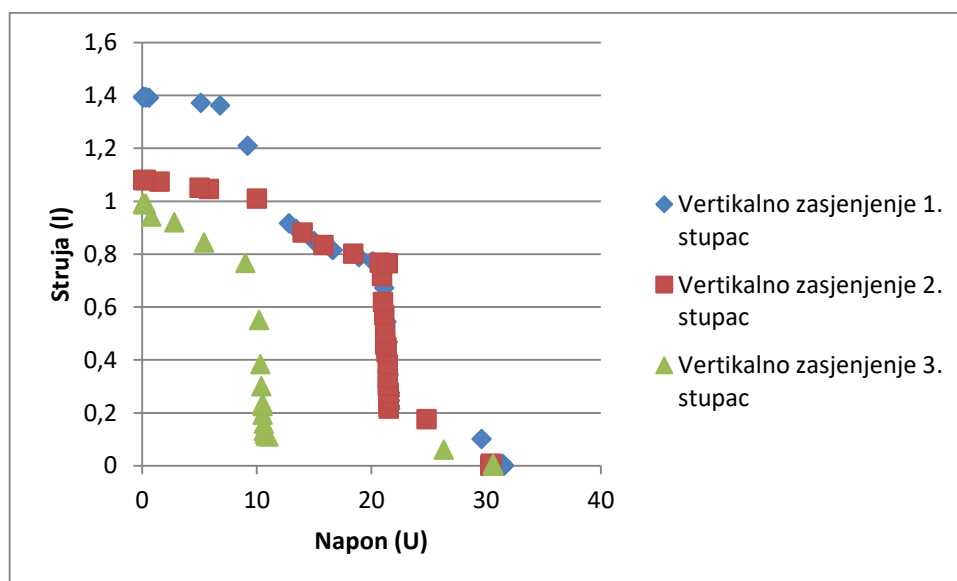
**Tablica 4.8.** Vrijednosti intenziteta Sunčevog zračenja, napona, struje, snage u točki maksimalne snage za tri stupnja vertikalnog zasjenjenja

Redni broj	Vertikalno zasjenjenje 1. Stupac	Vertikalno zasjenjenje 2. Stupac	Vertikalno zasjenjenje 3. Stupac
$G[\text{W}/\text{m}^2]$	665	665	665
$U[\text{V}]$	86,4	52,8	87,4
$I[\text{A}]$	0,092	0,028	0,013
$P[\text{W}]$	7,95	1,48	1,13
$\eta[\%]$	0,98	0,18	0,14

Bisol BMU 250 polikristalni



*Slika 4.15. U – I karakteristike za četiri stupnja horizontalnog zasjenjenja za modul Bisol BMU - 250*



*Slika 4.16. U – I karakteristike za tri stupnja vertikalnog zasjenjenja za modul Bisol BMU - 250*

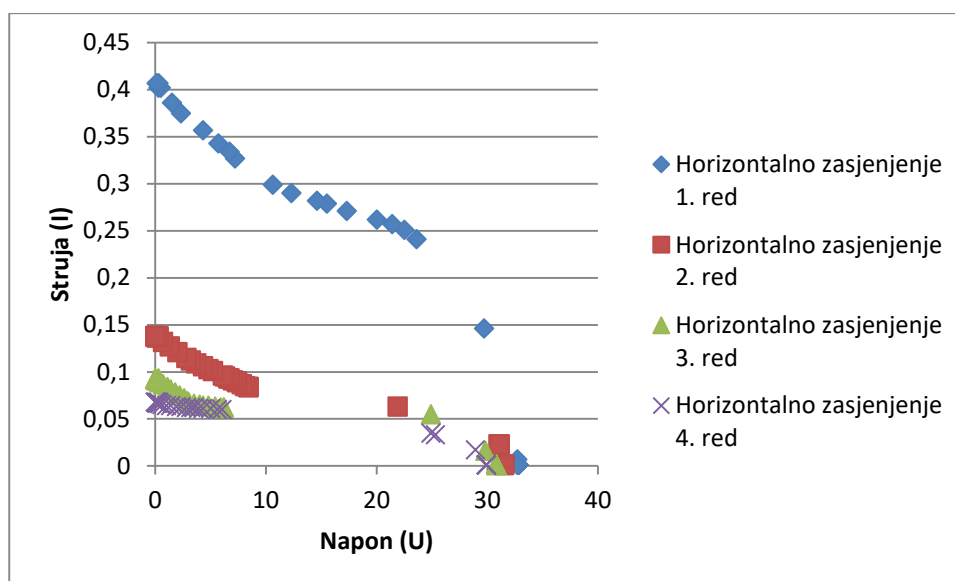
**Tablica 4.9.** Vrijednosti intenziteta Sunčevog zračenja, napona, struje, snage u točki maksimalne snage za četiri stupnja horizontalnog zasjenjenja

