

# Utjecaj temperature na performanse fotonaponskih ćelija

---

Perišić, Klara

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:200:928156>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-23**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijskih tehnologija**

**UTJECAJ TEMPERATURE NA PERFORMANSE  
FOTONAPONSKIH ĆELIJA**

**Završni rad**

**Klara Perišić**

**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>	Klara Perišić
<b>Studij, smjer:</b>	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. pristupnika, god.</b>	4871, 29.07.2020.
<b>JMBAG:</b>	0165087821
<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 temperature na performanse fotonaponskih ćelija
<b>Znanstvena grana završnog rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak završnog rada:</b>	Opisati princip pretvorbe energije sunčevog zračenja u električnu pomoću fotonaponskih ćelija i utjecaja temperaure na njihove performanse. Napraviti pregled literature u području modeliranja utjecaja temperature na performanse fotonaponskih ćelija. Ispitati utjecaj temperature na performanse fotonaponskih modula i analizirati rezultate mjerenja. Sumentor - voditelj: dr.sc. Matej Žnidarec Tema za studenticu: Klara Perišić
<b>Datum prijedloga ocjene završnog rada od strane mentora:</b>	20.09.2024.
<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:	Klara Perišić
Studij:	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	4871, 29.07.2020.
Turnitin podudaranje [%]:	6

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Utjecaj temperature 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 .....</b>	<b>2</b>
<b>3. SUNČEVO ZRAČENJE.....</b>	<b>4</b>
3.1. Direktno Sunčevo zračenje .....	4
3.2. Difuzno Sunčevo zračenje.....	5
3.3. Reflektirano Sunčevo zračenje .....	7
3.4. Geometrija Sunčevog zračenja .....	8
<b>4. FOTONAPONSKA ČELIJA .....</b>	<b>11</b>
4.1. Fotonaponski moduli .....	13
4.2. Standardni testni uvjeti .....	16
4.3. Nominalna radna temperatura ćelije .....	17
4.4. Modeliranje fotonaponske ćelije s jednom diodom.....	18
4.4.1. Idealna fotonaponska ćelije (1M4P).....	19
4.4.2. Fotonaponske ćelije sa serijskim otporom .....	20
4.4.3. Fotonaponska ćelija sa serijskim i paralelnim otporima (1M5P) .....	21
4.5. Utjecaj pojedinih faktora na fotonaponske ćelije s jednom diodom.....	22
4.5.1. Utjecaj zračenja i temperature.....	22
4.5.2. Utjecaj serijskog otpora i temperature.....	23
4.5.3. Utjecaj paralelnog otpora i temperature.....	25
4.5.4. Utjecaj paralelnog i serijskog otpora .....	26
4.5.5. Utjecaj paralelnog otpora i zračenja .....	26
4.6. Usporedba 3 modela fotonaponske ćelije s jednom diodom .....	27
<b>5. ISPITIVANJE UTJECAJA TEMPERATURE NA PERFORMANSE FOTONAPONSKIH MODULA RAZLIČITIH TEHNOLOGIJA IZRADE .....</b>	<b>29</b>
5.1. Metodologija ispitivanja .....	29
5.2. Utjecaj temperature na performanse modula Panasonic VBH240SE10 .....	29
5.3. Utjecaj temperature na performanse modula Solar Frontier SF 150-S .....	34
<b>6. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>39</b>

<b>LITERATURA .....</b>	<b>40</b>
<b>SAŽETAK .....</b>	<b>42</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>43</b>
<b>ŽIVOTOPIS .....</b>	<b>44</b>

# 1. UVOD

U svijetu koji se suočava s izazovima globalnog zatopljenja i iscrpljivanja tradicionalnih izvora energije, potreba za održivim i ekološki prihvatljivim rješenjima postaje sve urgentnija. Sunčeva energija, kao jedan od najvažnijih obnovljivih izvora energije, igra ključnu ulogu u suvremenim naporima za smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima i borbi protiv klimatskih promjena. Korištenje sunčeve energije za proizvodnju električne energije putem fotonaponskih sustava postaje sve popularnije zbog njene neiscrpnosti, ekološke prihvatljivosti i dugoročne isplativosti. Ipak, učinkovitost fotonaponskih sustava nije uvijek konstantna i može biti znatno narušena različitim vanjskim čimbenicima, a u ovom ćemo završnom radu istražiti kako temperatura, kao jedan od tih čimbenika, utječe na performanse fotonaponskih ćelija. Razumijevanje ovog odnosa omogućit će bolje projektiranje i optimizaciju solarnih sustava za različite klimatske uvjete, čime se osigurava maksimalna učinkovitost i dugoročna pouzdanost solarnih instalacija.

## 1.1. Zadatak završnog rada

Opisati princip pretvorbe energije sunčevog zračenja u električnu pomoću fotonaponskih ćelija i utjecaja temperature na njihove performanse. Napraviti pregled literature u području modeliranja utjecaja temperature na performanse fotonaponskih ćelija. Ispitati utjecaj temperature na performanse fotonaponskih modula i analizirati rezultate mjerenja.

## 2. PREGLED PODRUČJA

Danas je dobro dokumentirana električna učinkovitost fotonaponskih ćelija ovisno o njihovoj radnoj temperaturi. Postoje mnoge korelacije koje temperaturu fotonaponske ćelije  $T_c$  izražavaju kao funkciju vremenskih varijabli poput ambijentalne temperature  $T_a$ , lokalne brzine vjetra  $V_w$  kao i gustoće snage sunčevog zračenja  $G_T$ .

U literaturi [1] objašnjeno je da zbog dominacije termičkih uzbuđenih elektrona nad električnim svojstvima poluvodiča, napon otvorenog kruga i faktor popunjenosti opadaju s temperaturom, dok struja kratkog spoja raste, ali neznatno.

Linearni izraz za električnu učinkovitost fotonaponskog modula predstavljen je u literaturi [2], a literatura [3] objašnjava da, iako količine električne učinkovitosti modula na referentnoj temperaturi kao i koeficijent temperature inače daje proizvođač fotonaponskih modula, moguće ih je dobiti iz tzv. "flash" testova u kojima se električni izlaz modula mjeri na dvije različite temperature za određenu gustoću snage sunčevog zračenja.

Rad [4] objašnjava kako je iz perspektive projektanta fotonaponskih sustava, najvažnije je pravilno dimenzionirati instalaciju i osigurati stvarni energetske prinos. Proizvođačeve performanse modula pri standardnim testnim uvjetima ne mogu predvidjeti stvarnu proizvodnju energije. Postoje prijedlozi za ocjenjivanje energije modula uzimajući u obzir terenske uvjete.

Spektralne karakteristike upadne sunčeve radijacije uzimaju se u obzir u složenijem postupku ocjenjivanja energije modula (MER) razvijenom u Nacionalnom laboratoriju za obnovljivu energiju u SAD-u za pet referentnih dana ("vruće-sunčano", "hladno-sunčano", "vruće-oblačno", "hladno-oblačno" i "lijep dan") kao u literaturi [5]. Metoda koristi laboratorijska ispitivanja za određivanje električne izvedbe modula i korekcijskih faktora. Korištenjem meteoroloških podataka izračunavaju se temperatura modula i upadni solarni tok za svaki sat referentnih dana, uzimajući u obzir spektralne i toplinske karakteristike.

Metoda američkog Sandia Nacionalnog Laboratorija oslanja se na vanjska ispitivanja za određivanje parametara izvedbe modula i primjenjiva je na sve fotonaponske tehnologije [6]. Metoda uključuje cjelodnevna  $I-V$  mjerenja s dvoosnim tragačem Sunca, postupak sjenčanja/odsjenčavanja za određivanje temperaturnih koeficijenata i programiranu sekvencu pomicanja tragača Sunca. Time se kvantificiraju toplinski, spektralni i utjecaj kuta upada, linearizirajući elemente modela [7]. Novi empirijski toplinski model je jednostavniji, zadržavajući točnost od  $\pm 5$  °C [8].



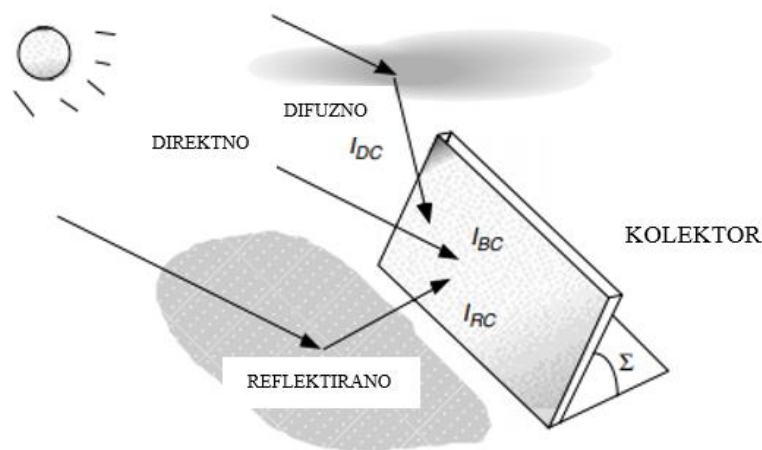
U literaturi [9] predstavljen je nedavni jednostavniji pristup koristi standardna mjerenja za određivanje izlazne energije kao funkcije globalne snage sunčevog zračenja i ambijentalne temperature. Metoda uključuje stvaranje "površine izvedbe" modula kao funkcije  $G_T$  i  $T_a$  te predviđanje energije koristeći distribuciju okolišnih uvjeta za lokaciju. Metoda je testirana na modulima kristaličnog silicija u Europskoj solarnoj testnoj instalaciji i predloženo je jednostavno označavanje energetske ocjene fotonaponskog modula.

Metoda "AM/PM", predložena od ARCO Solar (sada Siemens Solar Industries), temelji se na isporuci energije tijekom standardnog solarnog dana s referentnom temperaturom i raspodjelom ukupnog solarnog zračenja [10]. Predloženo je korištenje "realnih uvjeta izvještavanja" (RRC) za ocjenjivanje fotonaponskog modula, koji daju specifične karakteristike temeljem mikroklimatskih uvjeta po literaturi [11]

Operativna temperatura igra ključnu ulogu u fotonaponskom procesu pretvorbe. Električna učinkovitost i izlazna snaga fotonaponskog modula linearno ovise o operativnoj temperaturi, smanjujući se s porastom  $T_C$ . Predložene korelacije u literaturi predstavljaju pojednostavljene radne jednadžbe koje se primjenjuju na fotonaponske module ili nizove na samostojećim okvirima i fotonaponske/termalne kolektore. One uključuju osnovne okolišne varijable, dok su numerički parametri ovisni o materijalu i sustavu. Stoga treba pažljivo primijeniti određenu jednadžbu za električnu učinkovitost ili izlaznu snagu fotonaponskog modula, jer je svaka razvijena za specifičnu geometriju okvira ili razinu integracije u zgradu. Isto vrijedi i za odabir metode ocjenjivanja fotonaponskog modula; detalji i ograničenja trebaju biti jasni korisnicima.

### 3. SUNČEVO ZRAČENJE

Radijacija sunca ili jednostavno zvana, sunčeva svjetlost, opći je pojam za elektromagnetsko zračenje koje emitira sunce, gigantska termonuklearna peć, promjera 1,4 milijuna km, koja spaja atome vodika s helijem. Korištenjem raznih tehnologija, sunčeva se energija može prikupiti i pretvoriti u druge oblike, poput električne energije i topline. Međutim, tehnička izvedivost i ekonomska isplativost ovih tehnologija te dizajniranje i analiza solarnih sustava, zahtjeva poznavanje raspoloživosti energije sunca na određenoj lokaciji. Svako mjesto na Zemlji prima sunčevu svjetlost barem dio godine, a količina njegove radijacije varira prema: geografskom položaju, godišnjem dobu, vremenu dana te lokalnom krajoliku i lokalnoj meteorološkoj prognozi. Snop svjetlosnih zraka koji dopijeva do kolektora kombinacija je: direktnog – do prijemnika prolazi ravno kroz atmosferu, difuznog – nastalo raspršenjem sunčevih zraka u atmosferi i do prijemnika dolazi iz svih smjerova neba te reflektiranog zračenja – do prijemnika dolazi nakon što je odbijeno od tlo ili neku drugu površinu ispred kolektora. U većini fotonaponskih sustava sve tri komponente, vidljive na slici Slika 3.1. mogu doprinijeti ukupnoj prikupljenoj energiji, a izuzetak su kolektori koji fokusiraju sunčevu svjetlost jer djeluju samo na dijelu snopa dolaznog zračenja [12].



Slika 3.1. Sunčevo zračenje koje udara u kolektor,  $I_C$ , kombinacija je direktnog zračenja,  $I_{BC}$ , difuznog zračenja,  $I_{DC}$ , i reflektiranog zračenja,  $I_{RC}$  [12]

### 3.1. Direktno Sunčevo zračenje

Prijenos direktnog snopa zračenja  $I_B$  u snop zračenja koji udara u površinu kolektora  $I_{BC}$  jednostavna je funkcija kuta upada  $\theta$  između linije nacrtane okomito na površinu kolektora i dolaznog snopa zračenja. To se izražava kao u formuli ((3-1)) [12]:

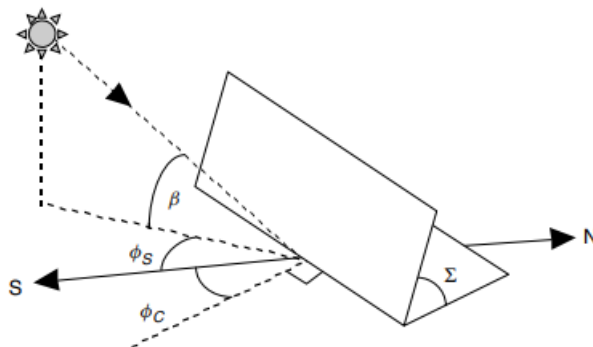
$$I_{BC} = I_B \cos \theta \quad (3-1)$$

Za poseban slučaj snopa zračenja na horizontalnoj površini  $I_{BH}$  koristimo izraz ((3-2)) [12]:

$$I_{BH} = I_B \cos(90^\circ - \beta) = I_B \sin \beta \quad (3-2)$$

Kut upada  $\theta$  bit će funkcija orijentacije kolektora te kuta visine i azimutnog kuta Sunca u bilo kojem trenutku. Slika 3.2. uvodi ove važne kutove. Solarni kolektor je nagnut pod kutom  $\Sigma$  i okrenut je u smjeru opisanom njegovim azimutnim kutom  $\varphi_C$ . Kut upada je dan s izrazom ((3-3)) [12]:

$$\cos \theta = \cos \beta \cos(\varphi_S - \varphi_C) \sin \Sigma + \sin \beta \cos \Sigma \quad (3-3)$$

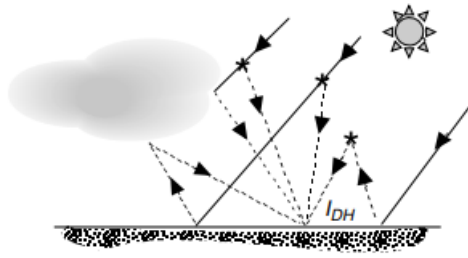


Slika 3.2. Azimutni kut kolektora  $\varphi_C$  i kut nagiba  $\Sigma$  zajedno s azimutnim kutom Sunca  $\varphi_S$  i kutom visine  $\beta$  [12]

### 3.2. Difuzno Sunčevo zračenje

Ukoliko razmotrimo raznolikost stavki koje čine difuznu radijaciju prikazanu na 3.3., možemo zaključiti da je ovu radijaciju na kolektoru mnogo teže precizno procijeniti nego izravnu. Dolazno

zračenje može biti raspršeno od atmosfere čestice i vlagu, a može biti i reflektirano od oblaka. Dio se odbija od površinu natrag u nebo i ponovno raspršuje natrag na zemlju [12].