Redni broj	Horizontalno zasjenjenje 1. red	Horizontalno zasjenjenje 2. red	Horizontalno zasjenjenje 3. red	Horizontalno zasjenjenje 4. red
$G[\text{W}/\text{m}^2]$	665	665	665	665
$U[\text{V}]$	24,8	23,2	22,4	20,3
$I[\text{A}]$	0,152	0,928	0,51	0,77
$P[\text{W}]$	3,77	0,928	0,51	0,77
$\eta[\%]$	0,34	0,085	0,047	0,07

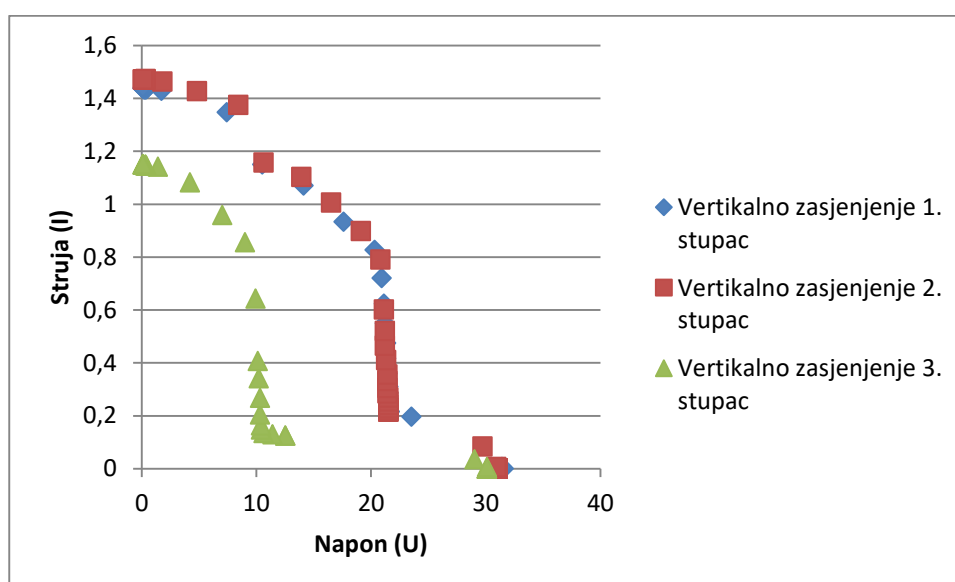
**Tablica 4.17.** Vrijednosti intenziteta Sunčevog zračenja, napona, struje, snage u točki maksimalne snage za tri stupnja vertikalnog zasjenjenja

Redni broj	Vertikalno zasjenjenje 1. stupac	Vertikalno zasjenjenje 2. stupac	Vertikalno zasjenjenje 3. stupac
$G[\text{W}/\text{m}^2]$	665	665	665
$U[\text{V}]$	20,1	19,1	26,3
$I[\text{A}]$	0,773	0,668	0,061
$P[\text{W}]$	15,54	12,76	1,6
$\eta[\%]$	1,43	1,17	0,15

Bisol BMO 250



*Slika 4.17. U – I karakteristike za četiri stupnja horizontalnog zračenja za modul Bisol BMO - 250*



*Slika 4.18. U – I karakteristike za tri stupnja vertikalnog zračenja za modul Bisol BMO - 250*

**Tablica 4.11.** Vrijednosti intenziteta Sunčevog zračenja, napona, stuje, snage u točki maksimalne snage za četiri stupnja horizontalnog zasjenjenja

Redni broj	Horizontalno zasjenjenje 1. red	Horizontalno zasjenjenje 2. red	Horizontalno zasjenjenje 3. red	Horizontalno zasjenjenje 4. red
$G[\text{W}/\text{m}^2]$	665	665	665	665
$U[\text{V}]$	26,3	21,9	24,9	25,3
$I[\text{A}]$	0,241	0,063	0,055	0,033
$P[\text{W}]$	6,33	1,38	1,32	0,83
$\eta[\%]$	0,58	0,13	0,12	0,076