Slika 3.3. Azimutni kut kolektora  $\varphi_c$  i kut nagiba  $\Sigma$  zajedno s azimutnim kutom Sunca  $\varphi_s$  i kutom visine  $\beta$  [12]

Threkeld i Jordan 1958. razvili su model koji se koristi u ASHRAE Clear-Day Solar Flux Modelu, a implicira to da je difuzna insolacija na horizontalnoj površini  $I_{DH}$  proporcionalna izravnoj zračnoj radijaciji  $I_B$  bez obzira na to gdje se Sunce na nebu nalazi, vidljivo iz formule (3-4) [12]:

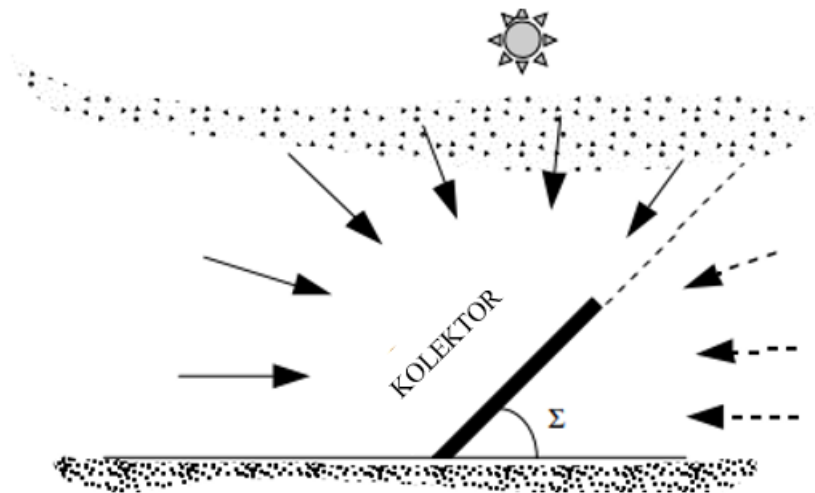
$$I_{DH} = C I_B \quad (3-4)$$

gdje je  $C$  faktor difuzije neba. Praktična aproksimacija dana je jednadžbom (3-5) [12]:

$$C = 0.095 + 0.004 \sin \left[ \frac{360}{365} (n - 100) \right] \quad (3-5)$$

Primjena jednadžbe na cjelodnevno sunčano nebo predviđa da će otprilike 15% ukupne horizontalne insolacije na vedar dan biti difuzno. Ono što bismo željeli znati je koliko horizontalnog raspršenog zračenja pogodi kolektor kako bismo to mogli dodati izravnom zračenju. Prva je pretpostavka da difuzna radijacija na mjesto stiže s jednakim intenzitetom iz svih smjerova, što znači da će kolektor biti izložen onom djelu neba prema kojem je usmjerena njegova površina; kao što je prikazano na slici 3.4. Ukoliko je panel položen na tlo, tj. kut nagiba kolektora jednak je nuli – panel gleda prema cijelom nebu i prima maksimalno horizontalno difuzno zračenje,  $I_{DH}$ . Ukoliko je panel postavljen vertikalno, gleda prema polovici neba pa je izložen polovici radijacije itd. Jednadžbu koristimo kada je raspršena radijacija idealizirana na način (3-6) [12]:

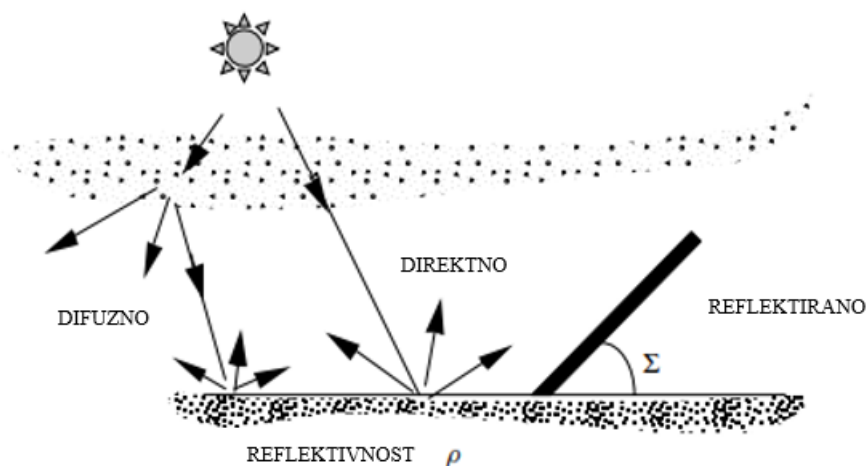
$$I_{DC} = I_{DH} \left( \frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right) = C I_B \left( \frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right) \quad (3-6)$$



Slika 3.4. Difuzno zračenje koje pada na površinu kolektora [12]

### 3.3. Reflektirano Sunčevo zračenje

Završna komponenta insolacije koja upada na uređaj rezultat je zračenja koje je reflektirano površinama ispred panela. Ukoliko je npr. dan svijetao sa snijegom ili vodom ispred kolektora, ova refleksija može pružiti značajan poticaj u performansama. Na slici Slika 3.5. prikazan je najjednostavniji model reflektirane sunčeve radijacije koji pretpostavlja postojanje velike horizontalne plohe ispred kolektora, s reflektivnošću  $\rho$  koja je difuzna te odbija reflektirano svjetlo pod jednakim intenzitetom u svim smjerovima. Naravno, ovo je vrlo gruba pretpostavka, osobito ako je površina glatka i svijetla [12].



Slika 3.5. Tlo reflektira zračenje jednakim intenzitetom u svim smjerovima [12]

Količina reflektiranog zračenja može se modelirati kao umnožak reflektivnosti tla  $\rho$  i ukupne horizontalne insolacije koja je zbroj direktne i difuzne te sukladnom s tim da udio energije reflektirane od tlo koju će presresti kolektor ovisi o nagibu panela  $\Sigma$ , rezultira izraz (3-7) za reflektirano zračenje koje upada na IRC kolektor [12]:

$$I_{RC} = \rho(I_{BH} + I_{DH}) \left( \frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right) \quad (3-7)$$

Prema jednadžbi 3-4, za horizontalno postavljeni kolektor ( $\Sigma=0$ ) slijedi da nema reflektiranog zračenja, a za vertikalno postavljeni panel pretpostavlja da „vidi“ polovicu radijacije. Supstitucijom izraza za direktno sunčevo zračenje ((3-2)) i (3-4) u (3-7) dobivamo konačni izraz (3-8) za reflektiranu radijaciju na kolektoru [12]:

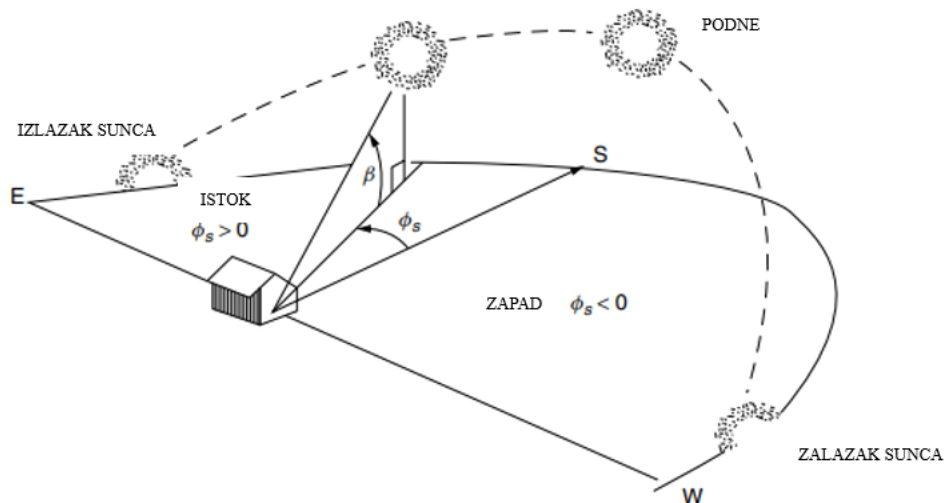
$$I_{RC} = \rho(I_{BH} + I_{DH}) \left( \frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right) \quad (3-8)$$

### 3.4. Geometrija Sunčevog zračenja

Pri osmišljavanju bilo kojeg sustava za čiji rad zračenje Sunca ima svojevrсни utjecaj, važno je u obzir uzeti sezonske i satne promjene Sunčevog položaja koji se opisuje kroz kutove:  $\beta$  – solarna visina ili elevacija, što označava kut lokacije Sunca u odnosu na horizontalu te  $\varphi_s$  – azimutski kut Sunca, a kasnije ćemo uvesti i  $\varphi_c$  – azimutski kut za solarni kolektor. Kutovi  $\beta$  i  $\varphi_s$  prikazani su na slici 3.6., a jednadžbe (3-9) i (3-10) omogućuju nam njihovo računanje [12]:

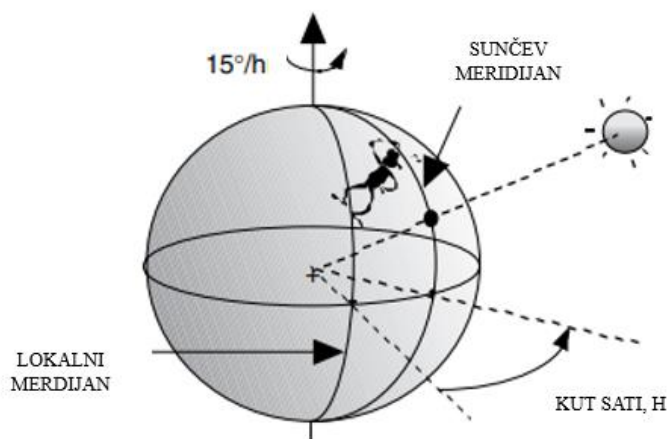
$$\sin \beta = \cos L \cos \delta \cos H + \sin L \sin \delta \quad (3-9)$$

$$\sin \varphi_s = \frac{\cos \delta \sin H}{\cos \beta} \quad (3-10)$$



Slika 3.6. Položaj Sunca opisan njegovim kutom visine  $\beta$  i azimutalnim kutom  $\varphi_s$ . Prema konvenciji, azimutalni kut se smatra pozitivnim prije solarnog podneva [12]

Kut sati  $H$ , točke na površini Zemlje, u jednadžbama (3-9) i (3-10) predstavlja broj stupnjeva za koje se Zemlja mora rotirati da bi meridijan te točke, tzv. lokalni meridijan, bio izravno ispod Sunca. Pored lokalnog, postoji i Sunčev meridijan, a razlika između njih upravo je u  $H$ , vidljivo iz slike 3.7. Kut sati prijepodne ima pozitivne, a u poslijepodnevni satima, nakon što Sunce pređe lokalni meridijan, ima negativne vrijednosti [12].



Slika 3.7. Razlika između Sunčevog meridijana i lokalnog meridijana [12]

Ukoliko u obzir uzmemo da se Zemlja u 24 sata okrene za  $360^\circ$ , odnosno za  $15^\circ$  svakih sat vremena,  $H$  se može opisati na način (3-11) [12]:

$$\text{Kut sati } H = \left( \frac{15^\circ}{\text{sat}} \right) \cdot (\text{sati prije solarnog podneva}) \quad (3-11)$$

Prema tome,  $H$  bi u 11:00 prema solarnom vremenu bio  $+15^\circ$  - što znači da je Zemlji potrebno rotirati se za još  $15^\circ$  (tj. 1 sat) prije solarnog podneva; dok bi  $H$  poslijepodne, npr. 14:00, bio  $-30^\circ$  itd.

Moguća komplikacija pri pronalaženju Sunčevog azimuta izgledna je tijekom proljeća i ljeta rano ujutro ili kasno poslijepodne kada ovaj kut može biti za više od  $90^\circ$  udaljen od juga, a postupak kojim možemo provjeriti je li to slučaj je slijedeći (3-12) [12]:

$$\cos H \geq \frac{\tan \delta}{\tan L}, \text{ onda } |\varphi_s| \leq 90^\circ; \text{ inače } |\varphi_s| > 90^\circ \quad (3-12)$$



## 4. FOTONAPONSKA ČELIJA

Kažemo da je materijal ili uređaj fotonaponski ako može pretvoriti energiju sadržanu u fotonima svjetlosti u električni napon ili struju. Stoga, elektronički uređaj koji pretvara energiju sunčevog zračenja koje doseže Zemlju u obliku svjetlosti (fotona) u električnu energiju (elektrone) zahvaljujući fotoelektričnom efektu nazivamo fotonaponskom ćelijom. Foton s dovoljno kratkom valnom duljinom i dovoljno visokom energijom može uzrokovati da elektron u fotonaponskom materijalu pobjegne iz atoma koji ga drži. Ako se osigura obližnje električno polje, ti elektroni mogu biti usmjereni prema metalnom kontaktu gdje mogu stvoriti električnu struju. Glavni događaji u povijesti razvoja fotonaponskih ćelija uključuju [13]

- otkriće fotoelektričnog efekta od strane Alexandre-Edmonda Becquerela 1839. godine
- Charles Frittsova izgradnja prve solarne ćelije s učinkovitošću od 1% 1883. godine
- veliki napredak 1954. kada laboratorij Bell u Sjedinjenim Državama slučajno otkriva da su silicijski poluvodiči, dopirani određenim nečistoćama, iznimno osjetljivi na svjetlost, čime se učinkovitost solarnih ćelija povećava na 6 %
- lansiranje prvog satelita opremljenog solarnim ćelijama 1957. godine od strane Sovjetskog Saveza te brzi odgovor Sjedinjenih Država 1958. godine lansiranjem njihovog satelita što tijekom Hladnog rata rezultira tzv. „svemirska utrkom“ koja daje ključni poticaj razvoju ovih ćelija, povećavajući njihovu učinkovitost na više od 15%
- pad cijena sredinom 90-ih godina zahvaljujući čemu su se solarni paneli počeli širiti po krovovima razvijenih zemalja, a dolaskom 21. stoljeća počeli su se i masovno proizvoditi

Fotonaponske ćelije sastoje se od dva suprotno nabijena poluvodiča odvojena neutralnim spojem: negativni sloj (N-poluvodič) stvara se modificiranjem strukture silicijskog kristala kako bi se postigao višak elektrona, dok pozitivnom sloju (P-poluvodič) nedostaje elektron kako bi bio stabilan, pa se ponaša kao pozitivni naboj unutar kristalne rešetke. Stoga dolazi do neutralizacije naboja u spojnom području (P/N spoj) koje, kada je N područje izloženo sunčevoj svjetlosti, oslobađa elektrone povećavajući potencijalnu razliku između N i P područja. Ova razlika u zatvorenom krugu stvara električnu struju, čiji je dio električna energija dostupna korisniku [13]