**Tablica 4.12.** Vrijednosti intenziteta Sunčevog zračenja, napona, stuje, snage u točki maksimalne snage za tri stupnja vertikalnog zasjenjenja

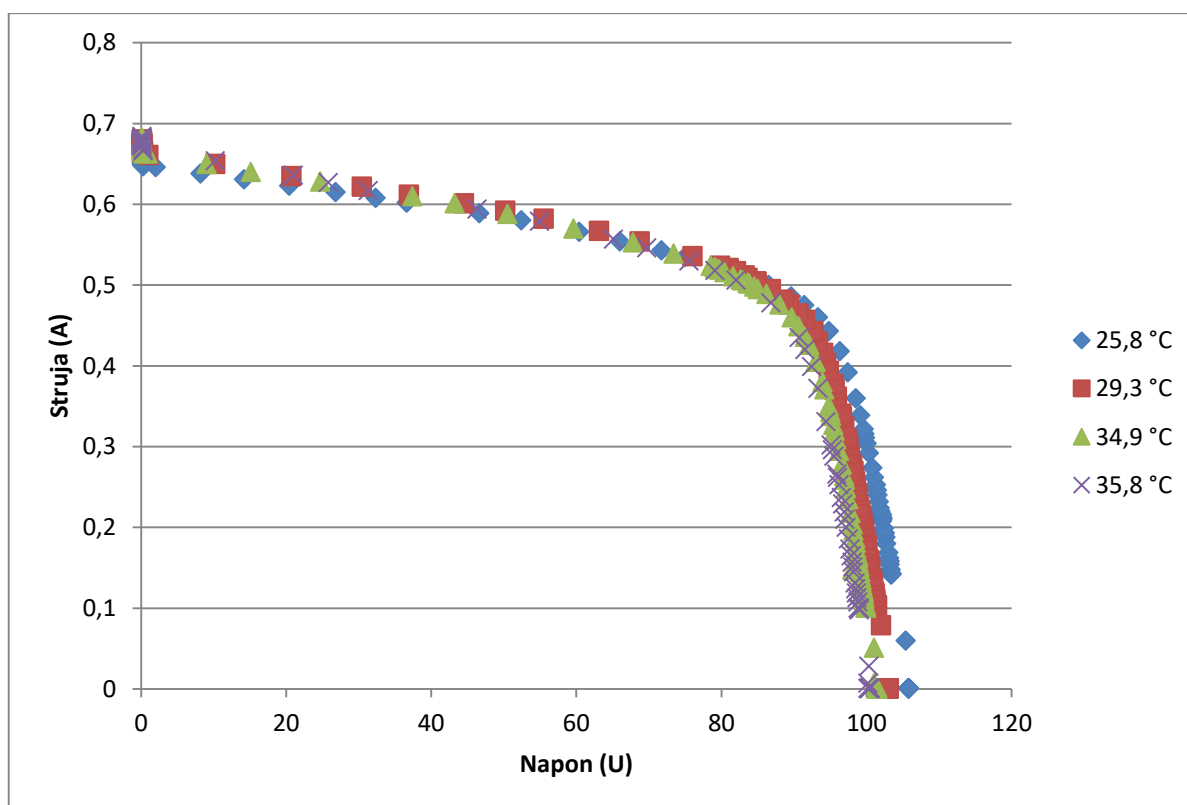
Redni broj	Vertikalno zasjenjenje 1. stupac	Vertikalno zasjenjenje 2. stupac	Vertikalno zasjenjenje 3. stupac
$G[\text{W}/\text{m}^2]$	665	665	665
$U[\text{V}]$	20,3	20,8	29
$I[\text{A}]$	0,827	0,791	0,036
$P[\text{W}]$	16,78	16,45	1,044
$\eta[\%]$	1,54	1,51	0,096

## Utjecaj temperature na napon

### SOLAR FRONTIER SF150 - S

U ovom dijelu proračuna prikazan je utjecaj promjene temperature na snagu fotonaponskog modula pri istim vrijednostima intenziteta Sunčevog zračenja, za četiri minute mjerenja. Povećanjem temperature modula, snaga modula opada iz minute u minutu, ali znatno manje nego kod promjene intenziteta zračenja i utjecaja zasjenjenja.



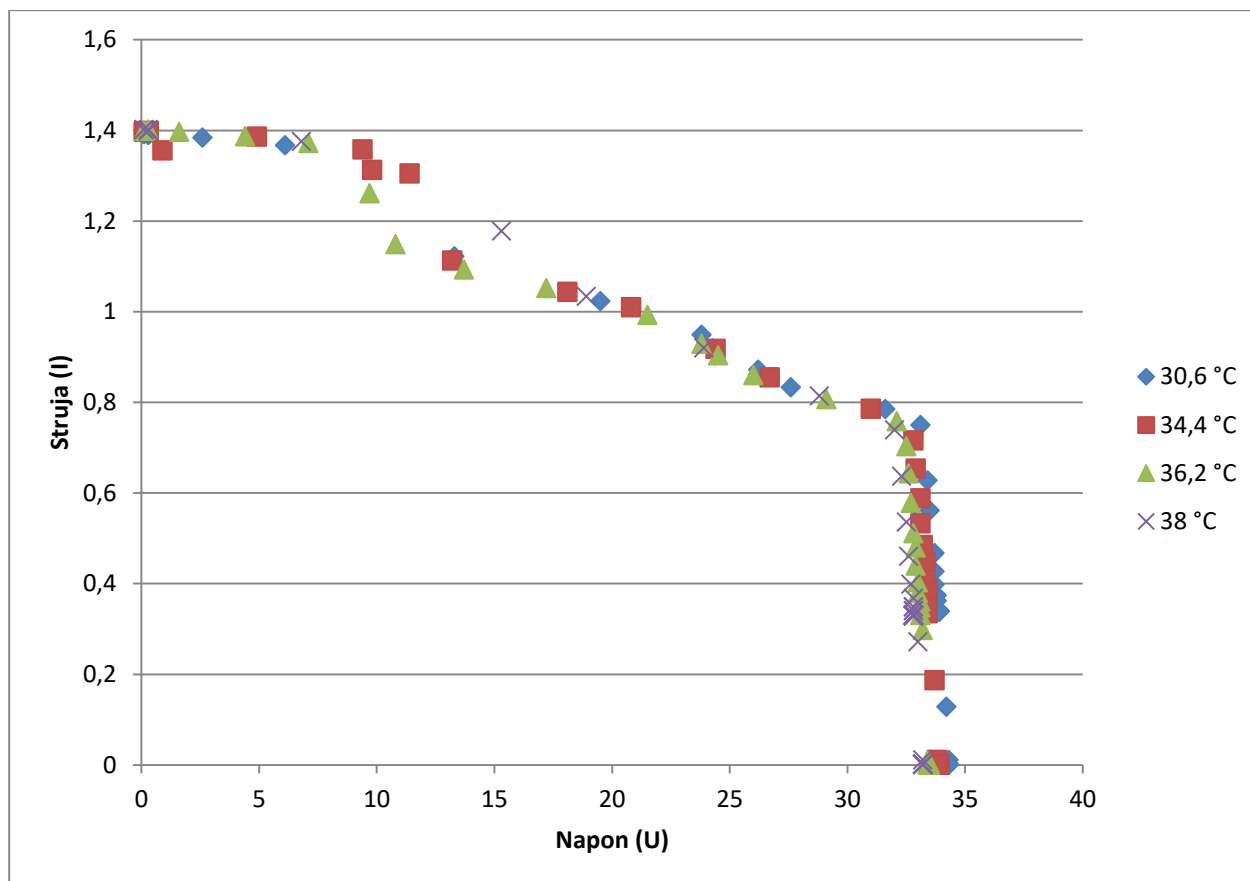


**Slika 4.19.**  $U - I$  karakteristike za različite temperature modula za modul SOLAR FRONTIER SF150 - S

**Tablica 4.13.** Vrijednosti napona, struje i snage u točki maksimalne snage za četiri minute mjerenja

Scenarij	$U_{MPP}[V]$	$I_{MPP}[A]$	$P_{MPP}[W]$	$\eta[\%]$
1. minuta	86,5	0,5	43,25	5,29
2. minuta	86,8	0,495	42,96	5,26
3. minuta	85	0,495	42,075	5,15
4. minuta	86,8	0,478	41,49	5,08