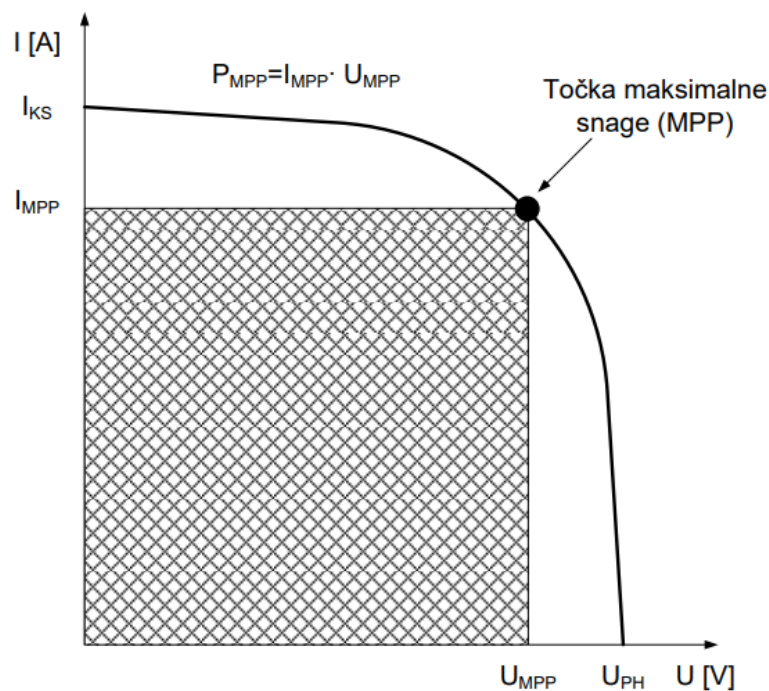
Zbog svoje obilnosti i prihvatljive cijene, polazna točka za većinu današnjih fotonaponskih uređaja u svijetu, kao i za gotovo sve poluvodiče, je čisti kristalni silicij. Ovisno o proizvodnom procesu silicija, ćelije se klasificiraju kao: monokristalne – izrađene od jednog silicijskog kristala što jamči superiorne performanse (18-25%) jer savršeno poravnavanje njihovih atoma potiče vodljivost;

polikristalne – sastavljene od više silicijskih kristala, no usprkos ekonomičnijem procesu proizvodnje u odnosu na prethodne ćelije, učinak ove vrste je inferiorniji (16-20%) te amforne silicijske ćelije – nepravilne atomske strukture, ovaj se silicij u tankim filmovima taloži na fleksibilnim podlogama omogućujući prilagodbu bilo kojoj površini za bolju arhitektonsku integraciju, a performanse ovog tipa ekonomičnija su od kristalnog, ali i niže (6-8%) [13].

Uz navedene ćelije, posljednjih su se godina pojavile inovacije koje ovu tehnologiju podižu na višu razinu - višeslojne fotonaponske ćelije: sadrže više P/N spojeva izrađenih od različitih poluvodičkih materijala, od kojih svaki proizvodi električnu struju kao odgovor na različite valne duljine. U laboratorijskim uvjetima, one su učinkovite oko 45-50% pod koncentriranom sunčevom svjetlošću. Također, tandem solarne ćelije mogu postići veće prinose kroz monolitno slaganje ćelija s različitim energetske intervalima, posebno s materijalom koji obećava veliku važnost u budućnosti – perovskit [13]

Na slici 4.1. koja prikazuje strujno naponsku karakteristiku fotonaponske ćelije primjetljive su tri karakteristične točke [14]:

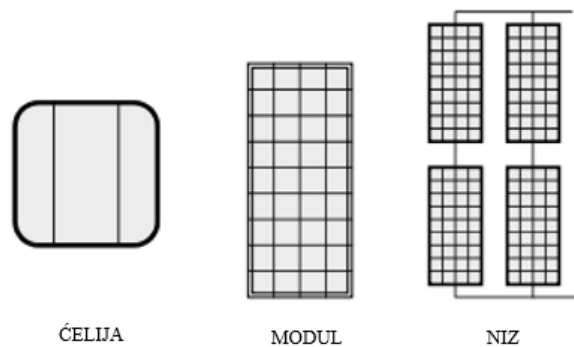
- točka praznog hoda – stezaljke otvorene
- točka kratkog spoja – stezaljke kratko spojene
- točka maksimalne snage – opterećenje spojeno na stezaljke ćelije te ona daje maksimalnu snagu.



Slika 4.1. Strujno naponska karakteristika fotonaponske ćelije [14]

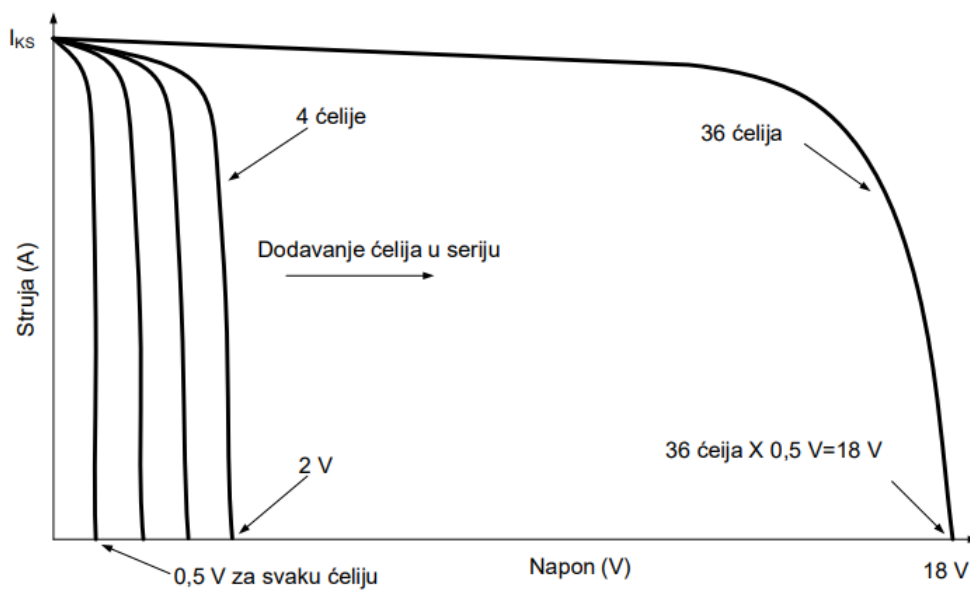
## 4.1. Fotonaponski moduli

Fotonaponski modul osnovni je građevni blok za fotonaponske sustave, a sastoji se od mnogo pojedinačnih, međusobno povezanih fotonaponskih ćelija budući da pojedinačna fotonaponska ćelija proizvodi samo oko 0,5 V. Više se modula može povezati u seriju za povećanje napona ili u paralelu za povećanje struje - takve kombinacije modula nazivaju se nizom, a slika 4.2. prikazuje razliku između ćelija, modula i nizova. Upravo je odlučivanje koliko modula treba povezati serijski, a koliko paralelno jedan od važnih elementa u dizajnu ovih sustava jer time manevriramo količinom isporučene energije [12].



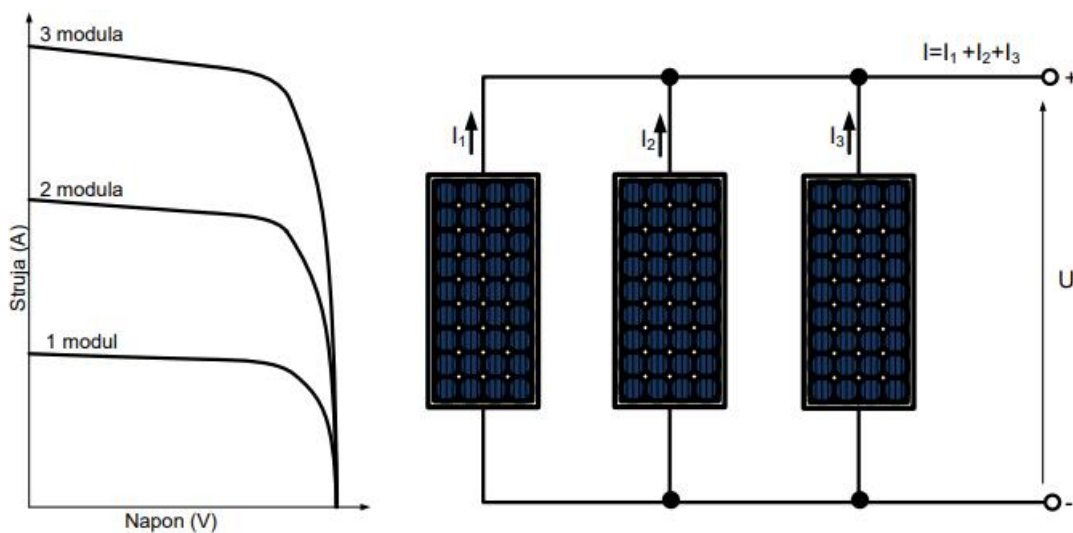
Slika 4.2. Fotonaponska ćelija, modul i niz [12]

Tipičan modul, čija je  $I - U$  karakteristika prikazana na slici 4.3. , ima 36 ćelija u seriji i često se označava kao "12-V modul" iako može isporučiti i mnogo veće napone od toga. Danas su prilično uobičajeni i veliki moduli sa 72 ćelije, a neki od njih, koji imaju sve ćelije povezane u seriji, nazivaju se "24-V modulima". Izvjesni veliki moduli mogu se povezati tako da djeluju ili kao 24-V moduli sa 72 ćelije u seriji ili kao 12-V moduli s dva paralelna stringa od po 36 ćelija u seriji [12], [14].



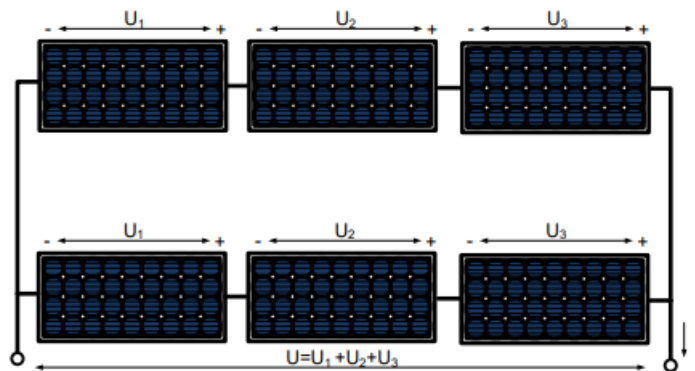
Slika 4.3. Strujno naponska karakteristika fotonaponskog modula [14]

Za serijski spojene module,  $I - U$  karakteristike se jednostavno dodaju duž osi napona. Dakle, pri bilo kojoj danoj struji (koja teče kroz svaki od modula), ukupni napon je samo zbroj pojedinačnih napona modula kao što je prikazano na slici 4.4. [14]:

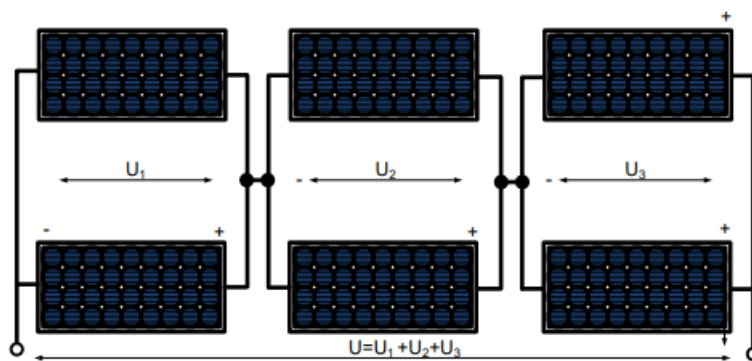


Slika 4.4.  $I - U$  karakteristika paralelno spojenih fotonaponskih modula [14]

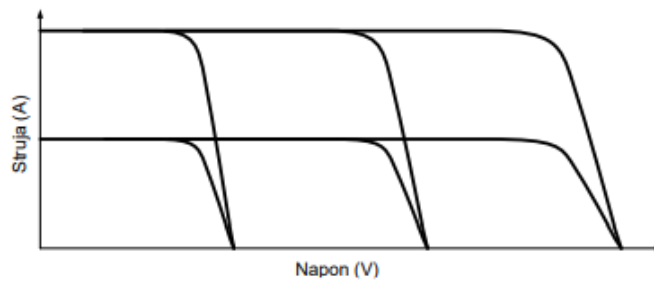
Kada je potrebna velika snaga, niz će obično biti sastavljen od kombinacije serijski i paralelno spojenih modula, pri čemu je ukupna  $I - U$  karakteristika zbroj  $I - U$  karakteristika pojedinačnih modula. Postoje dva načina za povezivanje serijskih i paralelnih kombinacija modula: serijski moduli se mogu povezati kao nizovi, a nizovi se povezuju paralelno kao na slici 4.6.; ili se paralelni moduli prvo povezuju zajedno, a zatim se te stvorene jedinice spajaju serijski kao na slici 4.7. Ukupna  $I - U$  krivulja prikazana na slici 4.8. samo je zbroj pojedinačnih krivulja modula što je isto u oba slučaja kada sve radi ispravno. Međutim, ukoliko je cijeli string izvan funkcije iz nekog razloga, niz još uvijek može isporučiti potreban napon opterećenju, iako je struja smanjena, što nije slučaj kada je paralelno spojena grupa modula izvan funkcije – stoga se preferira paralelno povezivanje nizova [14].



Slika 4.6. Prvi način povezivanja niza s tri modula serijski i dva modula paralelno [14]



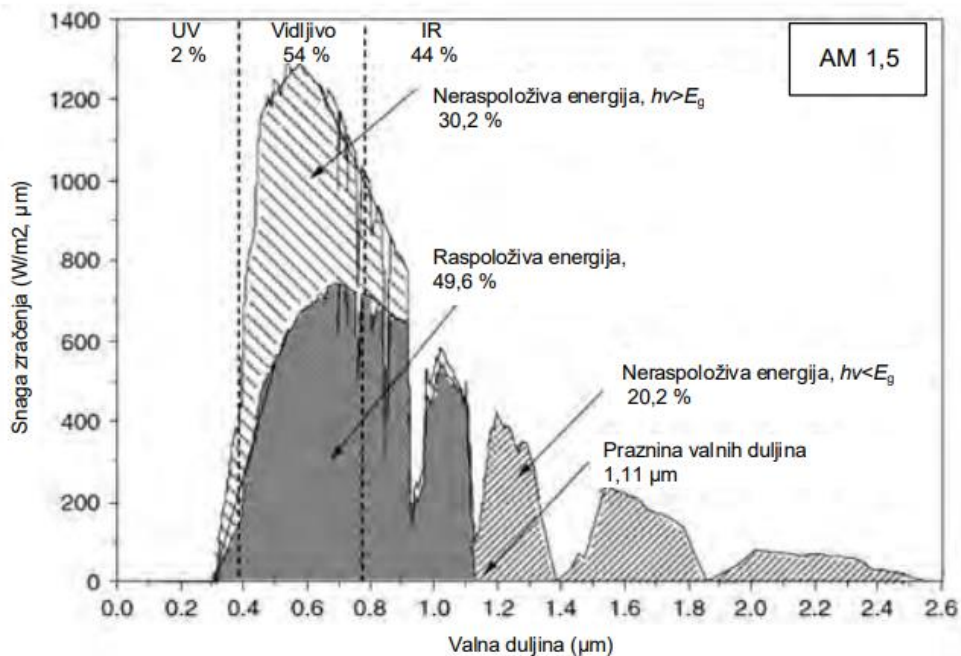
Slika 4.7. Drugi način povezivanja niza s tri modula serijski i dva modula paralelno [14]



Slika 4.8. Ukupna  $I - U$  karakteristika kombinirano spojenih fotonaponskih modula [14]

## 4.2. Standardni testni uvjeti

Električna izlazna učinkovitost kristalnih silicijskih i tankoslojnih fotonaponskih modula općenito se mjeri pod standardnim testnim uvjetima (STC – standard test conditions) - industrijski standard za uvjete pod kojima se solarni paneli testiraju korištenjem fiksnog skupa uvjeta zbog kojih se svi solarni paneli mogu se točnije usporediti i ocijeniti. STC specificira temperaturu ćelije od  $25^{\circ}\text{C}$  i gustoću snage sunčevog zračenja od  $1000 \text{ W/m}^2$  prema spektralnoj razdiobi prikazanoj na slici 4.9. [14]:

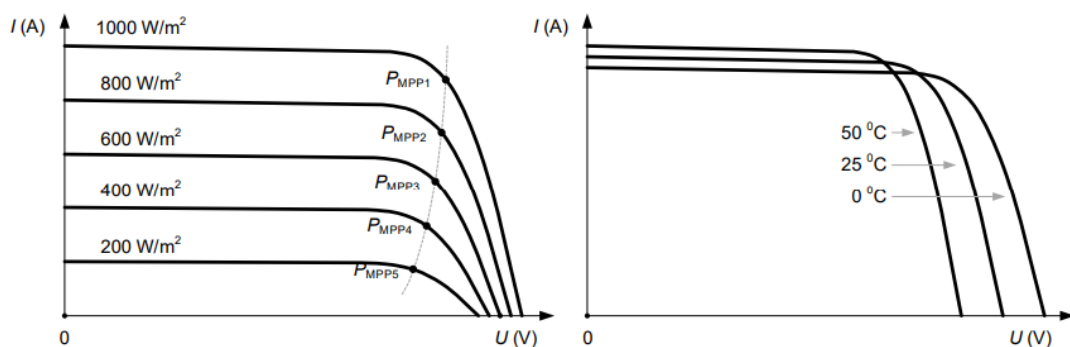


Slika 4.9. Spektralna razdioba sunčevog zračenja ( $AM=1,5$ ) [14]

Ovi uvjeti odgovaraju snazi sunčevog zračenja i spektru sunčeve svjetlosti na vedar dan na površini nagnutoj pod kutom od  $37^\circ$  okrenutoj prema suncu s kutom sunca od  $41,81^\circ$  iznad horizonta. Takvi uvjeti otprilike predstavljaju solarno podne blizu proljetnog i jesenskog ekvinocija na području kontinentalnog dijela Sjedinjenih Država, s površinom ćelije usmjerenom izravno prema Suncu. Međutim, iako su STC ocjene korisne za usporedbu panela, takva vrsta usporedbe posjeduje i svoje granice. Dva panela mogu imati isto STC vrednovanje, ali to ne mora značiti da će proizvesti istu količinu energije na terenu jer paneli, primjerice, mogu imati različite temperaturne koeficijente ili se ponašati drugačije u uvjetima slabog osvjetljenja. Osim ocjene snage, podaci solarnih panela obično daju vrijednosti napona i struje pri STC-u. I ove su vrijednosti korisne, jer se koriste u standardnim izračunima za duljinu niza i dimenzioniranje opreme. Često se primjenjuju prilagodbeni faktori kako bi izračuni bili valjani za sve vjerojatne uvjete, a ne samo za STC jer se oni rijetko susreću u svakodnevnom životu

[15]

Na slici 4.10. prikazana je ovisnost strujno naponske karakteristike fotonaponske ćelije o temperaturi za različite intenzitete sunčevog zračenja.



Slika 4.10. Ovisnost  $I - U$  karakteristike fotonaponske ćelije o intenzitetu zračenja te o temperaturi [14]

### 4.3. Nominalna radna temperatura ćelije

Temperatura ćelija varira ne samo zbog promjena temperature okoliša, već i zbog promjena u količini sunčeve svjetlosti koja pada na njih. Budući da se samo mali dio insolacije koja udara na modul pretvara u električnu energiju, većina te energije se apsorbira i pretvara u toplinu, a kako bi projektantima sustava objasnili promjenu performansi ćelija s promjenom temperature,

proizvođači često pružaju pokazatelj zvan – nominalna radna temperatura ćelije (NOCT – Norminal Operating Cell Temperature). Ponekad zvana i normalnom radnom temperaturom ćelije, NOCT je definiran kao temperatura koju solarni panel doseže pod uvjetima bliskijim stvarnim nego što su standardni testni uvjeti, a oni podrazumijevaju: temperaturu zraka 20°C, sunčevo zračenje 800 W/m<sup>2</sup>, te brzinu vjetra od 1 m/s. Važno je napomenuti da NOCT koristi temperaturu okolnog zraka, a ne temperaturu ćelije kao STC, također je koristan za usporedbu dva panela s istim STC vrijednostima, a panel s višom ocijenjenom snagom pri NOCT-u obično će imati i bolje performanse [16].

Temperatura ćelije za druge vanjske uvjete može se odrediti prema izrazu (4-1) [14]:

$$T_{\text{cel}} = T_{\text{okoline}} + \left( \frac{\text{NOCT} - 20^\circ}{0.8} \right) \cdot G \quad (4-1)$$

Gdje su:  $T_{\text{cel}}$  – temperatura ćelije [°C],  $T_{\text{okoline}}$  – temperatura okoline i  $G$  – sunčevo zračenje [kW/m<sup>2</sup>]

Ukoliko podatak o nominalnoj radnoj temperaturi ćelije nije dan, drugi pristup za procjenu temperature ćelije temelji se na jednadžbi (4-2) [12]:

$$T_{\text{cel}} = T_{\text{okoline}} + \gamma \left( \frac{\text{insolacija}}{1 \text{ kW/m}^2} \right) \quad (4-2)$$

Gdje je  $\gamma$  faktor proporcionalnosti koji donekle ovisi o brzini vjetra i ventilaciji modula prilikom njegove instalacije. Tipične vrijednosti  $\gamma$  kreću se između 25°C i 35°C – to znači da su ćelije obično 25–35°C toplije od svoje okoline pri insolaciji jednog sunca.

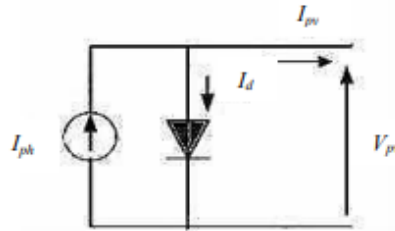
#### 4.4. Modeliranje fotonaponske ćelije s jednom diodom

Razvijeni su mnogi matematički modeli kako bi se predstavilo vrlo nelinearno ponašanje koje proizlazi iz poluvodičkih spojeva radi procjene performansi fotonaponske ćelije. U našem slučaju, razmatramo model jedne diode. Ekvivalentni krugovi definiraju cijelu strujno naponsku karakteristiku fotonaponske ćelije, modula ili niza kao kontinuiranu funkciju za određeni skup uvjeta rada. Tri ekvivalentna kruga mogu se koristiti za opisivanje modela jedne diode, a oni su: idealna solarna ćelija ili model 1M4P, solarna ćelija sa serijskim otporom poznata i kao 1M5P, te solarna ćelija s serijskim i paralelnim otporima koja se naziva 1M5P [17].



#### 4.4.1. Idealna fotonaponska ćelije (1M4P)

$I$ - $V$  karakteristike fotonaponske ćelije imaju eksponencijalnu karakteristiku sličnu diodnoj. Idealni ekvivalentni krug fotonaponske ćelije je izvor struje u paralelno spojen s jednom diodom. Ovaj model uključuje sljedeća tri nepoznata parametra:  $m$ ,  $I_{ph}$  i  $I_s$ . Ovaj se model također naziva 1M3P (jedan mehanizam, tri parametra). Konfiguracija simulirane idealne solarne ćelije s jednom diodom prikazana je na slici 4.11 [17]:



Slika 4.11. Ekvivalentni model idealne solarne ćelije s jednom diodom (1M3P) [17]

Karakteristična jednačba (4-3) je izravno izvedena iz Kirchhoffovog zakona [17]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (4-3)$$

Struja diode prikazana je jednačbom (4-4) [17]:

$$I_d = I_s \left( e^{\frac{qV_{pv}}{mkT}} - 1 \right) \quad (4-4)$$

pa je izlazna struja izražena slijedećom nelinearnom  $I$ - $V$  jednačbom (4-5) [17]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{qV_{pv}}{mkT}} - 1 \right) \quad (4-5)$$

Za iste uvjete zračenja i temperature fotonaponskog spoja, struja kratkog spoja  $I_{sc}$  je najveća vrijednost struje generirane od strane ćelije, a napon otvorenog kruga  $V_{oc}$  je najveća vrijednost napona na terminalima ćelije. Oni su dani jednačbama (4-6) za  $V_{pv} = 0$  i (4-7) za  $I_{pv} = 0$  [17]:

$$I_{sc} = I_{pv} = I_{ph} \quad (4-6)$$

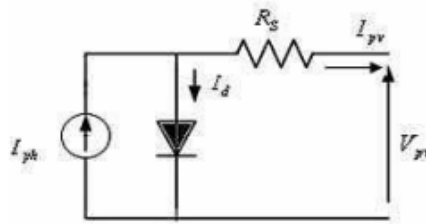
$$V_{pv} = V_{oc} = \frac{mkT}{q} \ln \left( 1 + \frac{I_{sc}}{I_s} \right) \quad (4-7)$$

Izlazna snaga prikazana je jednačbom (4-8) [17]:

$$P = V_{pv} \left[ I_{sc} - I_s \left( e^{\frac{qV_{pv}}{mkT}} - 1 \right) \right] \quad (4-8)$$

#### 4.4.2. Fotonaponske ćelije sa serijskim otporom

Točnost modela može se povećati dodavanjem serijskog otpora. Električna shema ekvivalentna ovom modelu prikazana je na slici (4.12). Ovaj model uključuje sljedeće četiri nepoznata parametre:  $m$ ,  $I_{ph}$ ,  $R_s$  i  $I_s$ . Ovaj se model također naziva 1M4P (jedan mehanizam, četiri parametra) [17].



Slika 4.12. Ekvivalentni model solarne ćelije s jednom diodom i serijskim otporom (1M4P) [17]

Struja diode definira se jednažbom (4-9) [17]:

$$I_d = I_s \left( e^{\frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{mkT}} - 1 \right) \quad (4-9)$$

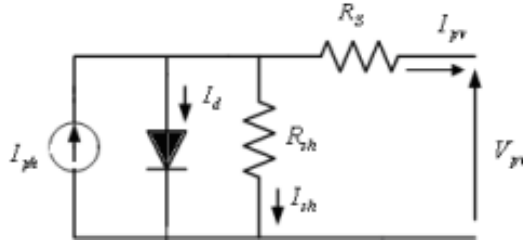
Dakle,  $I$ - $V$  karakteristike fotonaponske ćelije s jednom diodom i serijskim otporom su dane s jednažbom (4-10) [17]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{mkT}} - 1 \right) \quad (4-10)$$

Za iste uvjete zračenja i temperature fotonaponskog spoja, uključivanje serijskog otpora u model implicira upotrebu rekurentne jednažbe za određivanje izlazne struje u funkciji terminalnog napona. Jednostavna iterativna tehnika inicijalno isprobana konvergirala je samo za pozitivne struje [17].

#### 4.4.3. Fotonaponska ćelija sa serijskim i paralelnim otporima (1M5P)

Fotonaponska ćelija u ovom je slučaju predstavljena shemom na slici 4.13. koja se sastoji od izvora struje koji modelira svjetlosni tok, gubitke modeliraju dva otpora: paralelni otpor i serijski otpor. Model uključuje sljedećih pet nepoznatih parametara:  $m$ ,  $I_{ph}$ ,  $R_s$ ,  $R_{sh}$  i  $I_s$ . Ovaj se model također naziva 1M5P (jedan mehanizam, pet parametara) [17].



Slika 4.13. Ekvivalentni model fotonaponske ćelije s jednim diodom i serijskim i paralelnim otporima (1M5P) [17]

Karakteristična jednačba (4-11) može se izravno izvesti koristeći Kirchhoffov zakon [17]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (4-11)$$

gdje je struja diode izražena jednačbom (4-12) [17]:

$$I_d = I_s \left( e^{\frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{mkT}} - 1 \right) \quad (4-12)$$

a struja koja teče kroz paralelni otpornik jednačbom (4-13) [17]:

$$I_{sh} = \frac{V + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (4-13)$$

Odnos između izlazne struje fotonaponske ćelije i napona terminala prema modelu s jednom diodom definiran je jednačbom (4-14) [17]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sh} \left( e^{\frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{mkT}} - 1 \right) - \frac{(V_{pv} + R_s I_{pv})}{mkT} \quad (4-14)$$

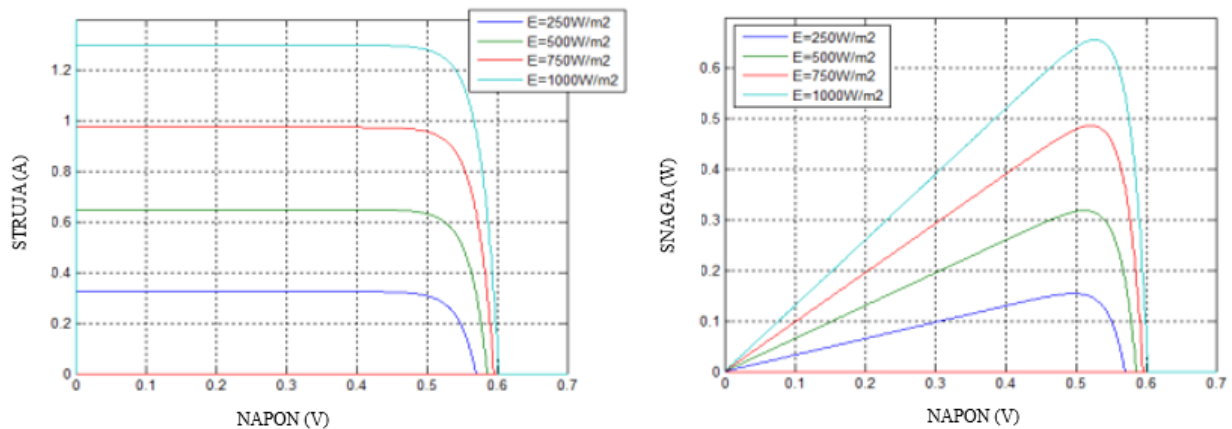
Za iste uvjete zračenja i temperature fotonaponskog spoja, uključivanje serijskog otpora u model zahtijeva korištenje rekurzivne jednačbe za određivanje izlazne struje u funkciji napona terminala. Jednostavna iterativna tehnika isprva je konvergirala samo za pozitivne struje.