Bisol BMU 250

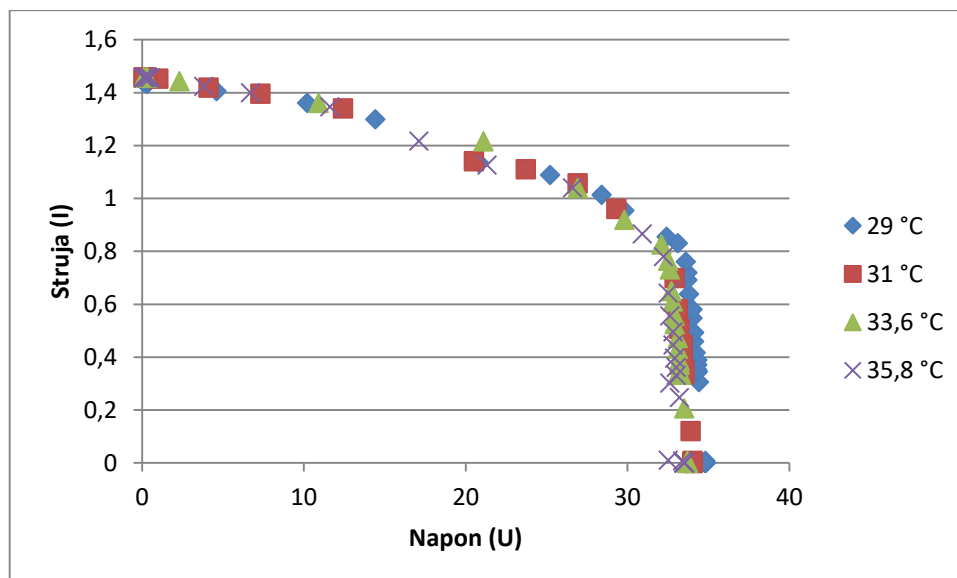


**Slika 4.20.**  $U - I$  karakteristike za različite temperature modula za modul Bisol BMU - 250

**Tablica 4.14.** Vrijednosti napona, struje i snage u točki maksimalne snage za četiri minute mjerenja

Scenarij	$U_{MPP}$ [V]	$I_{MPP}$ [A]	$P_{MPP}$ [W]	$\eta$ [%]
1. minuta	33,1	0,75	24,83	2,86
2. minuta	31	0,786	24,36	2,24
3. minuta	32,1	0,758	24,33	2,24
4. minuta	32	0,739	23,65	2,18

Bisol BMO 250



**Slika 4.21.**  $U - I$  karakteristike za različite temperature modula za modul Bisol BMO - 250

**Tablica 4.15.** Vrijednosti napona, struje i snage u točki maksimalne snage za četiri minute mjerenja

Scenarij	$U[V]$	$I[A]$	$P[W]$	$\eta[\%]$
1. minuta	33,1	0,831	37,5	3,45
2. minuta	32	0,7	23,42	2,15
3. minuta	32,6	0,732	23,86	2,2
4. minuta	32,2	0,78	25,116	2,31

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu dan je pregled čimbenika koji utječu na proizvodnju električne energije fotonaponskih sustava. U teorijskom dijelu objašnjeni su osnovni pojmovi koji o fotonaponskim sustavima, čimbenici koji utječu na proizvodnju električne energije fotonaponskih sustava, uz odgovarajuće slike, sheme i jednadžbe.

U praktičnom dijelu mjereni su utjecaj intenziteta zračenja na proizvodnju električne energije, utjecaj zasjenjenja i utjecaj temperature.

Što se tiče intenziteta zračenja, što je jači intenzitet, to je veća izlazna snaga fotonaponskih modula, što je bilo i za očekivati. Najveću izlazna snaga dobivena je od modula SOLAR FRONTIER SF150 – S, a najmanja od modula Bisol BMU – 250, nešto manja nego kod modula Bisol BMO – 250.

Što se tiče zasjenjenja, što je veće zasjenjenje, manja je snaga modula. Ovdje snaga značajno opada kod sva tri modula, a modul Bisol BMO – 250 pokazao malo učinkovitijim od modula Bisol BMU – 250.

Povećanjem temperature modula, odnosno zagrijavanjem, snaga iz minute u minutu opada kod svakog modula, kod modula SOLAR FRONTIER SF150 – S i Bisol BMU – 250 znatno manje nego kod modula Bisol BMO – 250.