Modeliranje fotonaponske ćelije u sva tri slučaja izvršeno je primjenom prethodnih jednadžbi, a mnoge vrste simulacija provode se ovisno o odabranom modelu i odabranim parametrima [17].

## 4.5. Utjecaj pojedinih faktora na fotonaponske ćelije s jednom diodom

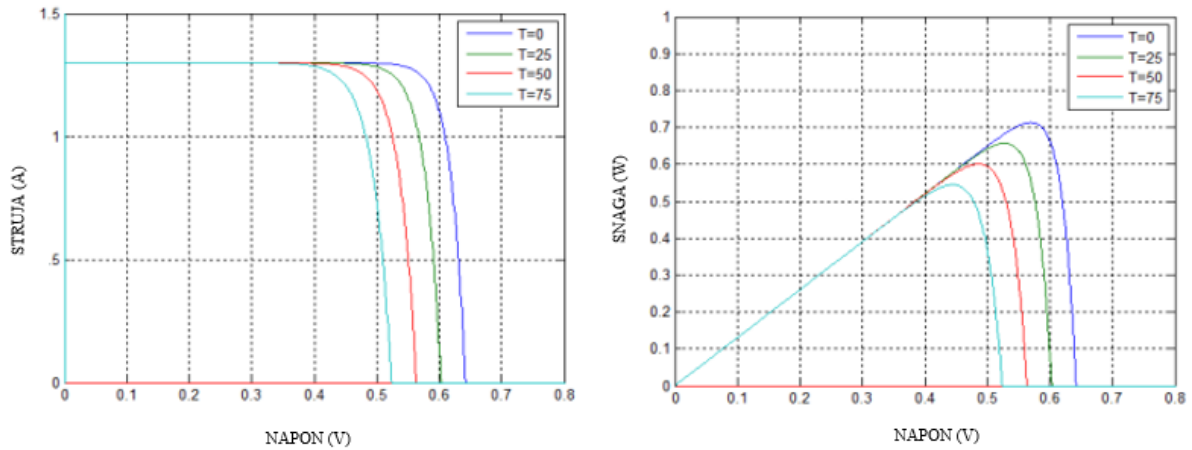
### 4.5.1. Utjecaj zračenja i temperature

U sva tri modela, temperatura je konstantna na  $25^{\circ}\text{C}$  dok se zračenje mijenja ( $250\text{ W/m}^2$ ,  $500\text{ W/m}^2$ ,  $750\text{ W/m}^2$ ,  $1000\text{ W/m}^2$ ). Slika 4.14. prikazuje rezultate Matlab programa pod ovim uvjetima na  $I$ - $V$  i  $P$ - $V$  karakteristikama. Jasno je da generirana struja ovisi o zračenju - što je veće zračenje, veća je i struja. Nasuprot tome, napon ostaje gotovo konstantan. Utjecaj zračenja na maksimalnu točku snage je očigledan - što je zračenje veće, to je i maksimalna točka snage veća [17].



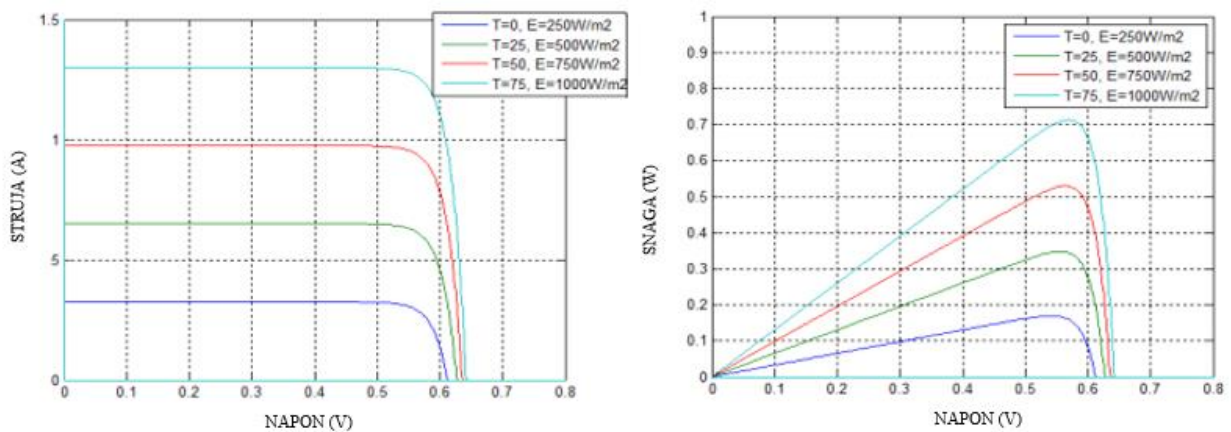
Slika 4.14. Utjecaj zračenja na  $I$ - $V$  i  $P$ - $V$  karakteristike [17]

Zatim, zračenje je konstantno na  $1000\text{ W/m}^2$ , a temperatura varira ( $25^{\circ}\text{C}$ ,  $50^{\circ}\text{C}$ ,  $75^{\circ}\text{C}$ ,  $100^{\circ}\text{C}$ ). Slika 4.15. prikazuje simulacijske rezultate  $I$ - $V$  i  $P$ - $V$  karakteristika. Generirana struja ostaje konstantna, iako blago raste dok napon opada [17].



Slika 4.15. Utjecaj temperature na  $I-V$  i  $P-V$  karakteristike [17]

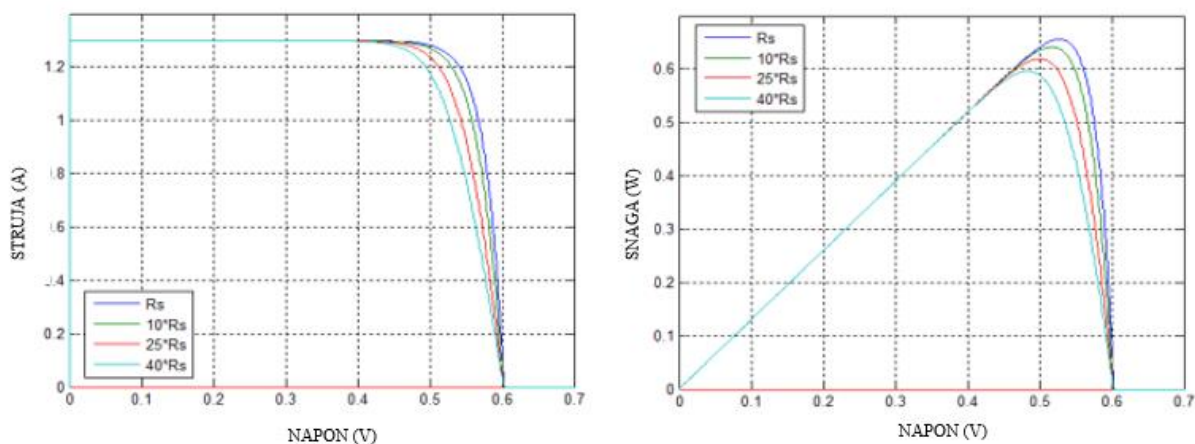
Porast temperature smanjuje napon i snagu. Slika 4.16. prikazuje utjecaj zračenja i temperature, gdje su  $I-V$  i  $P-V$  krivulje slične onima pod utjecajem zračenja s blago višim vrijednostima snage; utjecaj temperature je gotovo zanemaren [17].



Slika 4.16. Utjecaj temperature i zračenja na  $I-V$  i  $P-V$  karakteristike [17]

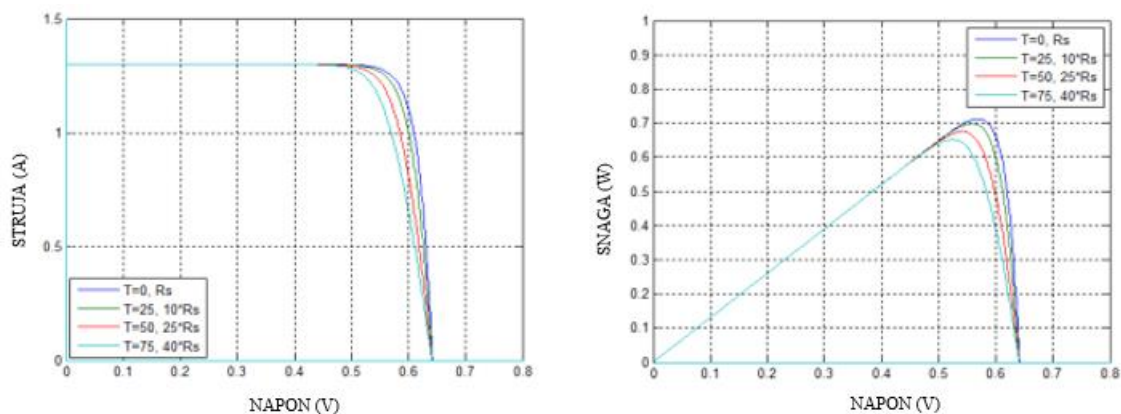
#### 4.5.2. Utjecaj serijskog otpora i temperature

Slika 4.17. prikazuje utjecaj serijskog otpora na  $I-V$  i  $P-V$  karakteristike 1M4P i 1M5P fotonaponskih ćelija. Serijski otpor je nagib karakteristike u području gdje se fotonaponska ćelija ponaša kao generator napona; ne mijenja napon otvorenog kruga, ali kad je visok, smanjuje vrijednost struje kratkog spoja. Povećanje serijskog otpora rezultira smanjenjem nagiba krivulje snage [17].



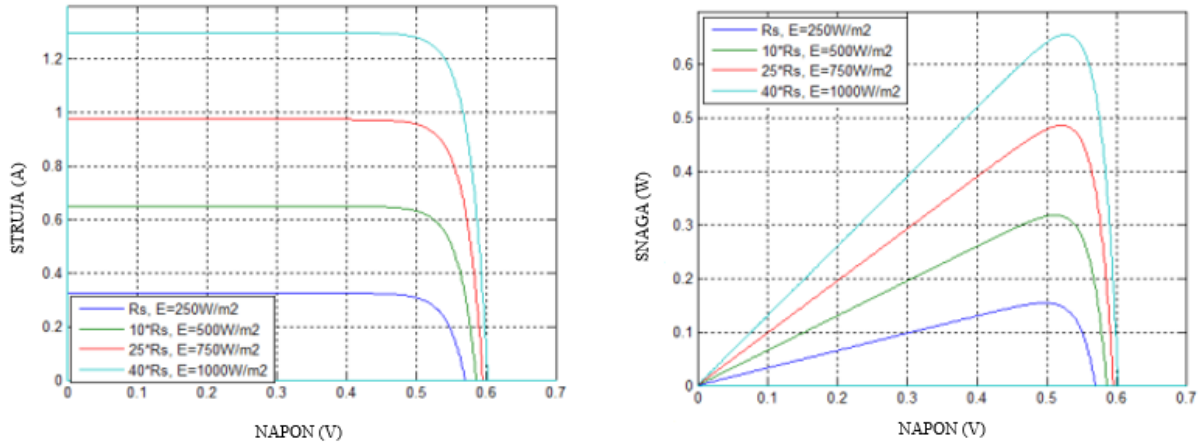
Slika 4.17. Utjecaj serijskog otpora na  $I$ - $V$  i  $P$ - $V$  karakteristike [17]

Utjecaj serijskog otpora i temperature na iste modele prikazan je na slici 4.18., gdje struja kratkog spoja ostaje ista dok se napon otvorenog kruga povećava [17].

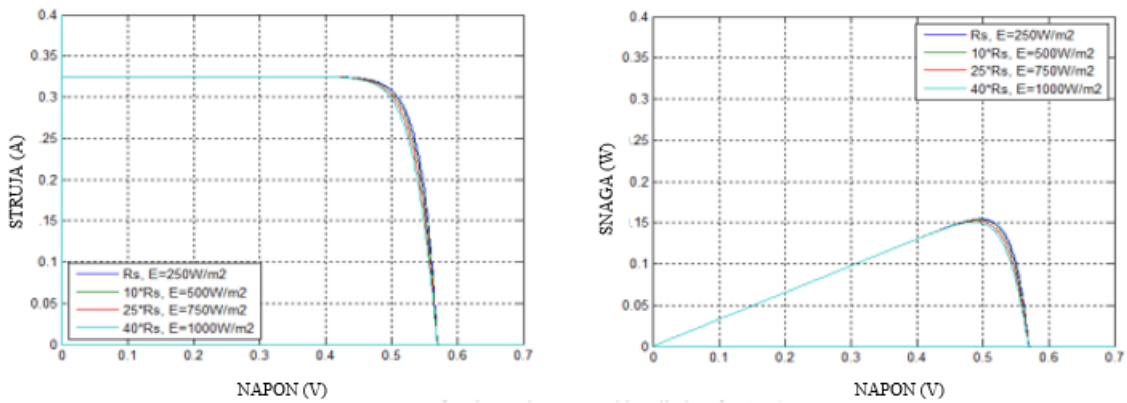


Slika 4.18. Utjecaj serijskog otpora i temperature na  $I$ - $V$  i  $P$ - $V$  karakteristike [17]

Slike 4.19. i 4.20. prikazuju važnost serijskog otpora, koji pokazuje razliku između različitih modela. Na slici 4.19., performanse 1M4P fotonaponske ćelije su znatno degradirane kada su  $R_s$  i zračenje visoki, dok model 1M5P nije toliko pod utjecajem serijskog otpora kao model 1M4P [17].



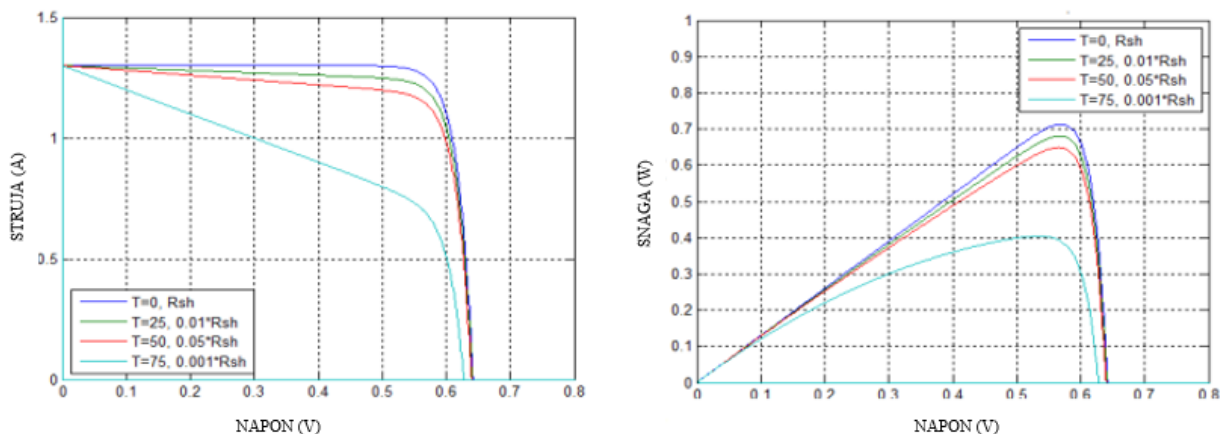
Slika 4.19. Utjecaj serijskog otpora i zračenja za model 1M4P na  $I$ - $V$  i  $P$ - $V$  karakteristike [17]



Slika 4.20. Utjecaj serijskog otpora i zračenja za model 1M5P na  $I$ - $V$  i  $P$ - $V$  karakteristike [17]

### 4.5.3. Utjecaj paralelnog otpora i temperature

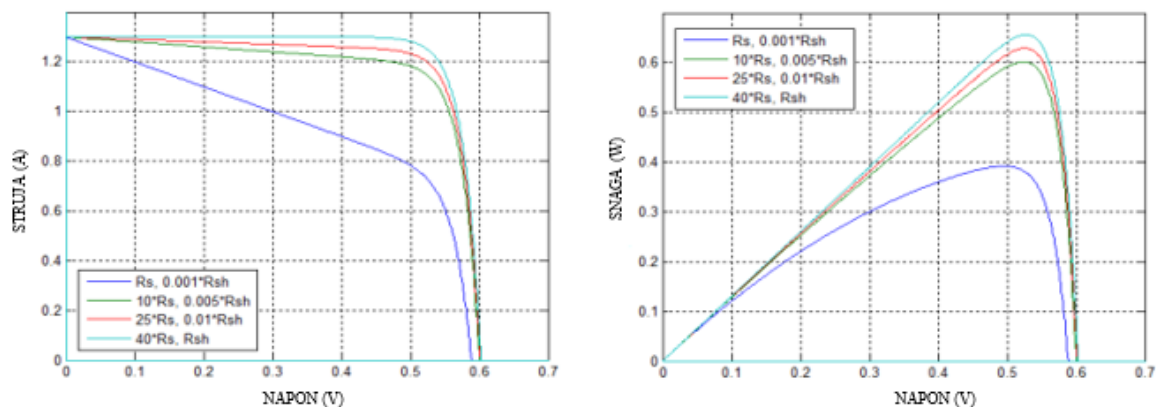
Paralelni otpor uzima u obzir neizbježno curenje struje koje se javlja između terminala fotonaponske ćelije. Općenito, kada je paralelni otpor vrlo visok, njegov se učinak posebno osjeća u generiranju snage. Utjecaj paralelnog otpora na strujno naponske karakteristike rezultira blagim smanjenjem napona otvorenog kruga i povećanjem nagiba  $I$ - $V$  krivulje ćelije u području koje odgovara radu kao izvor struje kao što je prikazano na slici 4.21.



Slika 4.21. Utjecaj paralelnog otpora i temperature na  $I-V$  i  $P-V$  karakteristike [17]

#### 4.5.4. Utjecaj paralelnog i serijskog otpora

Slika 4.22. prikazuje učinak serijskog i paralelnog otpora istovremeno, gdje se može zaključiti da je učinak serijskog otpora zanemariv u odnosu na paralelni, a smanjenje vrijednosti paralelnog otpora uzrokuje udaljšavanje od stvarnog rada ćelije [17].

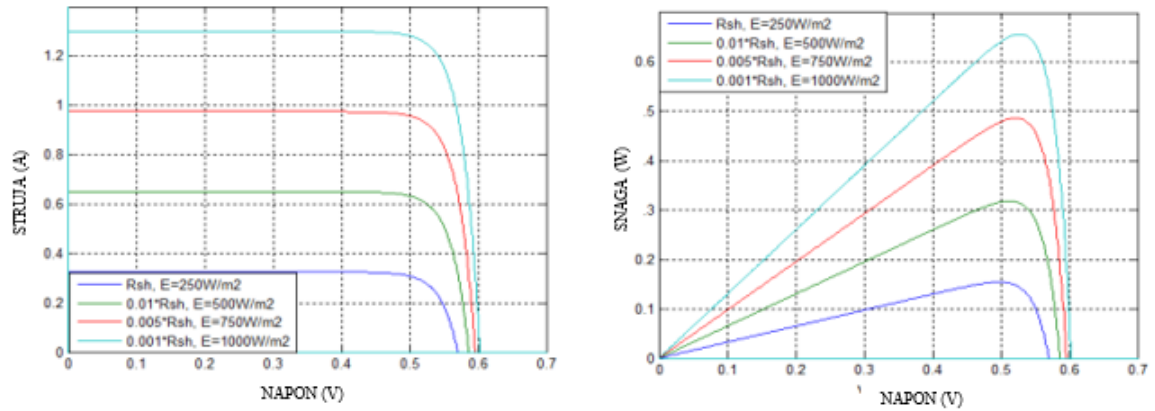


Slika 4.22. Utjecaj paralelnog i serijskog otpora na  $I-V$  i  $P-V$  karakteristike [17]

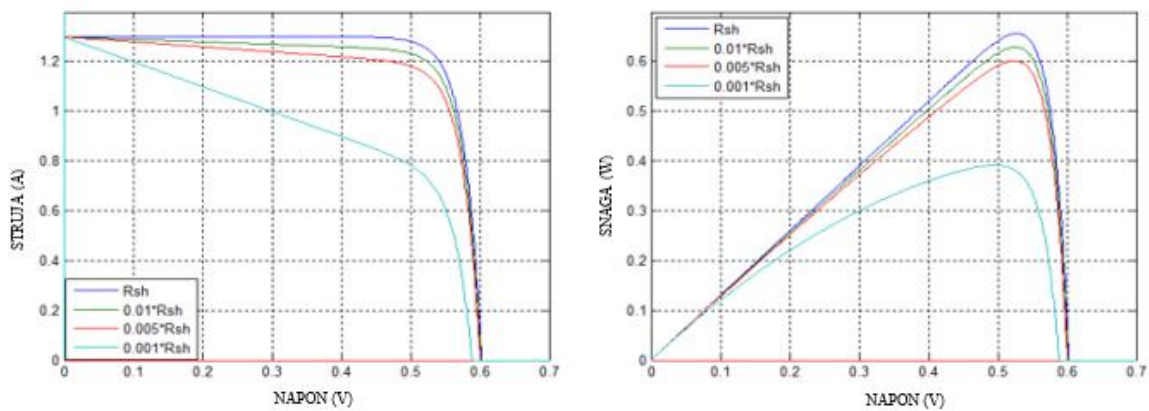
#### 4.5.5. Utjecaj paralelnog otpora i zračenja

Slika 4.23. prikazuje istovremeni utjecaj paralelnog otpora i zračenja na model 1M5P, iz čega se može zaključiti da su  $I-V$  i  $P-V$  karakteristike slične karakteristikama utjecaja paralelnog otpora prikazanog na slici 4.24., s istim vrijednostima struje kratkog spoja i napona otvorenog kruga, tako da je utjecaj paralelnog otpora u ovom slučaju zanemariv u odnosu na utjecaj zračenja [17].





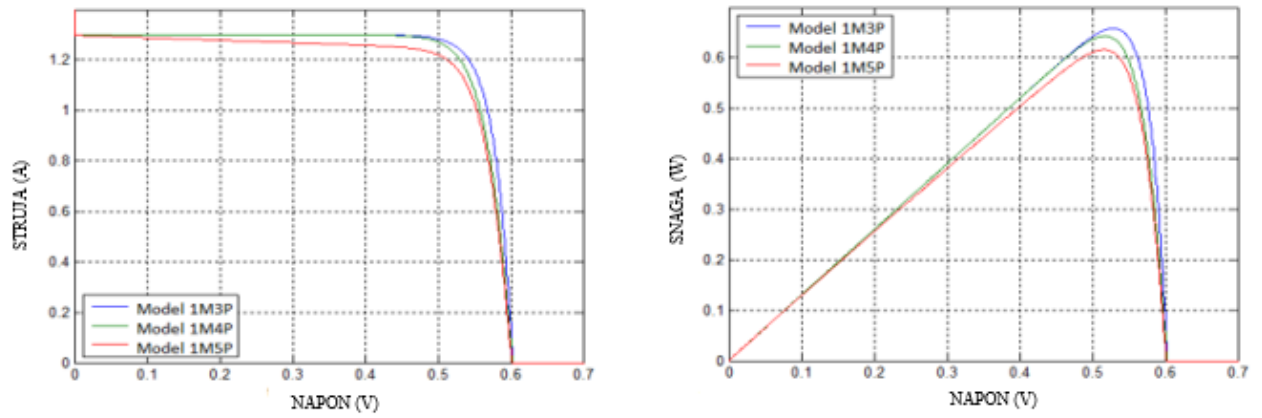
Slika 4.23. Utjecaj paralelnog otpora i zračenja na  $I$ - $V$  i  $P$ - $V$  karakteristike [17]



Slika 4.24. Utjecaj paralelnog otpora na  $I$ - $V$  i  $P$ - $V$  karakteristike [17]

## 4.6. Usporedba 3 modela fotonaponske ćelije s jednom diodom

Za svaki su model odabrani isti referentni uvjeti, a performanse fotonaponske ćelije obično se procjenjuju pod standardnim testnim uvjetima. Slika 4.25. prikazuje usporedbu različitih modela fotonaponske ćelije s jednom diodom te iz nje možemo primijetiti da 1M3P ima optimizirane performanse jednodiodnog modela s većim vrijednostima struje i snage, dok 1M5P daje niže vrijednosti. Usporedba između ovih modela pokazala je da model fotonaponske ćelije sa serijskim otporom (1M4P) nudi realističnije ponašanje za fotonaponske sustave kombinirajući jednostavnost i preciznost. Model s jednom diodom analiziran je u odnosu na fizičke fenomene poput serijski i paralelno spojenih otpora te okolišnih parametara poput zračenja i temperature [17].



Slika 4.25. Usporedba  $I$ - $V$  i  $P$ - $V$  karakteristika 3 modela fotonaponske ćelije s jednom diodom [17]

## **5. ISPITIVANJE UTJECAJA TEMPERATURE NA PERFORMANSE FOTONAPONSKIH MODULA RAZLIČITIH TEHNOLOGIJA IZRADE**

### **5.1. Metodologija ispitivanja**

METREL MI 3108 Eurotest PV napredni je multifunkcionalni uređaj kojeg smo koristili za ispitivanje učinkovitosti fotonaponski modula Panasonic VBH240SE10 i Solar frontier SF150-S. Ovaj uređaj omogućuje precizna mjerenja i analize ključnih parametara fotonaponskih sustava, kao što su [18]:

- otpor izolacije fotonaponskih sustava
- ispitivanje fotonaponskih izmjenjivača
- učinkovitost fotonaponskih modula
- snaga Sunčevog zračenja i temperatura ćelije
- struja kratkog spoja i napon praznog hoda

U ovom smo se radu posebno osvrnuli na mjerenje temperature i napona praznog hoda koristeći METREL MI 3108 Eurotest PV. Mjernim smo kablovima povezali uređaj s fotonaponskim modulom na čiju smo stražnju stranu postavili temperaturni senzor. Kada je sustav povezan, softver aktivira mjerenje napona praznog hoda i mjeri temperaturu modula.

### **5.2. Utjecaj temperature na performanse modula Panasonic VBH240SE10**

Panasonic VBH240SE10 napredni je solarni modul, poznat po svojoj visokoj učinkovitosti i izvrsnim performansama na malim krovnim površinama, a tablica 5.1. opisuje njegove karakteristike. Ovaj modul koristi staklo s antirefleksivnim premazom (ARC), što mu omogućuje visok izlaz snage čak i pri slabim svjetlosnim uvjetima, povećavajući pritom zadržavanje svjetlosti. Zahvaljujući smanjenju broja kontakata s tri na dva, modul smanjuje električne gubitke i povećava učinkovitost. Tehnologija visokoučinkovitih ćelija također osigurava stabilan izlaz energije čak i pri visokim temperaturama, što čini ovaj modul pouzdanim izborom za razne primjene [19]

Tablica 5.1. Karakteristike modula Panasonic VBH240SE10 [19]

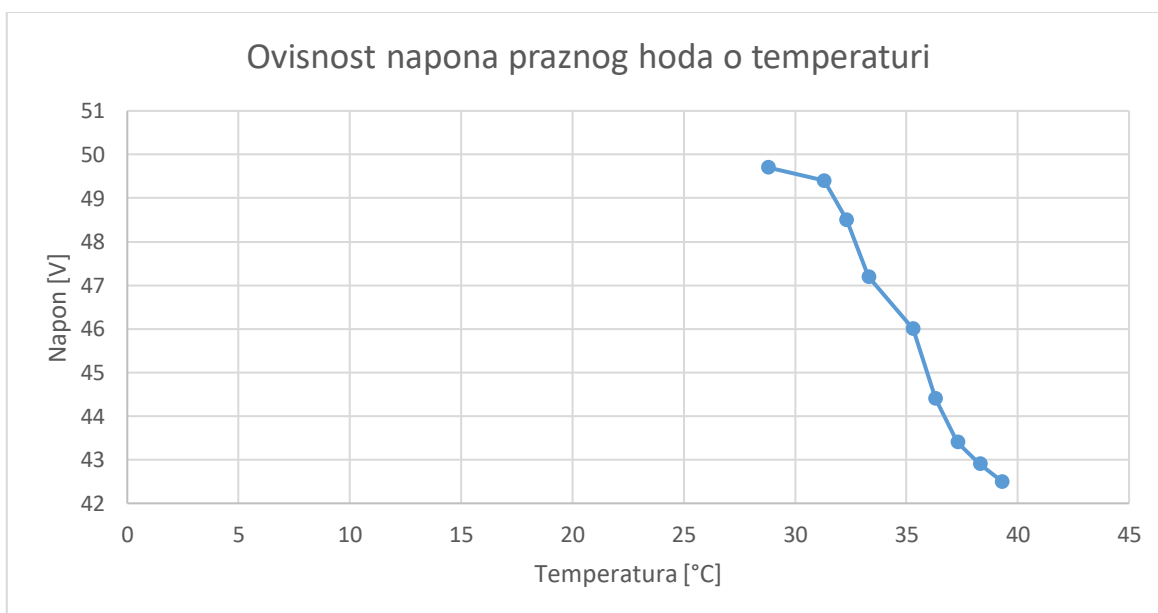
Maksimalna snaga $P_{max}$ [W]	240
Napon maksimalne snage $U_{MPP}$ [V]	43.7
Struja maksimalne snage $I_{MPP}$ [A]	5.51
Napon praznog hoda $U_{OC}$ [V]	52.4
Struja kratkog spoja $I_{SC}$ [A]	5.85
800 W/m <sup>2</sup> NOCT AM1.5 maksimalna snaga $P_{max}$ [Wp]	182
800 W/m <sup>2</sup> NOCT AM1.5 napon maksimalne snage $U_{OC}$ [V]	41.1
800 W/m <sup>2</sup> NOCT AM1.5 napon praznog hoda $U_{OC}$ [V]	49.4
800 W/m <sup>2</sup> NOCT AM1.5 struja kratkog spoja $I_{SC}$ [A]	4.71
Relativno smanjenje učinkovitosti na 200 W/m <sup>2</sup> [%]	3
Temperaturni koeficijent struje $I_{SC}$ [%/°C]	+0,03
Temperaturni koeficijent napona $U_{SC}$ [mV/°C]	-131
Temperaturni koeficijent snage $P_{MPP}$ [%/°C]	-0.3
Učinkovitost modula [%]	19
NOCT [°C]	44
Najveći napon sustava [V]	1000
Visina [mm]	1580
Širina [mm]	198
Debljina [mm]	35
Težina [kg]	15

Radom u laboratoriju smo pomoću uređaja METREL MI 3108 Eurotest PV i umjetnog izvora svjetlosti i topline mjerili napon praznog hoda i temperaturu modula Panasonic VBH240SE10, odnosno htjeli smo dobiti uvid u performanse fotonaponskog modula ovisno o temperaturi.

Tablicom 5.2. prikazana su mjerenja unutar jednog sata i sedamnaest minuta, a slika 5.1. jasno upućuje na smanjenje napona  $U_{OC}$  prilikom rasta temperature od 28.8°C do 40.8°C.

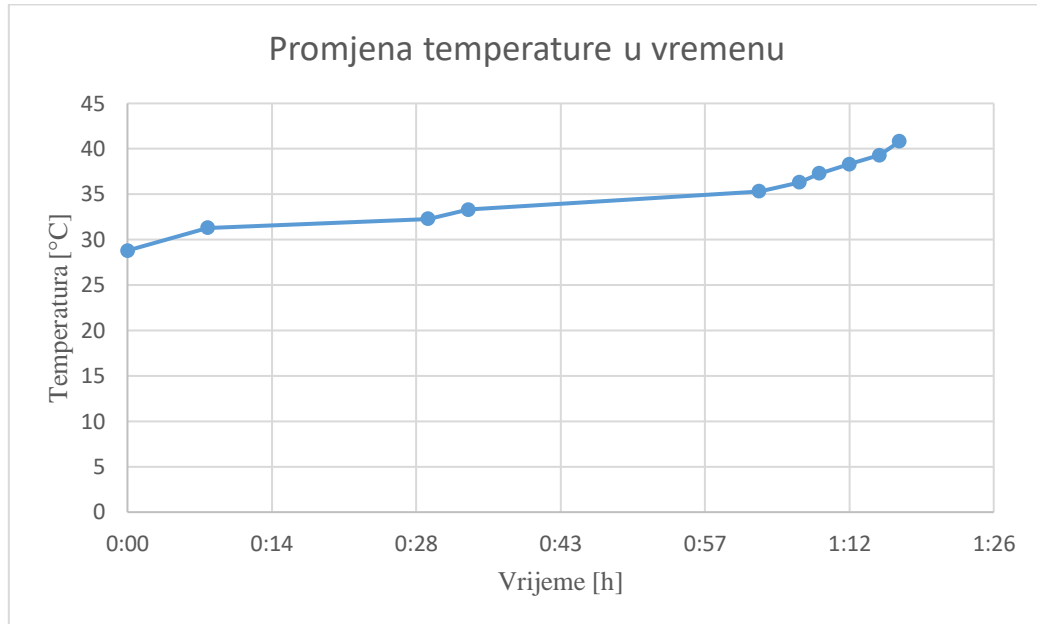
Tablica 5.2. Mjerenja napona  $U_{OC}$  i temperature modula Panasonic VBH240SE10 u određenom vremenskom periodu

Napon praznog hoda [V]	Temperatura [°C]	Vrijeme [h]
49.7	28.8	0:00
49.4	31.3	0:08
48.5	32.3	0:30
47.2	33.3	0.34
46	35.3	1:03
44.4	36.3	1:07
43.4	37.3	1:09
42.9	38.3	1:12
42.5	39.3	1:15
42.4	40.8	1:17

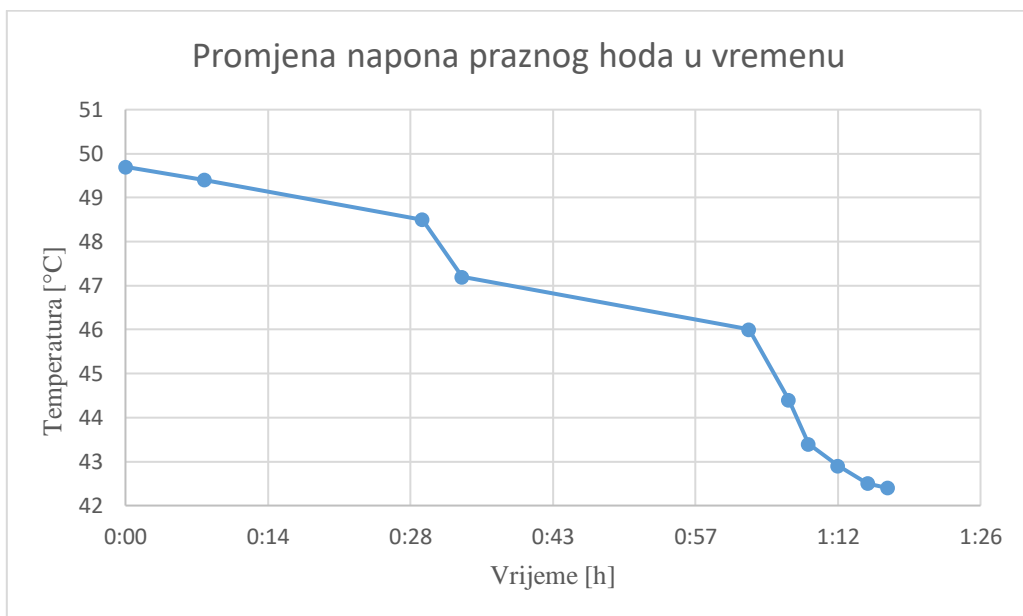


Slika 5.1. Ovisnost napona  $U_{OC}$  o temperaturi fotonaponskog modula Panasonic VBH240SE10

Slikama 5.2. i 5.3. prikazane su promjene varijabli unutar vremenskog perioda proboravljenog u laboratoriju, tj. rast temperature i pad napona praznog hoda.



Slika 5.2. Promjena temperature u vremenu mjerenja za Panasonic VBH240SE10



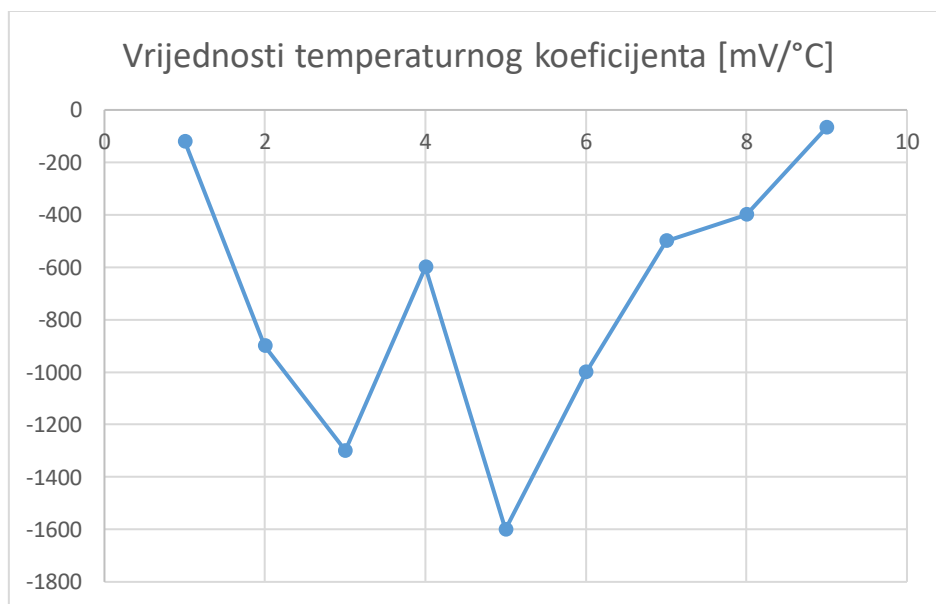
Slika 5.3. Promjena napona  $U_{OC}$  u vremenu mjerenja za Panasonic VBH240SE10

Tablica 5.3.i slika 5.4. prikazuju vrijednosti temperaturnog koeficijenta napona kojeg izračunavamo jednadžbom (5-1) :

$$\text{Temperaturni koeficijent napona} = 1000 \cdot \frac{\Delta U_{oc}}{\Delta T} \quad (5-1)$$

Tablica 5.3. Izračunavanje vrijednosti temperaturnog koeficijenta za Panasonic VBH240SE10

$\Delta$ Napon praznog hoda [V]	$\Delta$ Temperatura [C]	Temperaturni koeficijent [mV/°C]
-0.3	2.5	-120
-0.9	1	-900
-1.3	1	-1300
-1.2	2	-600
-1.6	1	-1600
-1	1	-1000
-0.5	1	-500
-0.4	1	-400
-0.1	1.5	-66.67



Slika 5.4. Vrijednosti temperaturnog koeficijenta [mV/°C] za Panasonic VBH240SE10

Prosječni temperaturni koeficijent napona za modul Panasonic VBH240SE10 izračunat iz mjerenja provedenih u laboratoriju iznosi -720.74 mV/°C čime je svojim apsolutnim iznosom

značajno veći od koeficijenta kojeg je proizvođač naveo u karakteristikama modula vidljivim u tablici 5.1. Ovo znači da modul pokazuje goru otpornost na promjene temperature. Odnosno, za svaki Celzijev stupanj povećanja temperature ćelije, napon opada više nego što je predviđeno tvorničkim koeficijentom, što rezultira većim gubitkom snage, a time i smanjenom učinkovitošću modula.

### 5.3. Utjecaj temperature na performanse modula Solar Frontier SF 150-S

Solar Frontier SF150-S napredni je tankoslojni solarni modul dizajniran za maksimalnu učinkovitost i pouzdanost u pretvorbi sunčeve u električnu energiju. S učinkovitosti do 13,0 %, SF150-S nudi najvišu razinu performansi među masovno proizvedenim tankoslojnim modulima. Također, ovi su moduli ekološki prihvatljivi jer ne sadrže kadmij ni olovo te su u skladu s RoHS standardima, a zahvaljujući svojoj inovativnoj tehnologiji, Solar Frontier SF150-S modul osigurava iznimno brzo vrijeme povrata energije koje je manje od jedne godine. Sve ove karakteristike ovaj modul čine idealnim izborom za širok raspon fotonaponskih sustava, od malih kućnih instalacija do velikih solarnih elektrana. U tablici 5.4. opisane su karakteristike modula Solar Frontier SF 150-S pri standardnim testnim uvjetima dok su karakteristike ovog modula pri radnoj temperaturi ćelije prikazane u tablici 5.5. Pregled temperaturnih karakteristika spomenutog modula prikazan je tablicom 5.6. a mehaničkih tablicom 5.7.

Tablica 5.4. Karakteristike modula Solar Frontier SF 150-S pri standardnim testnim uvjetima [20]

Maksimalna snaga $P_{max}$ [W]	150
Učinkovitost modula [%]	12.2
Tolerancija snage [W]	+5 W/ 0 W
Napon praznog hoda $V_{oc}$ [V]	108
Struja kratkog spoja $I_{SC}$ [A]	2.2
Napon maksimalne snage $V_{MPP}$ [V]	81.5
Struja maksimalne snage $I_{MPP}$ [A]	1.85



Tablica 5.5. Karakteristike modula Solar Frontier SF 150-S pri radnoj temperaturi ćelije (NOCT) [20]

Maksimalna snaga $P_{max}$ [W]	111
Napon praznog hoda $V_{oc}$ [V]	98,3
Struja kratkog spoja $I_{SC}$ [A]	1.76
Napon maksimalne snage $V_{MPP}$ [V]	76.4
Struja maksimalne snage $I_{MPP}$ [A]	1.47

Tablica 5.6. Temperaturne karakteristike modula Solar Frontier SF 150-S [20]

NOCT [°C]	47
Temperaturni koeficijent $\alpha$ struje $I_{SC}$ [%/K]	+0.01
Temperaturni koeficijent $\beta$ napona $V_{oc}$ [%/K]	-0.03
Temperaturni koeficijent $\delta$ snage $P_{max}$ [%/K]	-0.31

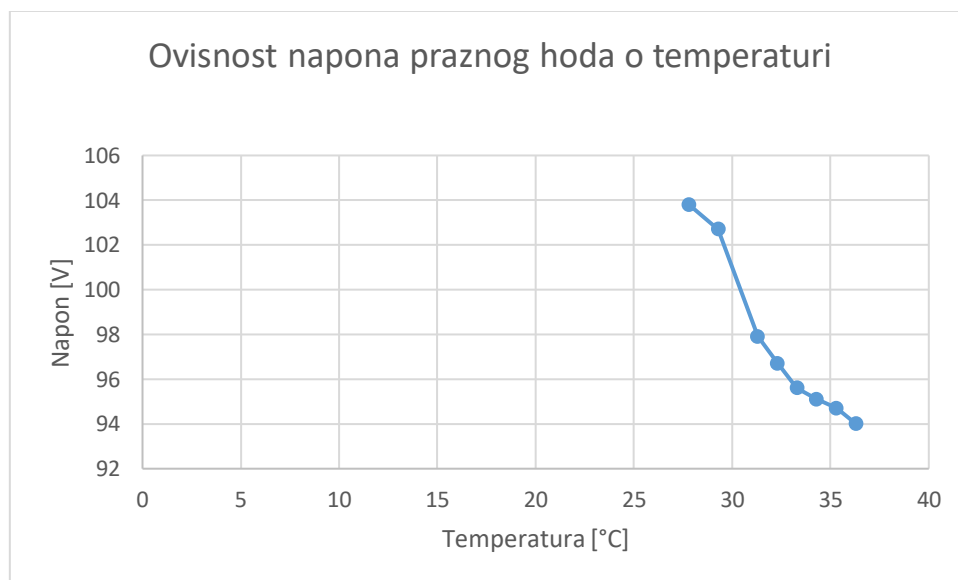
Tablica 5.7. Mehaničke karakteristike modula Solar Frontier SF 150-S [20]

Dimenzije (duljina*širina*visina) [mm]	1.257*977*35
Težina [kg]	20
Klasa primjene (IEC 61730)	Klasa A
Ocjena otpornosti na vatru (IEC 61730)	Klasa C
Sigurnosna klasa (IEC 61140)	II
Opterećenje snijeg/vjetar	2.400 Pa (IEC 61646) / 1.600 Pa
Tip ćelije	CIS stakleni supstrat (bez kadmija)
Prednja strana	Prozirno kaljeno staklo; 3.2 mm
Enkapsulant	EVA (etilen-vinil acetat)
Stražnja strana	Vodootporna plastična folija
Okvir	Anodizirana aluminijska legura
Rubno brtvilo	Butilna guma
Spojna kutija	Zaštitna ocjena: IP67 (s bypass diodom)
Ljepilo	Silikon
Izlazni kabeli (provodnik) [mm <sup>2</sup> ]	2.5 / AWG14 (bez halogena)
Duljina kabela (simetrično) [mm]	1.200
Konektori	MC4 kompatibilni

Prilikom ispitivanja učinkovitosti fotonaponskog modula Solar Frontier SF150-S ponovno koristimo uređaj METREL MI 3108 Eurotest PV i umjetni izvor svjetlosti i topline te dolazimo do zaključaka vidljivih iz tablice **Error! Reference source not found.** i slike 5.5. odnosno napon  $U_{OC}$  opada porastom temperature čime opada i produktivnost ispitivanog modula.

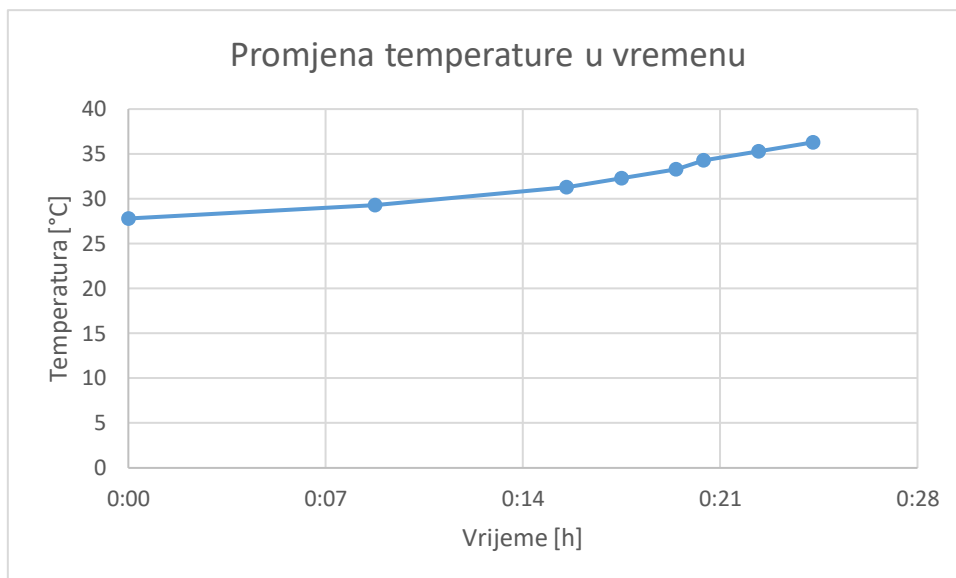
Tablica 5.8. Mjerenja napona  $U_{OC}$  i temperature modula Solar Frontier SF150-S u određenom vremenskom periodu

Napon praznog hoda [V]	Temperatura [°C]	Vrijeme [h]
103.2	27.8	0:00
102.7	29.3	0:09
97.9	31.3	0:16
96.7	32.3	0:18
95.6	33.3	0:20
95.1	34.4	0:21
94.7	35.3	0:23
94	36.3	0:25

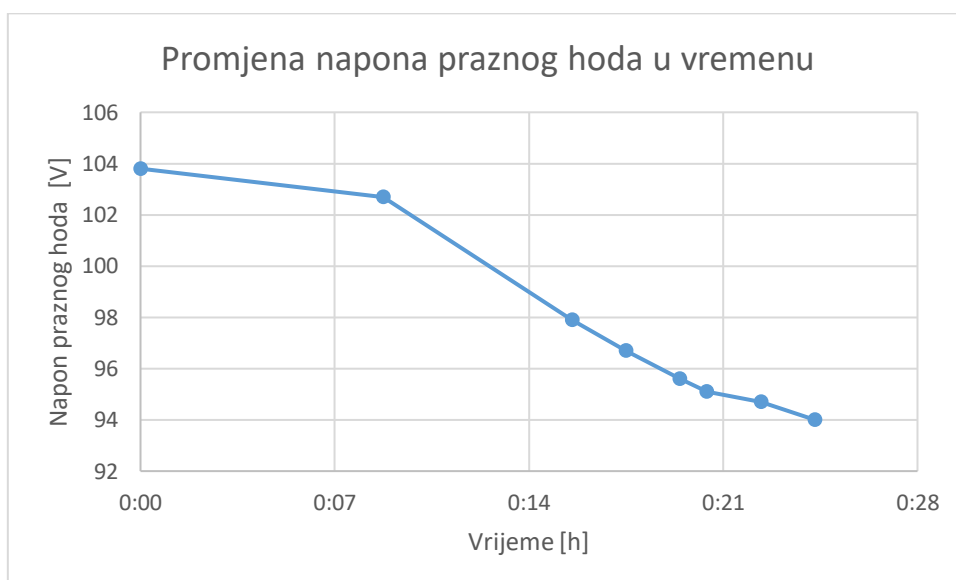


Slika 5.5. Ovisnost napona  $U_{OC}$  o temperaturi fotonaponskog modula Solar Frontier SF150-S

Kako se mijenjaju promatrane varijable, odnosno temperatura i napon  $U_{OC}$  prikazano je na slikama 5.6. i 5.7. Jednadžbom (5-1) izračunali smo temperaturne koeficijente te ih prikazali tablicom 5.9. i slikom 5.8.



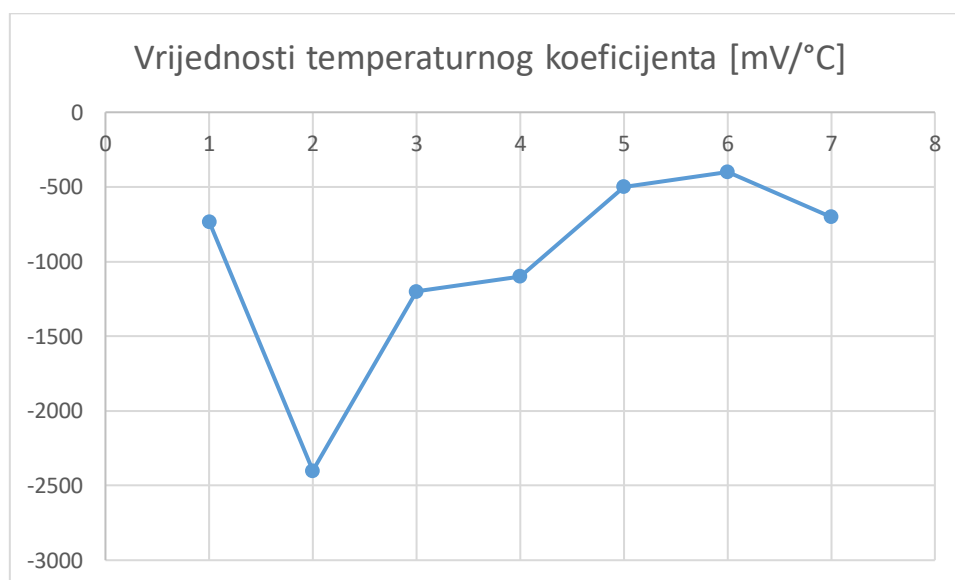
Slika 5.6. Promjena temperature u vremenu mjerenja za Solar Frontier SF150-S



Slika 5.7. Promjena napona  $U_{OC}$  u vremenu mjerenja za Solar Frontier SF150-S

Tablica 5.9. Izračunavanje vrijednosti temperaturnog koeficijenta za Solar Frontier SF150-S

$\Delta$ Napon praznog hoda [V]	$\Delta$ Temperatura [°C]	Temperaturni koeficijent [mV/°C]
-1.1	1.5	-733.33
-4.8	2	-2400
-1.2	1	-1200
-1.1	1	-1100
-0.5	1	-500
-0.4	1	-400
-0.7	1	-700



Slika 5.8. Vrijednosti temperaturnog koeficijenta [mV/°C] za Solar Frontier SF150-S

Laboratorijska mjerenja pokazuju da prosječni temperaturni koeficijent napona za modul Solar Frontier SH 150-S iznosi  $-1004.76 \text{ mV/}^\circ\text{C}$ , što je znatno veći apsolutni iznos od  $289.23 \text{ mV/}^\circ\text{C}$  – temperaturnog koeficijenta izračunatog iz tablica proizvođača 5.5. i 5.6. To ukazuje na slabiju otpornost modula na promjene temperature. Drugim riječima, pri svakom stupnju porasta temperature ćelije, napon opada više nego što je tvornički predviđeno, što dovodi do većeg gubitka snage i smanjenja učinkovitosti modula.

## 6. ZAKLJUČAK

Nakon što je teorijom potkrijepljena važnost energije Sunca koja kao obnovljiv i čist izvor igra ključnu ulogu za održivu budućnost i energetske sigurnost, u obzir je uzet utjecaj kojeg temperatura ima na fotonaponske ćelije. Mjerenja provedena unutar ovog rada jasno pokazuju da temperatura značajno utječe na performanse fotonaponskih modula, što je od ključne važnosti za razumijevanje i optimizaciju solarnih sustava. Učinak koji je vidljiv kod oba ispitivana modula, Panasonic VBH240SE10 i Solar Frontier SF150-S, pokazuje da porastom temperature opada napon praznog hoda, a s njime opada i sama učinkovitost fotonaponskog modula što može biti ključno za ukupnu energetske proizvodnju sustava. Zbog ove povezanosti temperature i performansi modula, važno je pri dizajnu i instalaciji fotonaponskih sustava razmotriti temperaturne koeficijente. Oni pomažu u razumijevanju kako visoke temperature utječu na rad modula, a rezultati istraživanja ukazuju upravo na potrebu za njihovim razmatranjem pri odabiru fotonaponskih modula za određene klimatske uvjete, kako bi se osigurala maksimalna proizvodnja energije.

## LITERATURA

- [1] H.A. Zondag, Flat-plate PV-thermal collectors and systems: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, No. 4, str (891-959), sječanj 2008.
- [2] D.L. Evans, Florschuetz, L.W. Florschuetz, Cost studies on terrestrial photovoltaic power systems with sunlight concentration, *Solar Energy*, vol. 19, No. 3, str (255–262), 1977.
- [3] G.W. Hart, P. Raghuraman, Simulation of thermal aspects of residential photovoltaic systems, MIT Report , lipanj 1982.
- [4] R.W. Taylor, System and module rating: advertised versus actual capability, *Solar Cells*, vol. 18, No. 3-4, str (335–344), rujanj, 1986.
- [5] B. Kroposki, D. Myers, K. Emery, L. Mrig, C. Whitaker, J. Newmiller, Photovoltaic module energy rating methodology development. In: *Proceedings of 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, May 13–17, Washington DC, str (1311–1314), Washington 1996.
- [6] D.L. King, J.A. Kratochvil, W.E. Boyson, W.I. Bower, Field experience with a new performance characterization procedure for photovoltaic arrays, *Proceedings of Second World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion*, str (1947–1952), Beč, 1998.
- [7] B. Kroposki, W. Marion, D.L. King, W.E. Boyson, J.A. Kratochvil, Comparison of module performance characterization methods, *Proceedings of 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, str (1407–1411), Anchorage, 2000.
- [8] D.L. King, W.E. Boyson, J.A. Kratochvil, Photovoltaic array performance model, Sandia National Laboratories Albuquerque, Novi Meksiko, 2004.
- [9] R.P. Kenny, E.D. Dunlop, H.A. Ossenbrink, H. Müllejans, A practical method for the energy rating of c-Si photovoltaic modules based on standard tests, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 14, str (155–166), 2006.
- [10] C. Gay, J. Rumburg, J. Wilson, ‘AM/PM’ – all-day module performance measurements, *Proceedings of 16th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, str (1041–1046), San Diego, 1982.
- [11] K. Bücher, K. Heidler, G. Kleiss, A. Raicu, Annual and seasonal energy rating of mono-Si, a-Si and GaAs test cells for the USA by the RRC method, *Proceedings of 22nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, str (744–749), Las Vegas, 1991.
- [12] G. M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004.
- [13] Iberdrola, Photovoltaic cells: discover their evolution, their different types and the latest innovations, Iberdrola, dostupno na: <https://www.iberdrola.com/innovation/photovoltaic-photoelectric-cells> [12.9.2024.]
- [14] D. Šljivac, D. Topić, *Obnovljivi izvori električne energije*, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Osijek, 2018.

[15] N. D. Weimar, Standard Test Conditions (STC): definition and problems, Sinovoltaics, dostupno na:

<https://sinovoltaics.com/learning-center/quality/standard-test-conditions-stc-definition-and-problems/> [12.9.2024.]

[16] SolarDesignGuide, STC and NOCT – Solar Panel Test Conditions, SolarDesignGuide, dostupno na: <https://solarDesignGuide.com/stc-and-noct-solar-panel-test-conditions-explained/> [12.9.2024.]

[17] M. Azzouzi, D. Popescu, and M. Bouchahdane, Modeling of Electrical Characteristics of Photovoltaic Cell Considering Single-Diode Model, Journal of Clean Energy Technologies, vol. 4, No. 6, studeni 2016., dostupno na: <https://www.jocet.org/vol4/323-S011.pdf> [12.9.2024.]

[18] METREL d.d, Eurotest PV, MI 3108, Instruction manual, Slovenija

[19] Specifikacije monokristalnog fotonaponskog modula Panasonic VBHN240SE10, 2012.

[20] Specifikacije fotonaponskog modula Solar Frontier SF150-S, 2012.

## SAŽETAK

Sunčeva energija predstavlja jedan od najvažnijih obnovljivih izvora energije, ključan za smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima, a time i ublažavanje klimatskih promjena. U teorijskom dijelu ovog završnog rada objašnjeni su pojam i vrste Sunčevog zračenja kao i njegova geometrija, nakon čega se nastavlja s pojašnjenjem pojmova fotonaponska ćelija, modul te objašnjenjem njihovog principa djelovanja. U praktičnom dijelu rada provedena su mjerenja na dva različita fotonaponska modula, Panasonic VBH240SE10 i Solar Frontier SF150-S, koristeći uređaj METREL MI 3108 Eurotest PV. Mjerio se napon praznog hoda i temperatura modula u svrhu istraživanja kakav utjecaj promjene u temperaturi imaju na njihove performanse. Rezultati mjerenja pokazali su da porast temperature dovodi do smanjenja napona praznog hoda, što posljedično smanjuje učinkovitost modula.

**Ključne riječi:** Učinkovitost, fotonaponski modul, performanse, Sunčevo zračenje, temperatura



## **ABSTRACT**

Solar energy is one of the most important renewable energy sources, crucial for reducing dependence on fossil fuels and, consequently, mitigating climate change. In the theoretical part of this undergraduate thesis, the concept and types of solar radiation, as well as its geometry, are explained, followed by an explanation of photovoltaic cells and modules, including their operating principles. In the practical part of this undergraduate thesis, measurements were conducted on two different photovoltaic modules, the Panasonic VBH240SE10 and Solar Frontier SF150-S, using the METREL MI 3108 Eurotest PV device. The open-circuit voltage and module temperature were measured to investigate how temperature changes affect their performance. The measurement results showed that an increase in temperature leads to a decrease in open-circuit voltage, which consequently reduces the efficiency of the modules.

**Keywords:** Efficiency, photovoltaic module, performance, solar radiation, temperature

## **ŽIVOTOPIS**

Klara Perišić rođena je 9.9.2001. godine u Slavonskom Brodu. U Vinkovcima završava Osnovnu školu Josipa Kozarca nakon koje svoje obrazovanje nastavlja u istom gradu upisom općeg smjera Gimnazije Matije Antuna Reljkovića. Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija upisuje 2020. godine, a dvije godine poslije opredjeljuje se za smjer elektroenergetika.