## 6. SAŽETAK/ABSTRACT

U radu su prikazane strujno – naponske prilike fotonaponskih modula. Rad se sastoji od praktičnog i teorijskog dijela. U teorijskom dijelu opisani su fotonaponski sustavi u cjelini te čimbenici koji utječu na proizvodnju električne energije iz istih. U praktičnom dijelu rada promatrani su čimbenici koji utječu na proizvodnju električne energije tri različita fotonaponska modula. Na temelju rezultata mjerenja da se zaključiti da svaki čimbenik znatno utječe na učinkovitost fotonaponskih modula.

Ključne riječi : fotonaponski sustav, fotonaponski modul, snaga, utjecaj temperature, utjecaj zasjenjenja, intenzitet zračenja.

*Overwiev of the factors affecting the electricity production of photovoltaic systems*

*This paper presents the current-voltage conditions of the laboratory network photovoltaic modules. The work consists of a theoretical and practical part. The theoretical part describes the photovoltaic systems as a whole and the factors that affect the production of electricity from the same. In the practical part of the paper, factors affecting the production of electricity of three different photovoltaic modules have been observed. Based on the measurement results, it is concluded that each factor significantly affects the efficiency of the photovoltaic modules.*

*Key words: photovoltaic system, photovoltaic module, power, influence of temperature, influence of shading, irradiance.*

## 7. ŽIVOTOPIS

Davor Pastović rođen je u Slavonskom Brodu 2. veljače 1996. godine, Republika Hrvatska. Pohađao je osnovnu školu „ Ivana Kozarca “, u Županji. Godine 2010. upisao je Gimnaziju u Županji, opći smjer, te ju završilo 2014. Godine. Godine 2014. upisao je preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku. Na drugoj godini opredijelilo se za smjer „ Elektroenergetika “, a na diplomskom studiju za izborni blok „Elektroenergetski sustavi“. Fakultet je predstavljao u sportu, točnije košarci. Također se bavi amaterskom košarkom u KK Županja. Govori engleski jezik i informatički je pismen.

U Osijeku, 23. rujna 2019.

**8. LITERATURA**

[1] REN 21 – Global Status Report

[2] Electricity from Sunlight – Paul A. Lynn

[3] IEA „Projected Costs of Generating Electricity 2010. edition“, OECD publications, 2010.

[4] IRENA, „Renewable Power Generation Costs in 2014.“, 2015.

[5] PV Status Report 2018 | EU Science Hub

[http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC113626/pv\\_status\\_report\\_2018\\_online.pdf](http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC113626/pv_status_report_2018_online.pdf), 23. 06. 2019.

[6] Temperature and wind speed impact on the efficiency of PV installations. Experience obtained from outdoor measurements in Greece.

[7] Spectral irradiance effects on the outdoor performance of photovoltaic modules

[8] Matić Zdeslav: „Sunčevo zračenje na području Republike Hrvatske, Priručnik za energetska korištenje Sunčevog zračenja“, Energetski institut Hrvoje Požar, Zagreb, 2007

[9] Opis i rad fotonaponske elektrane od 1 MW

<https://repozitorij.unin.hr/islandora/object/unin%3A1967/datastream/PDF/view>, 28. 08. 2019.

[10] Određivanje optimalnog nagiba i orijentacije fotonaponskih modula

<https://repozitorij.etfos.hr/islandora/object/etfos%3A1547/datastream/PDF/view>, 01. 09. 2019.

[11] Mjerenje strujno – naponskih prilika laboratorijskog mrežnog fotonaponskog sustava

<https://zir.nsk.hr/islandora/object/etfos%3A1599/datastream/PDF/view>, 10. 09. 2019.

[12] CARNet Ims – loomen, E – kolegij: Obnovljivi izvori električne energije DEB2 – 05 (Obnovljivi izvori energije DIE103)

[https://loomen.carnet.hr/pluginfile.php/1061320/mod\\_resource/content/2/OIelen\\_2017\\_2018\\_3p\\_oglavljje.pdf](https://loomen.carnet.hr/pluginfile.php/1061320/mod_resource/content/2/OIelen_2017_2018_3p_oglavljje.pdf), 25. 06. 2019.

[13] Sveučilište u Zagrebu – FSB, Završni rad, Ante Žiher

[http://repositorij.fsb.hr/4980/1/%C5%BDiher\\_2016\\_diplomski.pdf](http://repositorij.fsb.hr/4980/1/%C5%BDiher_2016_diplomski.pdf), 25. 06. 2019.

[14] Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells.