Analiza performansi različitih tehnologija fotonaponskih modula u laboratoriju za OIE

Runac, Karlo

Master's thesis / Diplomski rad

2018

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:317837

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

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

Sveučilišni studij

Analiza performansi različitih tehnologija fotonaponskih modula u laboratoriju za OIE

Diplomski rad

Karlo Runac

Osijek, 2018

SADRŽAJ:

1. UVOD.....1

1.1 Zadatak.....1

1.2 Norma IEC 61724-3.....1

2. OSNOVNO O FOTONAPONSKIM SUSTAVIMA.....4

2.1. Povijest.....4

2.2 Energija sunca.....4

2.3 Fotonaponska pretvorba.....7

2.4 Fotonaponska ćelija.....9

3. KORIŠTENE TEHNOLOGIJE.....18

3.1 Monokristalni silicij.....18

3.2 Polikristalni silicij.....20

3.3 Visokoučinkoviti silicij.....23

4. MJERENJA.....26

4.1 Meteorološki podaci.....26

4.2 Temperatura modula i okoline.....27

4.3. Proizvedena električna energija i učinkovitost.....28

5. OBRADA PODATAKA.....30

5.1. Proračun prema normi IEC 61724-3.....30

5.2. Empirijska analiza FN modula.....32

6. ZAKLJUČAK.....41

LITERATURA.....42

SAŽETAK.....44

ŽIVOTOPIS.....45

PRILOZI.....46

1. UVOD

Iskorištavanje energije sunca posljednjih godina bilježi konstantan rast gotovo u cijelom svijetu i počinje imati sve veći udio u ukupnoj proizvedenoj električnoj energiji u većini zemalja. Sve se više i brže razvijaju tehnologije fotonaponskih ćelija i koncentriranja sunčeve energije, te su sve veća ulaganja investitora. U ovom radu analizirat će se performanse tri fotonaponska modula prema IEC 61724-3 normi.

Glavni dio rada podijeljen je na četiri cjeline. Prva daje teorijsku podlogu o fotonaponskim ćelijama. Zatim su u sljedećoj cjelini opisane tehnologije izrade i karakteristike ispitivanih modula. U trećoj cjelini prikazana su mjerenja, te u zadnjoj cjelini obavljen je proračun prema IEC 61724-3 normi.

1.1 Zadatak

Cilj rada je da se na temelju razvijene baze mjerenja u periodu od 12 mjeseci izvrši detaljna analiza performansi fotonaponskih modula različitih tehnologija (monokristali, polikristalni i visokoučinkoviti silicij) prema IEC normi. Poseban se naglasak stavlja na proizvodnju električne energije i učinkovitosti u ovisnosti o klimatskim uvjetima.

1.2 Norma IEC 61724-3

O normi

Učinkovitost FN sustava ovisi o vremenu, sezonskim efektima te o ostalim povremenim problemima. Da bi se utvrdilo funkcionira li sustav kao što je predviđeno, potrebno je utvrditi da sustav ispravno funkcionira u cijelom nizu uvjeta koji su relevantni za mjesto na kojem se FN sustav nalazi. Ova metoda namijenjena je testiranju određenog FN sustava u cijelom nizu relevantnih radnih uvjeta za određeni vremenski period (najčešće jedna godina) kako bi se potvrdila dugoročna očekivana proizvedena električna energija te kako bi se utvrdile sve vrste smetnji koje uzrokuju smanjenje performansi. I to ne samo smetnje vezane za vremenske uvjete nego i smetnje vezane uz prekide, mrežne probleme, hardverske kvarove, loše održavanje itd. [1]

Sažetak norme

Obično prvi korak u procesu je predviđanje performansi FN sustava na temelju povijesnih vremenskih podataka koristeći odabrani model. Model je definiran prema inputima, izračunu i načinu na koji će izmjereni meteorološki podaci biti ubačeni u model. Konačna usporedba očekivane i izmjerene energije ne koristi izravno predviđenu energiju, predviđena energija se obično koristi prilikom planiranja projekta. Model može pretpostaviti 100% dostupnost ili može odrediti neku već predviđenu nedostupnost i smanjiti dostupnost za određeni iznos.

Performanse fotonaponskog sustava, treći dio: metoda procjene energije

Predviđena energija je proizvedena energija sustava koja je proračunata pomoću specifičnog modela, koristeći povijesne vremenske podatke koji se smatraju reprezentativni za određeno područje.

Očekivana energija je proizvedena energija koja je proračunata na isti način kao i predviđena energija pomoću specifičnog modela, ali koristi stvarne vremenske podatke koji su prikupljeni na promatranom području tijekom ispitivanja FN elektrane u određenom razdoblju (jedna godina).

Usporedba modela i rezultata ispitivanja za procjenu indeksa energetske učinkovitosti ukratko je opisana u sljedećim podtočkama.

- Odredite granicu testiranja kako bi se uskladili s namjeravanom granicom sustava
- Izračunajte i dokumentirajte očekivanu energiju koristeći odabrani model navodeći sve ulazne varijable uključujući povijesne vremenske podatke, pretpostavke vezane uz prljanje, zasjenjivanje, ispade itd.; ti podaci trebaju biti dodani u završni izvještaj kao dodatak. Za predviđenu energiju može se pretpostaviti 100% dostupnosti ili se može reducirati za određeni iznos ovisno o dostupnosti.
- Izvršite mjerenja podataka iz ispitivanog sustava tijekom ispitnog razdoblja
- Pronađi periode kada je sustav nedostupan iz bilo kojih razloga
- Procijenite izmjerene podatke kako biste iz identificirali i dokumentirali anomalije koje mogu zahtijevati dodatne radnje. Takve anomalije uključuju nestale ili pogrešne podatke koji se zamjenjuju
- Izračunajte očekivanu energiju za cijelo vremensko razdoblje, zamijenite podatke koji nedostaju ukoliko je potrebno

- Usporedite očekivane i izmjerene energije u elektrani kako biste dobili indeks energetske učinkovitosti
- Izračunajte nesigurnost mjerenja [1]

2. OSNOVNO O FOTONAPONSKIM SUSTAVIMA

2.1. Povijest

Edmond Becquerel 1839. godine otkriva fotonaponski efekt.

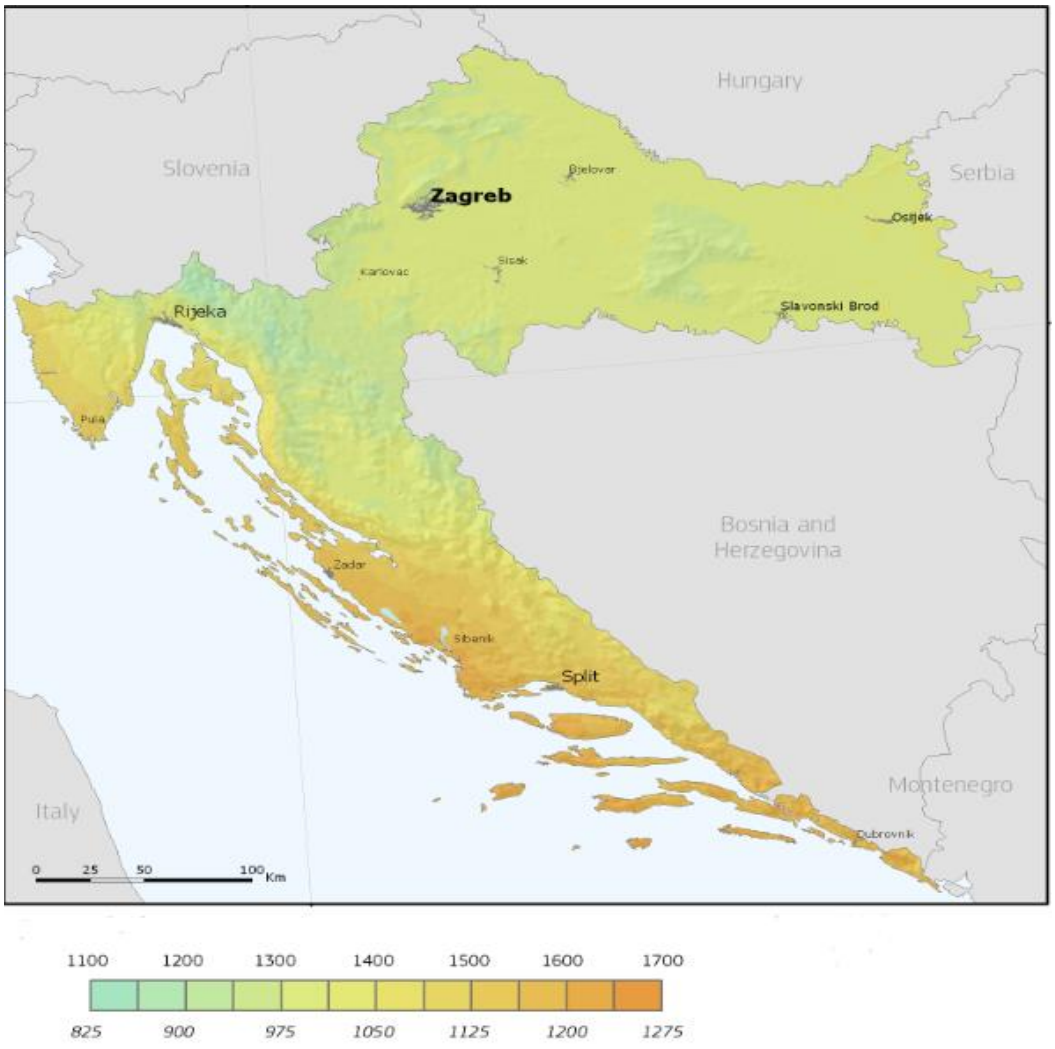
Russell Ohl godine 1941. godine otkriva prvu solarnu ćeliju izrađenu od silicija. Njezina učinkovitost pretvorbe bila je vrlo mala (manja od 1%).

1954. godine u New Yorku skupina istraživača u Bell Laboratories izradila je prvu solarnu ćeliju. Njena učinkovitost je bila 6%. Također su konstruirali i prvi solarni modul imena Bell-ova solarna baterija. Zbog vrlo velike cijene proizvodnje komercijalnu upotrebu nalazi 1958. godine u svemirskim istraživanjima za napajanje satelita. . Nakon naftne krize 70-tih godina počinje se znatnije ulagati u fotonaponske tehnologije. [2]

2.2 Energija sunca

Energija sunčeva zračenja rasprostranjuje se po površini Zemlje ovisno o geografskoj širini, godišnjem dobu i dužini dana. Kada se govori o iskorištenosti sunčeva zračenja kao izvora energije, misli se na onaj dio energije koji dolazi na površinu Zemlje. Intenzitet sunčeva zračenja tijekom godine se mijenja zbog promjena udaljenosti Zemlje od Sunca. Kod prolaska kroz zemljinu atmosferu dio sunčeva zračenja se apsorbira (apsorbiraju ga plinovi), drugi dio reflektira (na molekulama plinova, česticama prašine), a dio se reemitira (slika 2.2.). Energija direktnog sunčeva zračenja pri prolazu kroz atmosferu smanjuje se u ovisnosti o atmosferskim prilikama (vedro, poluoblačno, oblačno), o zagađenosti atmosfere i o nadmorskoj visini. [3]

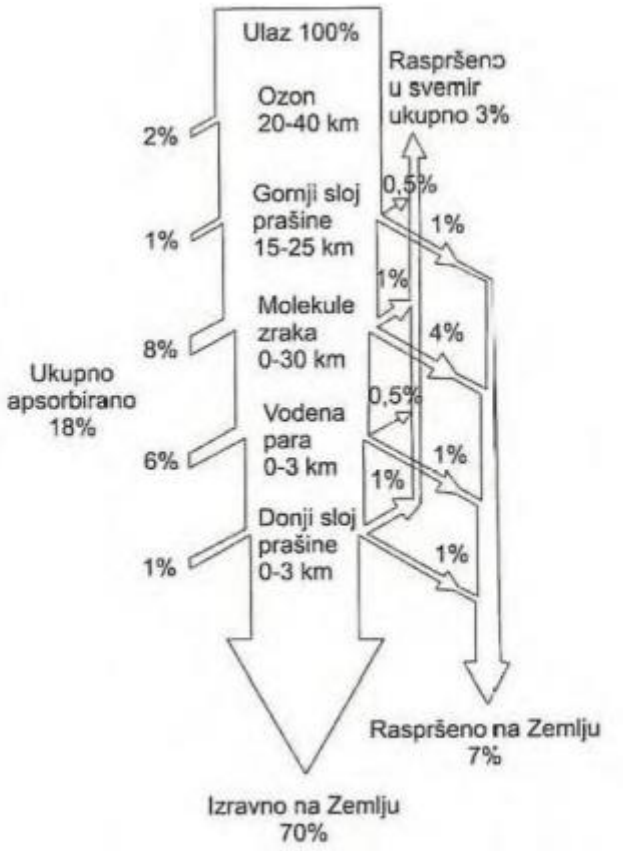
Ukupno ili globalno sunčevo zračenje sastoji se od izravnog i difuznog sunčevog zračenja.



Slika 2.1. Ukupno godišnje solarno zračenje u kWh/m^2 za Hrvatsku [15]

Izravno (direktno zračenje) je dio sunčevog zračenja koje dolazi izravno iz prividnog smjera sunca.

Difuzno ili raspršeno sunčevo zračenje nastaje raspršenjem sunčevog zračenja. Raspršenje nastaje kada sunčevo zračenje nailazi na molekule plina i čestice u atmosferi. Zbog raspršenja, sunčeva energija ne širi se više u samo jednom već u svim smjerovima . [14]



Slika 2.2. Utjecaj atmosfere na upadno sunčevo zračenje [14]

Znatniji problemi pri upotrebi energije sunčeva zračenja: mala gustoća energetskog tijeka, oscilacija intenziteta tijekom dana, ovisnost intenziteta o klimatskim uvjetima, intenzitet zračenja se najčešće poklapa s intenzitetom potrošnje, nemogućnosti skladištenja energije, kao i njezina neekonomičnost u usporedbi s ostalim izvorima energije.

Sunčeva energija je OIE jer se ne može potrošiti (kao na primjer fosilna goriva). Ona je čist izvor energije jer nakon instalacije nema štetnih emisija ili zagađenja nastalog zbog upotrebe solarnih panela ili solarnih ćelija.

Energiju sunca možemo iskoristiti na 3 načina:

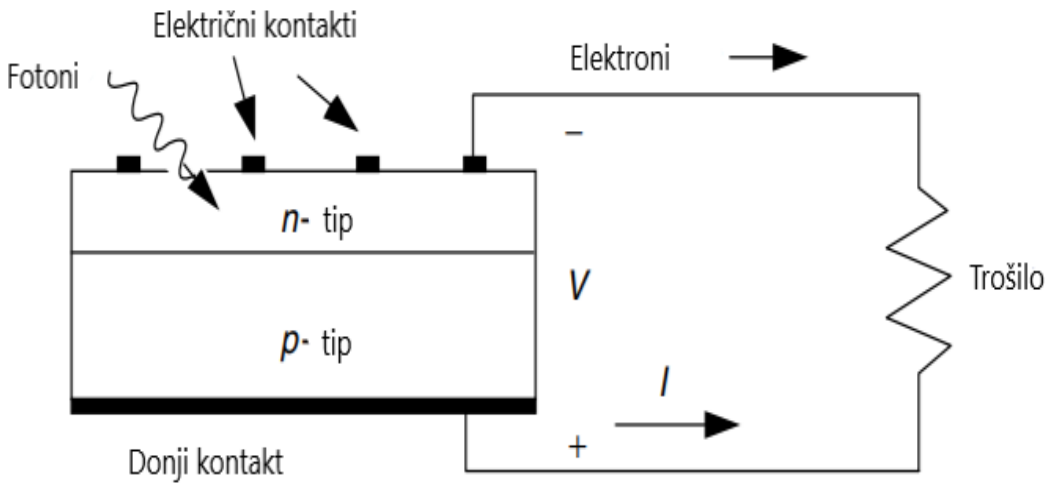
- Solarni paneli (kolektori) - energija se pretvara u toplinu (grijanje)
- Fokusiranje solarne energije (solarne elektrane)
- Solarne ćelije- direktna pretvorba u električnu energiju [4]

2.3 Fotonaponska pretvorba

Poluvodiči su u pravilu nevodljive tvari, ali pokazuju vodljiva svojstva ukoliko se osvijetle ili zagriju. Većina poluvodiča je na mikroskopskoj razini kristalne strukture. Kristalna rešetka poluvodiča sastoji se od atoma koji su povezani kovalentnom vezom. Najčešći poluvodiči su Silicij i Germanij. Šupljine su zamišljene čestice, koje imaju pozitivan predznak i čija je masa približno jednaka masi elektrona i jednakog naboja kao i elektron samo pozitivnog predznaka. Šupljine nastaju kad se elektroni pri vrhu popunjene vrpce poluvodiča, zbog dovedene energije prebacuju u vodljivu vrpcu. Na vrhu valentne vrpce ostaje upražnjeno mjesto koje zauzima drugi elektron.

Koncentracija nosilaca u vodljivoj i valentnoj vrpce povećava se dodavanjem primjesa. Na taj način se kontrolira vodljivost poluvodiča. Primjese koje uvode energetski nivo blizu dna vodljive vrpce omogućuju svojim elektronima da se "lako" prebace u vodljivu vrpcu. Iz toga razloga nazivaju se donori. Većina nosilaca naboja su elektroni porijeklom od samog poluvodiča i od donorskih atoma, pa se takvi poluvodiči nazivaju poluvodiči N-tip. Najčešće korišteni donori u kristalima silicija i germanija su fosfor, arsen i antimon. Ako se poluvodiču dodaju trovalentne primjese, za potpunu vezu nedostaje jedan elektron. Energetski nivo donorskih stanja je nešto iznad vrha popunjene vrpce. Ta blizina omogućuje valentnim elektronima lagani energetski skok tako da u valentnoj vrpci ostaje upražnjeno mjesto odnosno nova šupljina. Dodavanjem akceptorskih atoma uzrokuje povećanje gustoće šupljina u valentnoj vrpci. S obzirom da su u ovom slučaju šupljine u većini, poluvodič s akceptorskim primjesama naziva se poluvodič P-tipa. [2]

Ukoliko se P i N tip poluvodiča spoje nastaje PN spoj. Na spoju ova dva tipa poluvodiča rekombinacijom elektrona i šupljina nastaje neutralno područje sa električnim poljem. Kada se PN spoj izloži sunčevom svjetlu, apsorbirani fotoni proizvode parove elektron-šupljina međutim unutrašnje električno polje u osiromašenom području razdvaja taj par. Elektroni se gibaju prema N strani, a šupljine prema P strani spoja. Elektroni se gomilaju na jednoj strani, odnosno šupljine na suprotnoj te dolazi do neravnoteže između prednje i stražnje strane PN spoja. Javlja se razlika potencijala odnosno napon. [5]



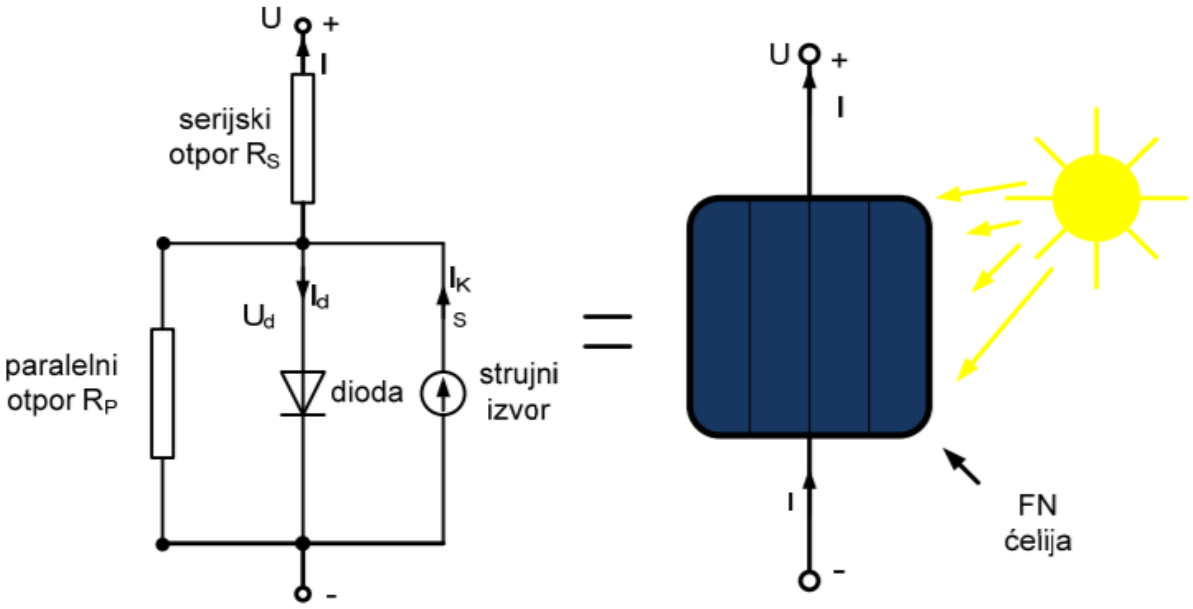
Slika 2.3. Princip rada PN diode [17]

Fotonaponska pretvorba je izravna pretvorba sunčevoga svjetla u električnu struju. Fotonaponske ćelije posreduju u pretvorbi solarne u električnu energiju. Fenomen koji u fizici objašnjava ovu pretvorbu naziva se fotonaponski efekt. [6]

Fotonaponski efekt je pojava koja induciranja napona (električne struje) ukoliko se materijal izloži sunčevom zračenju. Kada sunčeva svjetlost obasja površinu materijala, elektroni koji se nalaze u valentnoj vrpci apsorbiraju energiju, dolazi do skoka elektrona u vodljivu vrpcu te oni postaju slobodni. [4]

2.4 Fotonaponska ćelija

Fotonaponska ćelija je realni strujni izvor jer je količina elektrona koja proteče (jakost struje) proporcionalna sunčevom zračenju.



Slika 2.4. Nadomjesna shema FN ćelije [4]

Prema slici 1. vidimo da je izlazna struja FN ćelije jednaka struji I_{fs} umanjenoj za struje koje teku kroz diodu I_D i kroz paralelni otpor I_P.

$$I = I_{fs} - I_D - I_P = I_{fs} - I_0 - \left[e^{\frac{e(U+IRs)}{mKT}} - 1\right] - \frac{U}{R_P} \tag{2-1}$$

Gdje je:

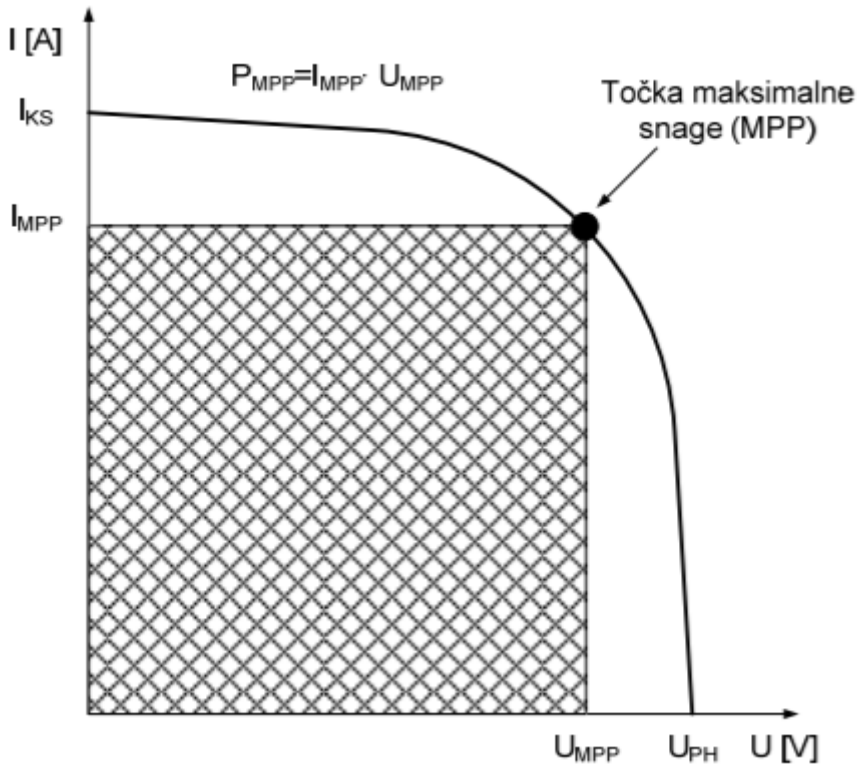
- U napon,
- R_P paralelni otpor FN ćelije,

- I_0 je struja zasićenja ,
- e je elementarni naboj (e=1,602×10^{-19}As),
- R_S serijski otpor,
- m parametar FN ćelije (m=1),
- k Boltzmanova konstanta (k=1,38×10^{-23} J/K)
- T je apsolutna temperatura u kelvinima.

Zbog velikog paralelnog otpora (otpora shanta) I_P se najčešće zanemaruje.

Serijski otpor predstavlja omski otpor kontakata, materijala i slično.

Paralelni otpor je uzrokovan okolnim defektima u PN spoju. [4]



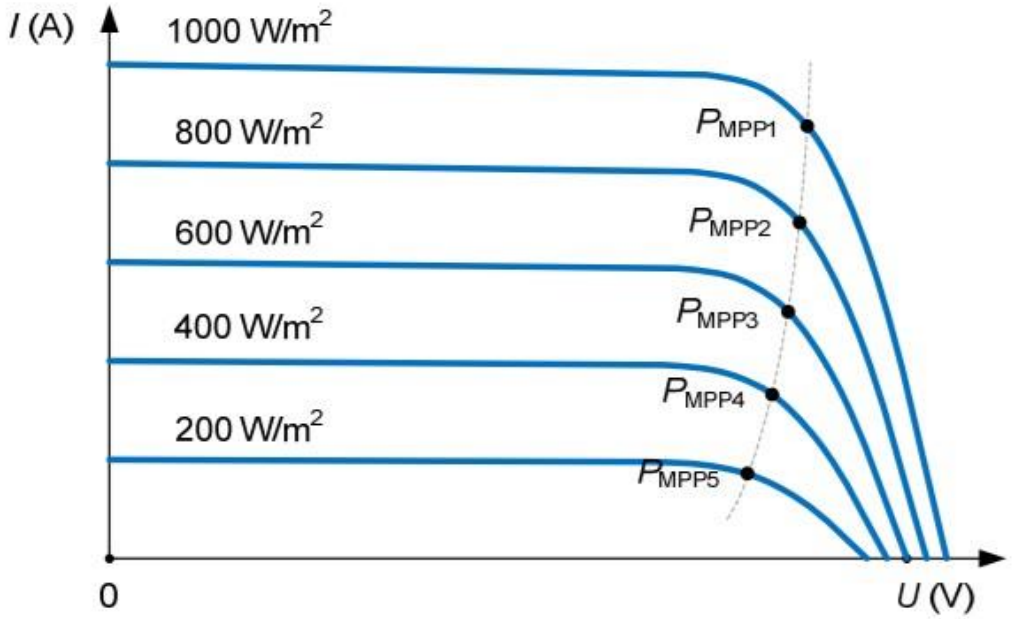
Slika 2.5. Strujno naponska karakteristika FN ćelije [4]

Na slici 2. je prikazana U-I karakteristika FN ćelije. Postoje tri karakteristične toče na krivulji:

- Točka kratkog spoja (I_{KS} i U=0), I_{KS} je struja pri kratko spojenim stezaljkama FN ćelije
- Točka praznog hoda (I=0 i U_{PH}), U_{PH} napon otvorenih stezaljki FN ćelije

- Točka maksimalne snage (MPPT)

Na slici 2.4. može se vidjeti da maksimalnu snagu dobivamo na pregibu krivulje. Postoje uređaji koji konstantno traže točku pregiba ovisno o promjeni energije sunčevog zračenja i opterećenja.



Slika 2.6. U-I karakteristika FN ćelije u ovisnosti o jakosti sunčevog zračenja [4]

Iz slike 2.5. može se zaključiti da se povećanjem jakosti sunčevog zračenja povećava i proizvedena energija tj. struje i naponi.

Utjecaj temperature na FN ćelije je također bitan. Stupanj djelovanja ćelije smanjuje se s povečanjem temperature (oko 0.5 % za povećanje temperature od 1 °C). Promjena temperature utječe i na izgled strujno naponske karakteristike (Slika 2.6.)

$$T_{ćel} = T_{okoline} + \left(\frac{NOCT - 20°}{0{,}8}\right) \cdot G \tag{2-2}$$

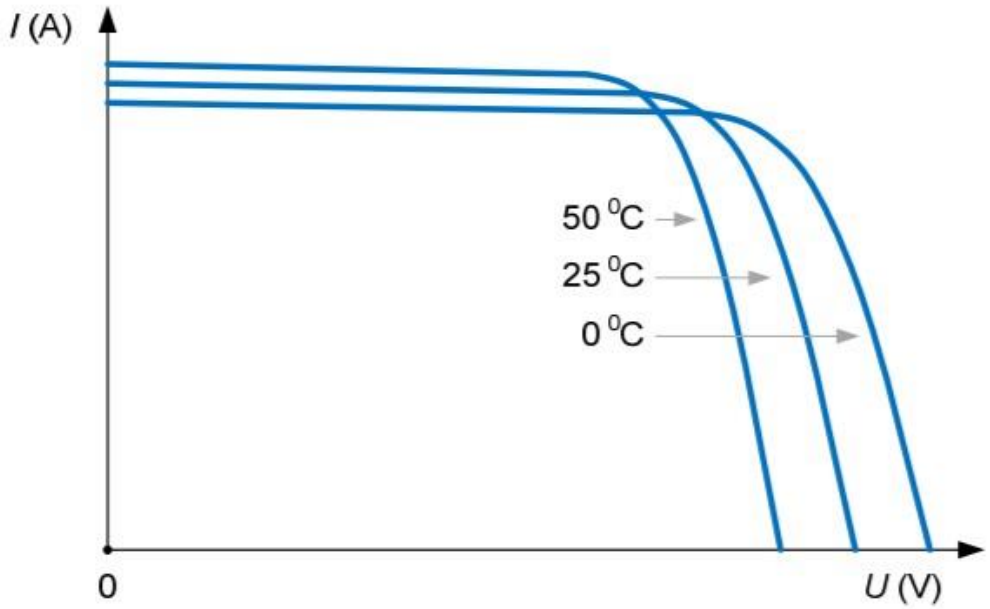
Gdje je:

$T_{ćel}$ je temperatura ćelije

$T_{okoline}$ je temperatura okoline

NOCT je temperatura ćelije ukoliko je temperatura okoline 20°

G je jakost sunčevog zračenja (kW/m^2)



Slika 2.7. U-I karakteristika FN ćelije u ovisnosti o promjeni temperature ćelije [4]

Učinkovitost fotonaponske ćelije ovisi o vanjskim utjecajima (jakost zračenja, temperatura itd.) i unutarnjim otporima. Učinkovitost FN ćelije računa se kao omjer maksimalne snage P_{MPPT} i snage sunčevog zračenja G na površinu A fotonaponske ćelije. [4]

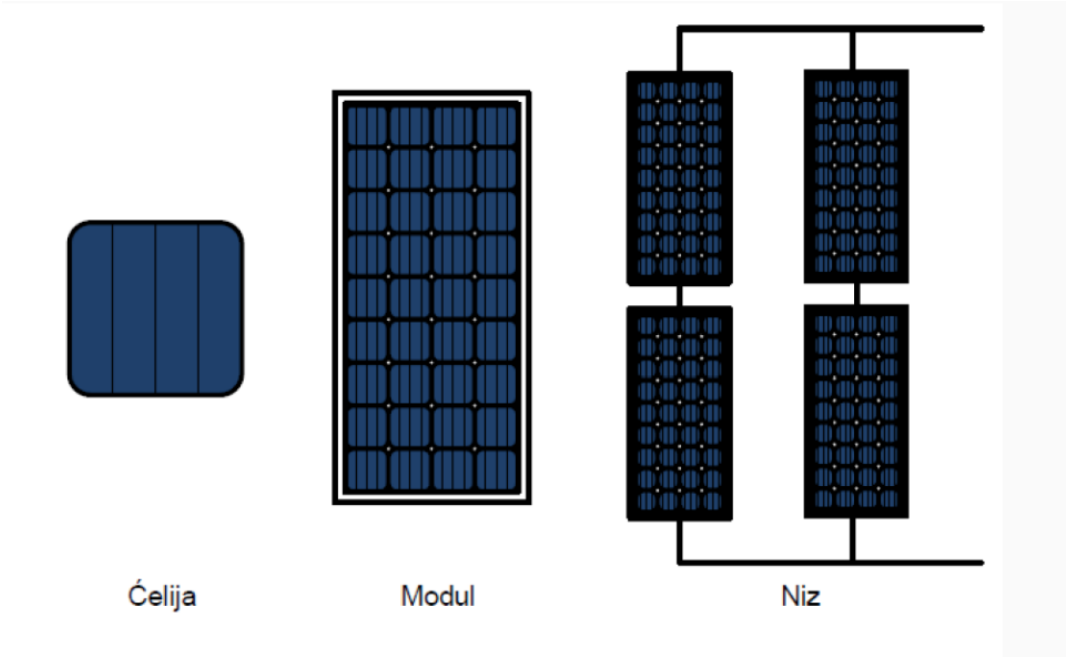
$$\eta = \frac{P_{MPPT}}{G \cdot A_{FNC}} \cdot 100 = F \cdot \frac{J_{KS} \cdot U_{PH}}{G} \cdot 100 \qquad (2\text{-}3)$$

Pri tome je F faktor punjenja:

$$F = \frac{U_{MPPT} \cdot I_{MPPT}}{U_{PH} \cdot I_{KS}} \tag{2-4}$$

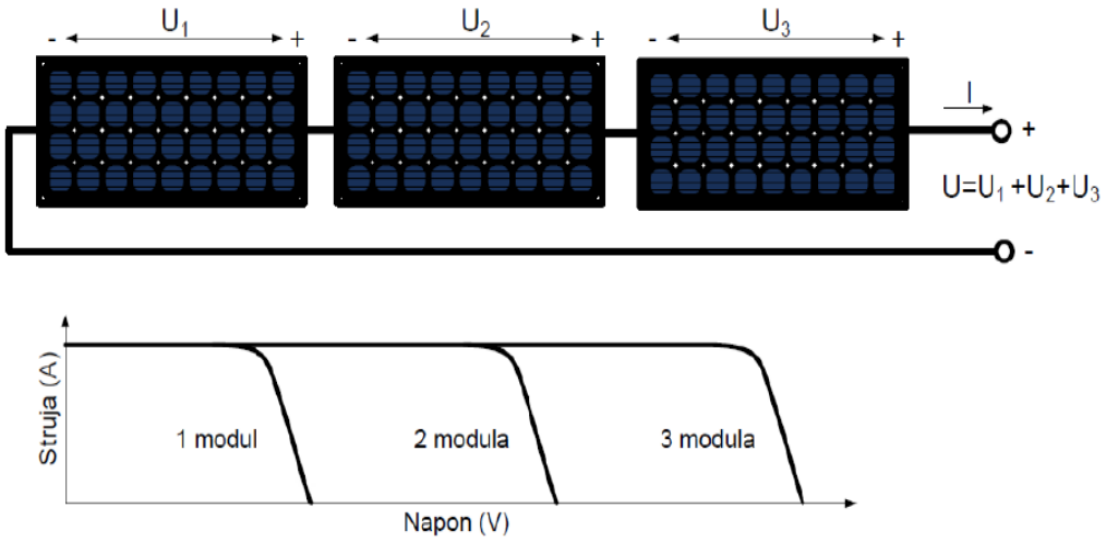
Faktor punjenja je omjer površine dvaju pravokutnika, jedan sa površinom U_{MPPT} i I_{MPPT}, a drugi sa površinom U_{PH} *i* I_{KS}. On prikazuje koliko se stvarna ćelija približuje idealnoj tj. koliko je kvalitetna. Obično je F u granicama između 0,7 i 0,9. [4]

Fotonaponska ćelija je obično malih dimenzija (od 1 do 10 cm). Izlazna snaga joj varira od 1 do 2 W, a izlazni napon do 0,6 V. Iz toga razloga ćelije se međusobno spajaju (serijski) i tvore FN modul. Dalje se povezuju više modula i dobiva se niz (Slika 2.8.).



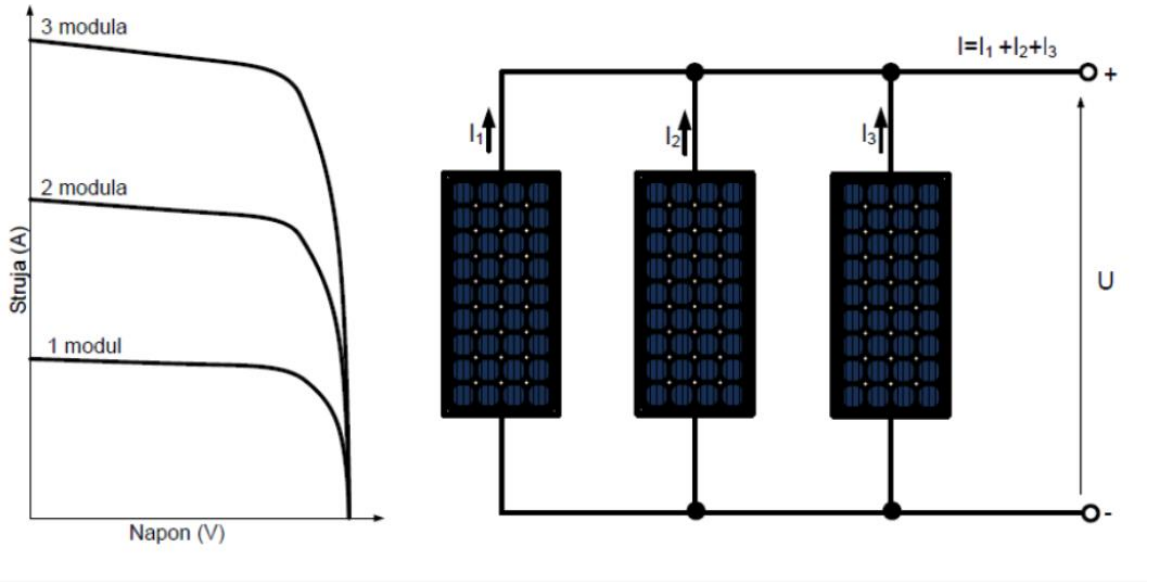
Slika 2.8. FN ćelija, modul i niz [7]

Ukoliko se želi postići veći izlazni napon, moduli se spajaju serijski, a ako se želi postići veći iznos struje moduli se spajaju u paralelu. Najčešće se kombinira serijski i paralelni spoj modula. Spojem u seriju *I-U* karakteristike se dodaju niz os apscise (slika 2.9.)



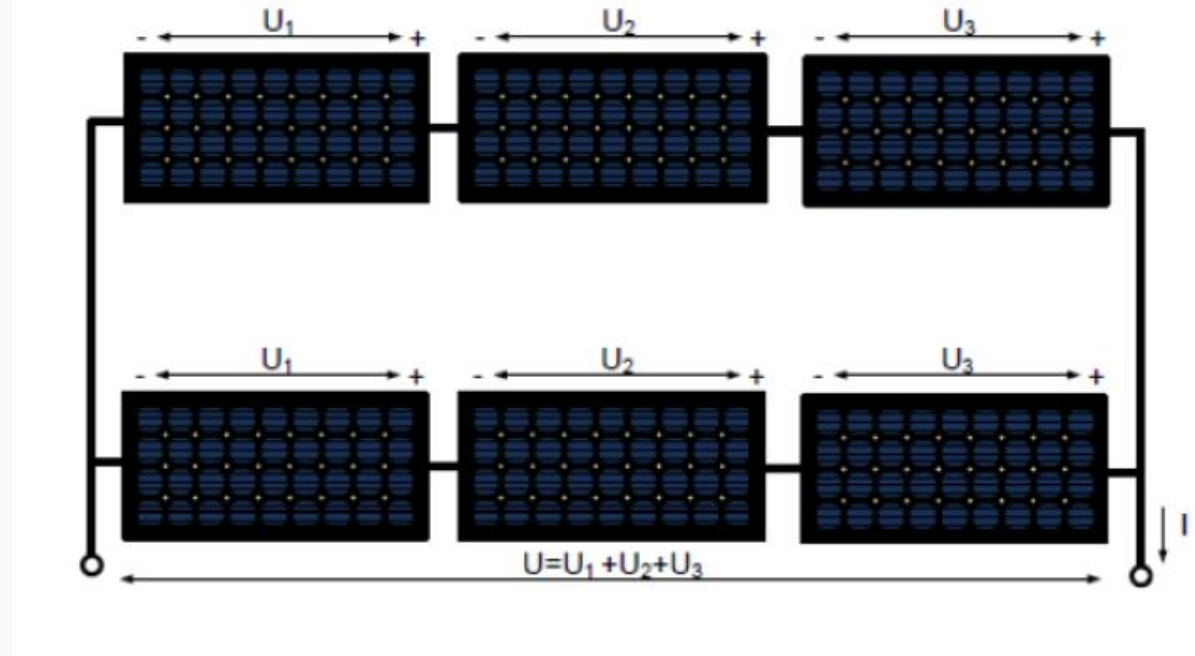
Slika 2.9. Serijski spoj modula [7]

Kod paralelnog spoja modula, napon ostaje konstantan na svim modulima, a struje se sumiraju kao što je prikazano na slici 2.10.

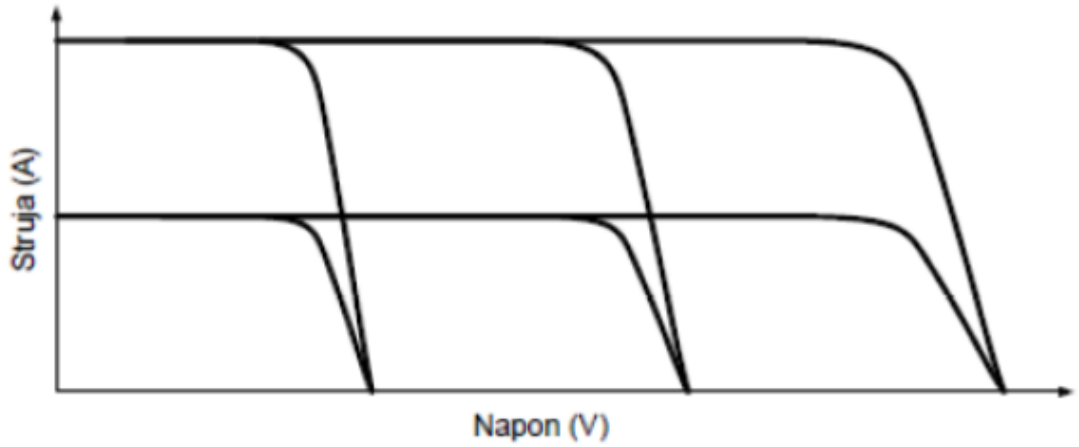


Slika 2.10. Paralelni spoj FN modula [7]

U FN elektranama se obično kombinira serijski i paralelnih spojenih modula. Serijski se u niz spaja određen broj modula dok se ne dosegne određeni naponski nivo kojeg najčešće ga određuju elektronički elementi. Zatim se serijski nizovi spajaju u paralelu.



Slika 2.11. Kombinacija serijskog i paralelnog povezivanja modula [7]



Slika 2.12. *I-U* karakteristika serijsko-paralelnog spoja FN modula [7]

Tehničke karakteristike FN modula definiraju se za standardne testne uvjete (STC). One uglavnom preslikavaju tehničke karakteristike ćelije.

Tehničke karakteristike modula [4]:

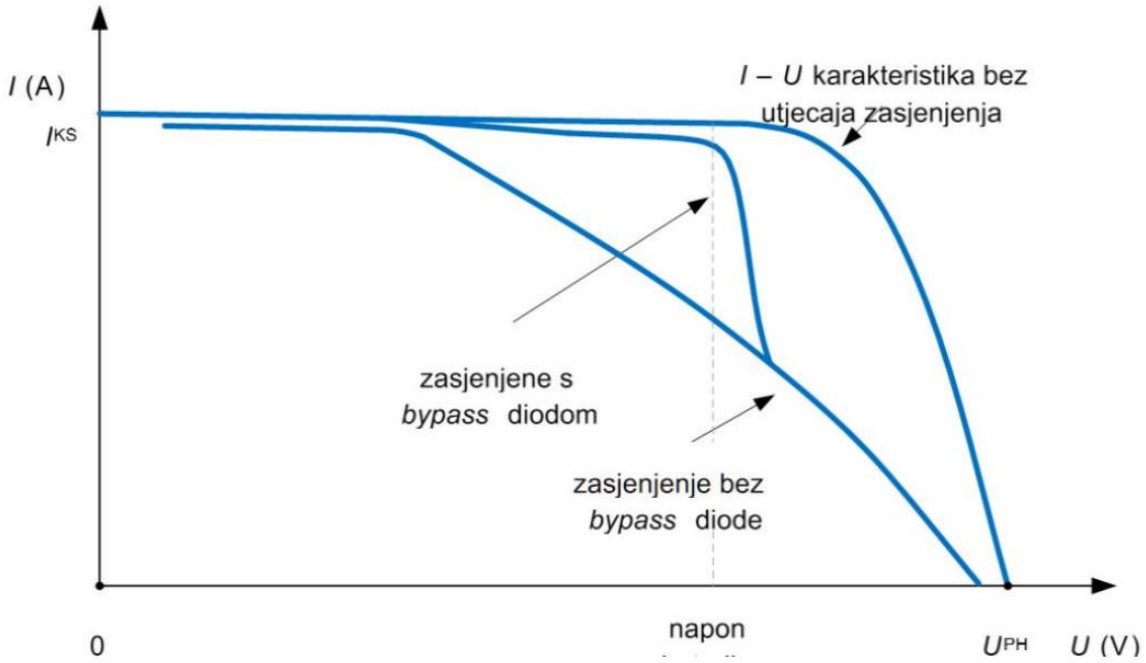
- Nazivna vršna snaga P_{MPP} (kW)
- Učinkovitost η (%)
- Napon praznog hoda U_{PH} (V), struja kratkog spoja I_{KS} (A)

- Napon vršne snage U_{MPP} (V), struja vršne snage I_{MPP} (A)
- Smanjenje snage zbog povećanja temperature γ (W/°C)
- Smanjenje napona zbog povećanja temperature β (V/°C)
- Duljina × širina × visina (mm × mm × mm)
- Masa m (kg)

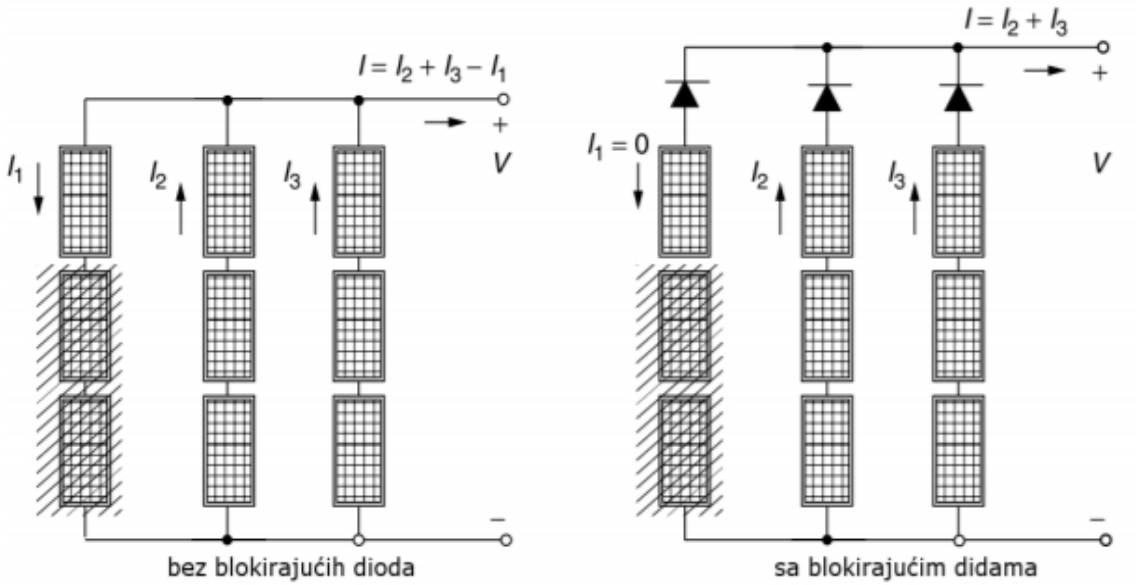
Veliki utjecaj na izlaznu snagu FN modul (niza) može imati zasjenjenje. Zasjenjenje samo jedne ćelije na modulu ili modula u nizu može uzrokovati veliki gubitak snage. Ukoliko imamo FN niz od n serijski spojenih modula i jedan se modul zasjeni, ostali (ne zasjenjeni) moduli proizvoditi će električnu energiju i dovoditi je do zasjenjenog modula koji će se ponašati kao trošilo. Dovedena energija pretvarat će se u toplinu te ukoliko se premaši probojni napon može doći i do proboja PN spoja na zasjenjenoj ćeliji.

Korištenjem zaobilaznih (*engl. bypass*) diodi uklanja se neželjena pojava zagrijavanja ili proboj FN ćelije kod većih struja. Najmanje snage izgubilo bi se spajanjem zaobilazne diode paralelno sa svakom ćelijom, ali to nije ekonomski povoljno. Najčešće se dodaje jedna zaobilazna dioda po modulu radi zaštite FN niza ili se doda nekoliko dioda unutar samog modula. Zaobilaznom diodom kroz koju teče struja i koja u stanju vođenja ima na sebi tek oko 0,6 V te se tako sprječava razarajući reverzni napon na zasjenjenoj ćeliji. Kroz zasjenjenu ćeliju teče vrlo mala (zanemariva) struja , ćelija se ne zagrijava i nema opasnosti od proboja ili oštećenja. Zbog zasjenjenja dolazi do smanjenja proizvedene energije (slika 2.12.). [8]

Zaobilazne diode omogućuju struji zaobilaženje neispravnih ili zasjenjenih modula unutar niza poboljšavajući rad cijelog niza. Kad postoji više nizova FN modula koji su spojeni u paralelu, sličan problem može se dogoditi kada cijeli niz ne radi ispravno. Iz toga razloga na početku svakog niza dodaju se blokirajuće diode, te se tako sprečava protok struje kroz neispravni niz modula. [16]



Slika 2.13. Utjecaj zaobilazne diode na *I-U* karakteristiku [4]



Slika 2.14. Način spajanja blokirajućih dioda [16]

3. KORIŠTENE TEHNOLOGIJE

3.1 Monokristalni silicij

Mjerenja su obavljena s FN modulom BMO – 250 tvrtke BISOL. Modul je dimenzija 1,649 mm×991 mm× 40 mm odnosno površine 1,4045 m^2, težine 18,5 kg. Modul se sastoji od 60 serijski povezanih monokristalnih ćelija (156 mm × 156 mm). Sadrži 3 zaobilazne diode. Okvir je građen od anodiziranog aluminija s rupama za odvodnju. Staklo (kaljeno) je visoko transparentno, ima nizak sadržaj željeza i debljine 3,2 mm.

Modul je postavljen pod kutom od 7°.

Električna svojstva prikazana su u tablici 3.1. pri STC uvjetima (G=1000 W/m^2, T=25 °C). [9]

Tablica 3.1. Električna svojstva pri STC (*Standard Test Conditions*) uvjetima [9]

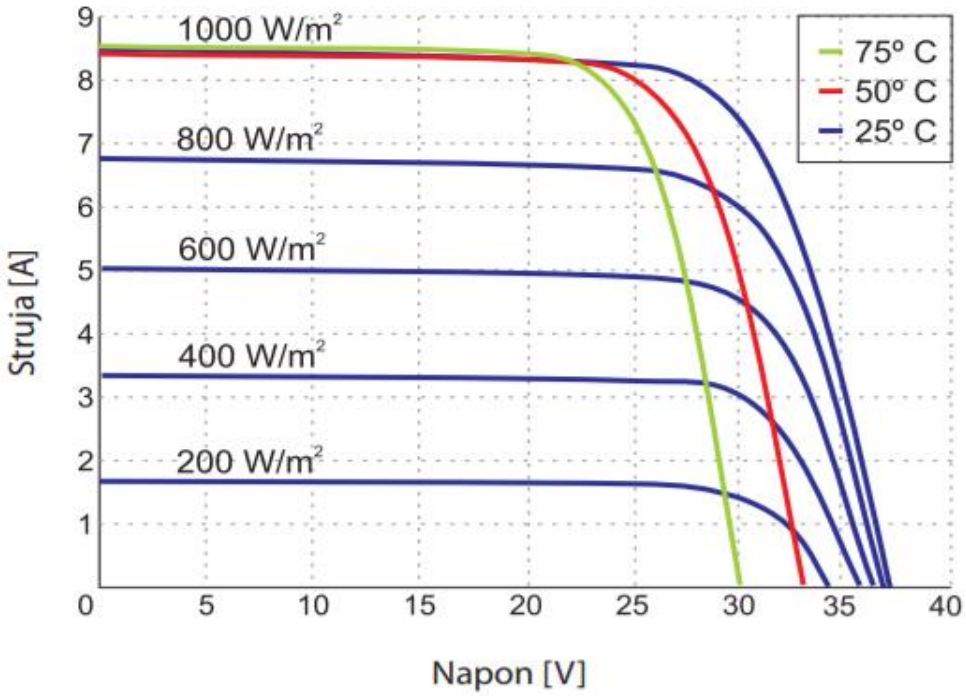
Vršna snaga P_{MPPT}	250 W
Struja kratkog spoja I_{SC} (I_{KS})	8,80 A
Napon praznog hoda U_{OC}	37,90 V
Struja vršne snage I_{MPPT}	8,20 A
Napon vršne snage U_{MPPT}	30,50 V
Učinkovitost pretvorbe ćelije η_C	17,40 %
Učinkovitost pretvorbe modula η_M	15,30 %
Odstupanje izlazne snage	0/+5 W
Najviša reverzibilna struja	13A
Maksimalni napon sustava	1000 V (razred A)

Tablica 3.2. Električna svojstva pri NOCT (Normal Operating Cell Temperature- G= 800 W/m2, T= 44 °C) [9]

Vršna snaga P_{MPPT}	185 W
Struja kratkog spoja I_{SC} (I_{KS})	7,12 A
Napon praznog hoda U_{OC} (U_{PH})	34,6 V
Struja vršne snage I_{MPPT}	6,67 A
Napon vršne snage U_{MPPT}	27,8 V

Tablica 3.3. Temperaturna svojstva [9]

Temperaturni koeficijent struje α	+4,50 mA/°C
Temperaturni koeficijent napona β	-132mV/°C
Temperaturni koeficijent snage γ	-0,35 mW/°C
NOCT	44 °C
Raspon temperatura	-40 °C do +85 °C



Slika 3.1. *I-U* karakteristika modula BMO 250 pri različitim intenzitetima svjetla i temperaturi [9]

3.2 Polikristalni silicij

Drugi set mjerenja obavljen je polikristalnim fotonaponskim modulom BMU 250 tvrtke Bisol. Modul je postavljen pod istim kutom i iste je površine kao prethodni modul. Također ima i sva mehanička svojstva jednaka modulu BMO 250 (dimenzije, težinu, broj ćelija, način spajanja ćelija itd.). Električna svojstva prikazana su tablicom 3.4.

Tablica 3.4. Električna svojstva modula BMU – 250 pri STC uvjetima [10]

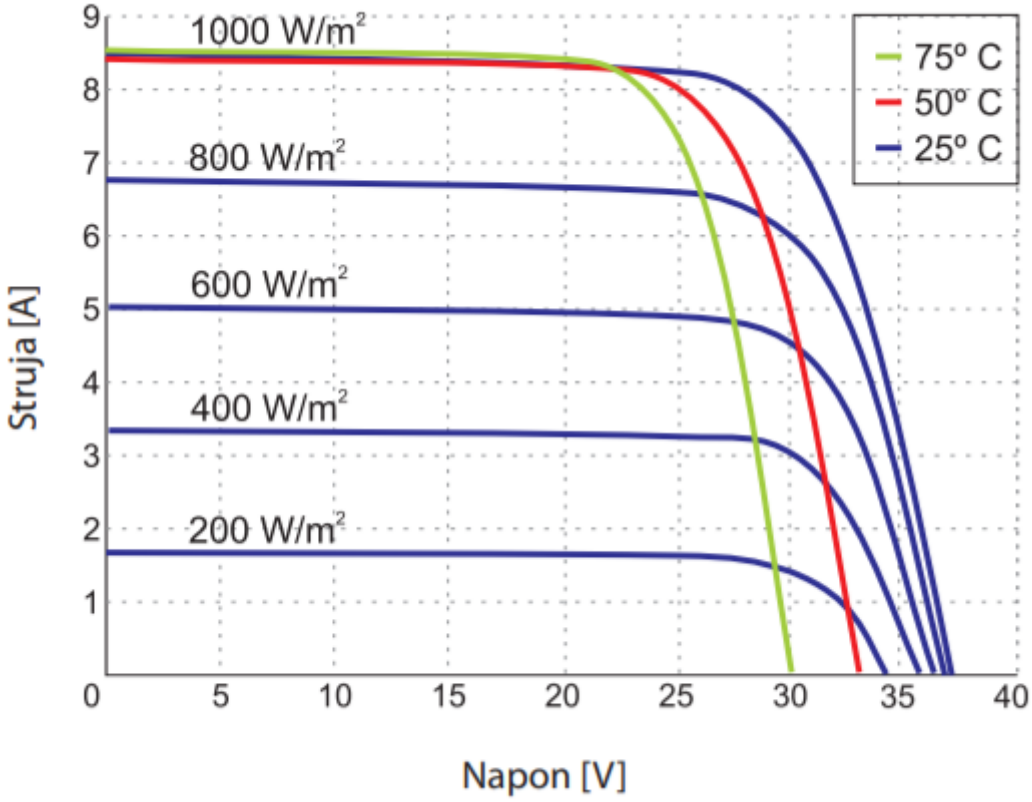
Vršna snaga P_{MPP}	250 W
Struja kratkog spoja I_{KS}	8,75 A
Napon praznog hoda U_{PH}	38,4 V
Struja vršne snage I_{MPP}	8,25 A
Napon vršne snage U_{MPP}	30,3 V
Učinkovitost pretvorbe ćelije η_C	17,10 %
Učinkovitost pretvorbe modula η_M	15,30 %
Odstupanje izlazne snage	0/+5 W
Najviša reverzibilna struja	13A
Maksimalni napon sustava	1000 V (razred A)

Tablica 3.5. Električna svojstva pri NOCT uvjetima [10]

Vršna snaga P_{MPP}	185 W
Struja kratkog spoja I_{SC} (I_{KS})	7,08 A
Napon praznog hoda U_{OC} (U_{PH})	35,1 V
Struja vršne snage I_{MPP}	6,68 A
Napon vršne snage U_{MPP}	27,7 V

Tablica 3.6. Temperaturna svojstva modula BMU 250 [10]

Temperaturni koeficijent struje α	+4,90 mA/°C
Temperaturni koeficijent napona β	-121mV/°C
Temperaturni koeficijent snage γ	-0,40 mW/°C
NOCT	44 °C
Raspon temperatura	-40 °C do +85 °C

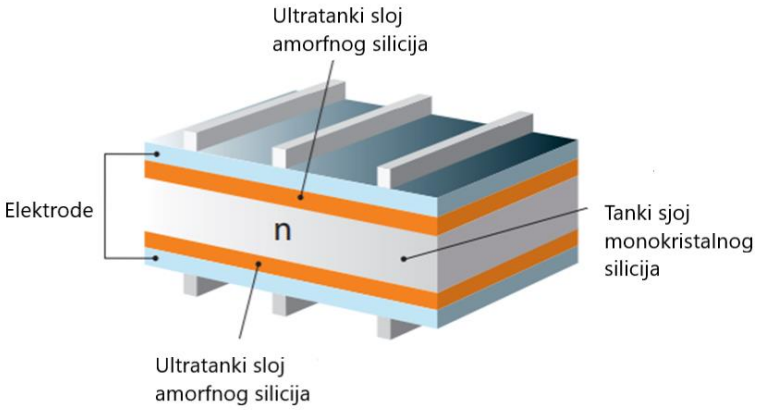


Slika 3.2. I–U karakteristika BMU modula pri različitim intenzitetima svjetla i temperaturama [10]

3.3 Visokoučinkoviti silicij

Zadnja tehnologija s kojom su obavljena mjerenja je HIT 240 (*engl. Heterojunction with Intrinsic Thin layer*) tehnologija tvrtke Panasonic . Ćelija je građena od tanke ploče monokristalnog silicija koji je obložen ultra tankim slojem amorfnog silicija (slika 3.3.).

Dimenzije modula se razlikuju od prethodnih. Površina modula je 1,107 m^2. Kut nagiba ploče je 7° kao i kod prethodnih modula. Masa modula je 15 kg. Sastoji se od 72 ćelije (127×127 mm). Obloženo kaljeno staklo i materijal okvira je crni anodizirani aluminij. [11]



Slika 3.3. Struktura HIT ćelije [11]

Tablica 3.7. Električna svojstva HIT modula pri STC uvjetima [11]

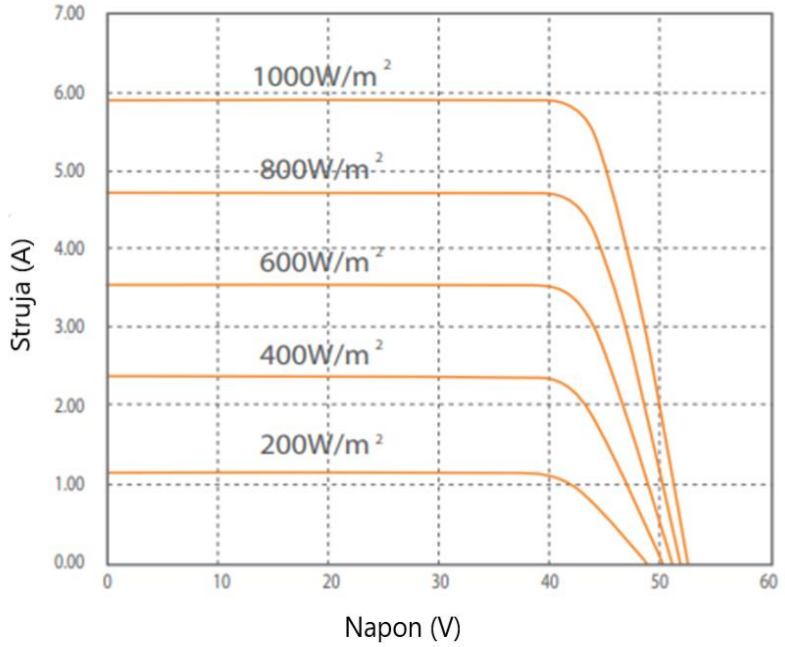
Vršna snaga P_{MPP}	240 W
Struja kratkog spoja I_{KS}	5,85 A
Napon praznog hoda U_{PH}	52,4 V
Struja vršne snage I_{MPP}	5,51 A
Napon vršne snage U_{MPP}	43,7 V
Učinkovitost pretvorbe ćelije η_C	21,6 %
Učinkovitost pretvorbe modula η_M	19 %
Odstupanje izlazne snage	+10/-5 W
Najviša reverzibilna struja	15A
Maksimalni napon sustava	1000 V

Tablica 3.8. Električna svojstva pri NOCT uvjetima [11]

Vršna snaga P_{MPP}	182 W
Struja kratkog spoja I_{KS}	4,71 A
Napon praznog hoda U_{PH}	49,4 V
Struja vršne snage I_{MPP}	4,44 A
Napon vršne snage U_{MPP}	41,1 V

Tablica 3.9. Temperaturna svojstva HIT modula [11]

Temperaturni koeficijent struje α	+1,76 mA/°C
Temperaturni koeficijent napona β	-131 mV/°C
Temperaturni koeficijent snage γ	-0,30 mW/°C
NOCT	44 °C



Slika 3.4. *I-U* karakteristika HIT modula za različite intenzitete sunčevog zračenja [11]

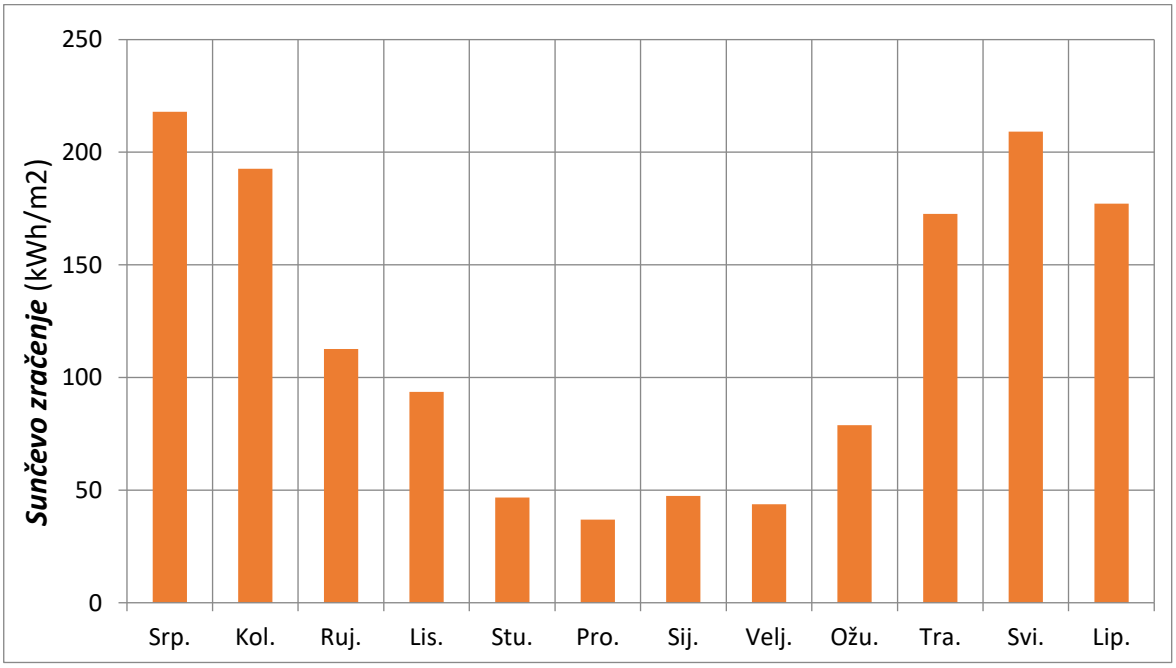
4. MJERENJA

Analiza performansi različitih FN tehnologija zahtjeva istovremeno i kontinuirano mjerenje električnih i vremenskih podataka u stvarnom vremenu. Oprema s kojom je obavljeno ovo mjerenje nalazi se u Laboratoriju obnovljivih izvora energije na Fakultetu elektrotehnike, računalstva i informacijskih tehnologija (FERIT) Osijek, Hrvatska. Osijek se nalazi na geografskoj širini od 45°33′24″N i geografskoj dužini 18°41′44″E. [12]

Vremenski period prikupljanja podataka je jedna godina (365 dana). Godišnja mjerenja su obavljena za 3 tehnologije (navedene u prethodnom poglavlju). Moduli su postavljeni pod kutom od sedam stupnjeva.

Podaci su se prikupljali svaki dan počevši 1. srpnja 2017. godine do 30. lipnja 2018. godine. U zimskim danima dnevno je prikupljano od 400 do 600 uzoraka, a u ljetnim i do 1100 uzoraka ovisno o duljini dana. Podaci o struji, naponu, temperaturi i učinkovitosti su prosječne dnevne odnosno mjesečne vrijednosti, dok su intenzitet sunčevog zračenja (G) i proizvedena električna energija suma uzoraka određenog perioda.

4.1 Meteorološki podaci



Slika 4.1. Energija sunčevog zračenja po mjesecima

Slika 4.1. prikazuje iznos globalnog sunčevog zračenja za određeni mjesec. Dnevno sunčevo zračenje dobije se iz izraza (4-1).

$$H = \sum_{i=1}^{n} G_i \cdot t_i \tag{4-1}$$

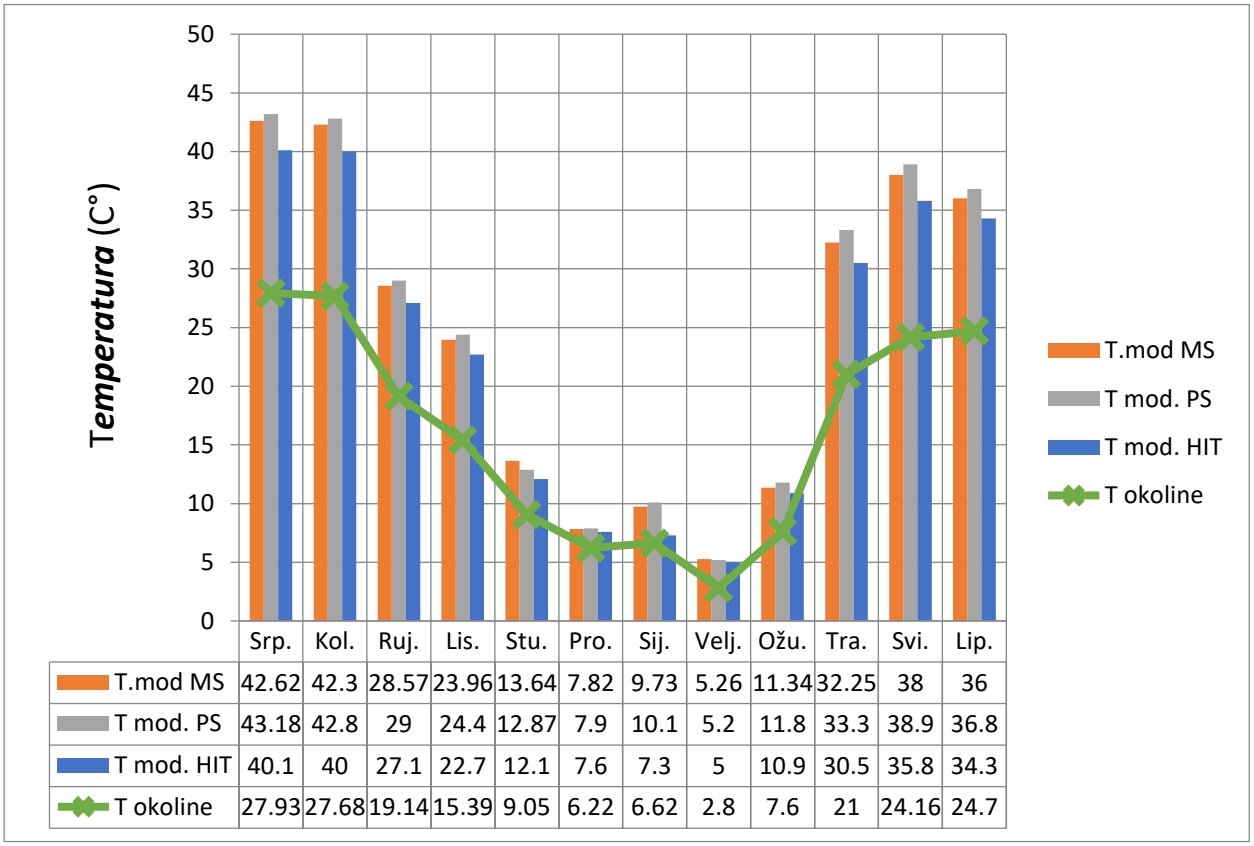
Gdje je:

G_i- intenzitet (snaga) sunčevog zračenja (W/m^2)

t_i - vremenski interval

4.2 Temperatura modula i okoline

Iz *I-U* karakteristika prethodnih poglavlja može se zaključiti da FN ćelije odnosno njihova učinkovitost i proizvedena električna energija ovise o temperaturi. Najveću temperaturu postiže modul polikristalnog silicija, a HIT ima najmanju temperaturu od promatranih.



	Srp.	Kol.	Ruj.	Lis.	Stu.	Pro.	Sij.	Velj.	Ožu.	Tra.	Svi.	Lip.
T.mod MS	42.62	42.3	28.57	23.96	13.64	7.82	9.73	5.26	11.34	32.25	38	36
T mod. PS	43.18	42.8	29	24.4	12.87	7.9	10.1	5.2	11.8	33.3	38.9	36.8
T mod. HIT	40.1	40	27.1	22.7	12.1	7.6	7.3	5	10.9	30.5	35.8	34.3
T okoline	27.93	27.68	19.14	15.39	9.05	6.22	6.62	2.8	7.6	21	24.16	24.7

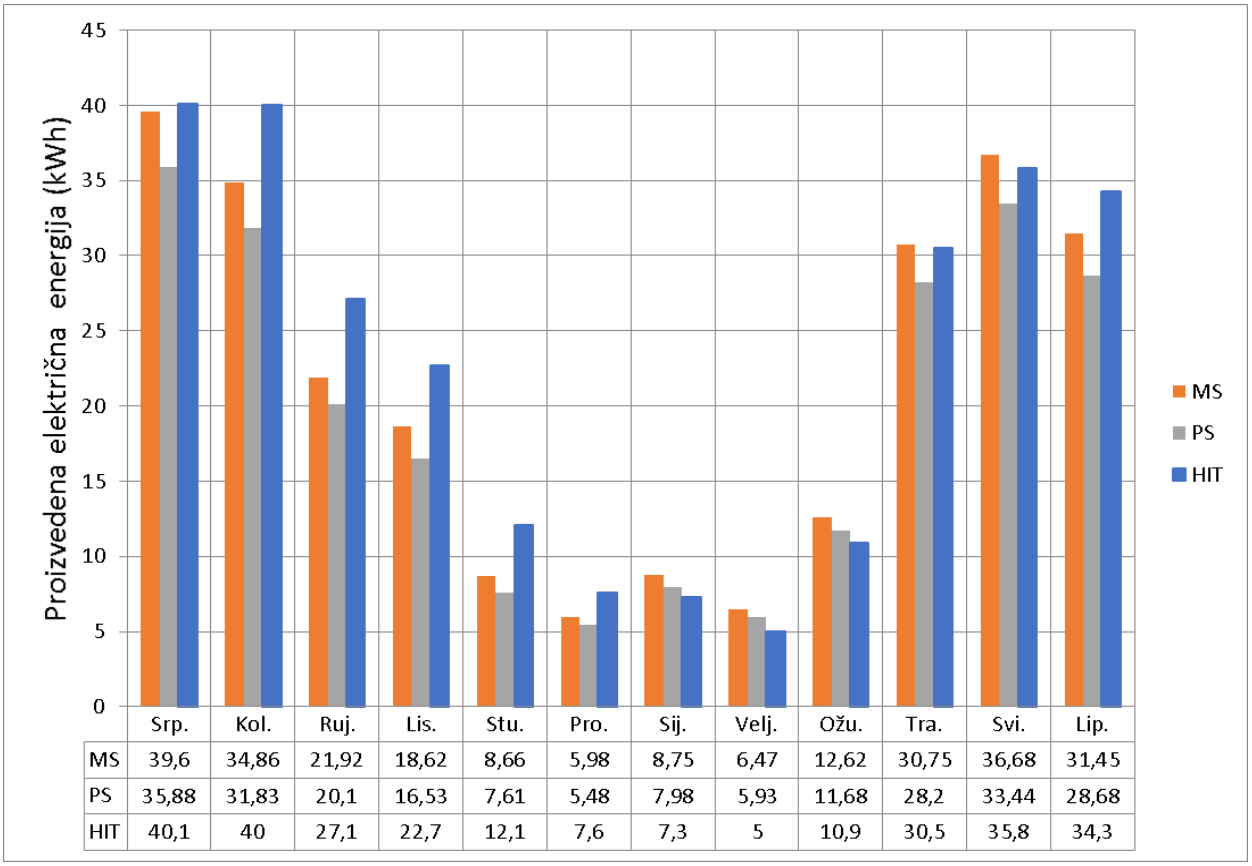
Slika 4.2. Mjesečne temperature modula i okoline

4.3. Proizvedena električna energija i učinkovitost

Kao što se i pretpostavilo sve tri tehnologije proizvode najvišu količinu energije u ljetnim mjesecima (slika 4.3.). Monokristalna tehnologija u usporedbi s polikristalnom svaki mjesec ima veću proizvedenu energiju (oko 10%).

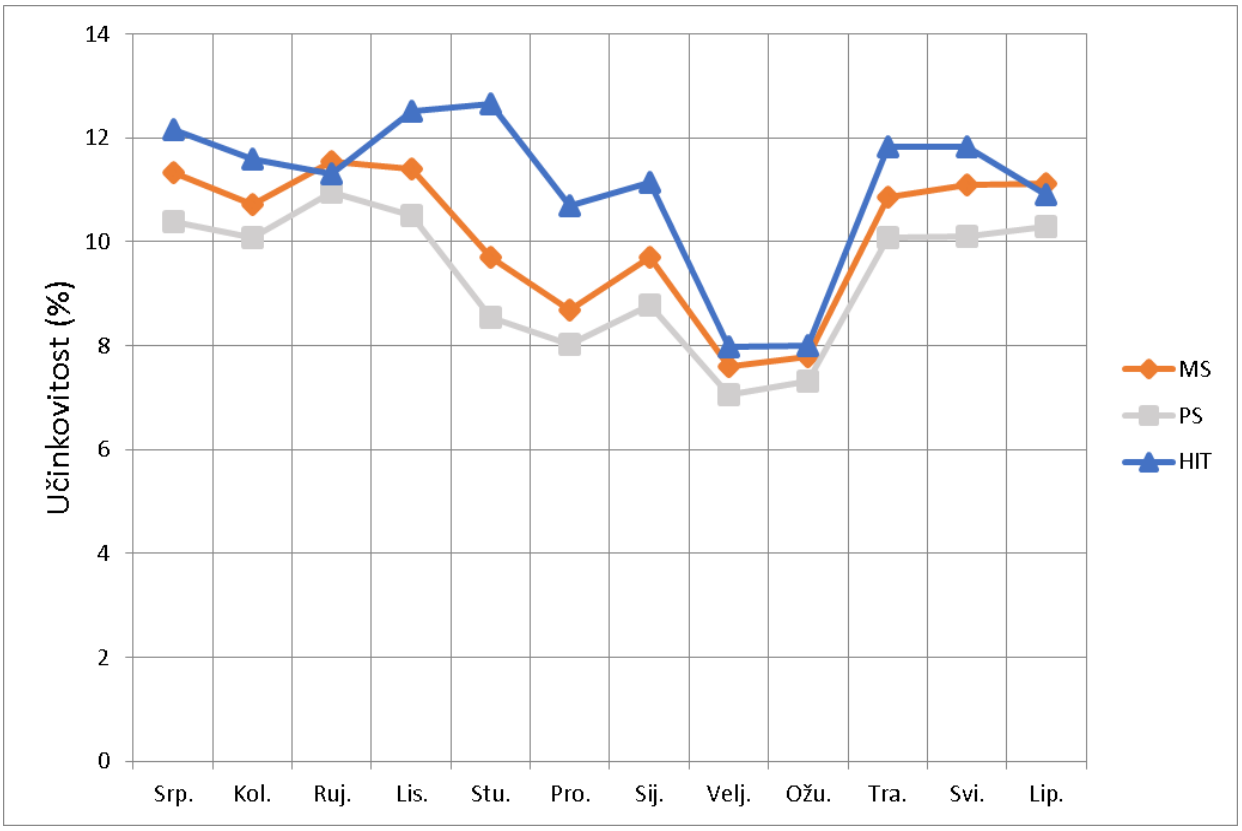
Uspoređujući pojedine mjesečne proizvodnje može se zaključiti da HIT tehnologija proizvodi najveću količinu energije u ljetnim i jesenskim mjesecima(15-20% više od MS). U zimskim mjesecima ona je niža od MS i PS tehnologije (siječanj, veljača, ožujak).

Treba i napomenuti da je površina HIT modula (1,1 m^2) manja od druga dva modula (1,4 m^2). To znači da bi razlika u proizvodnji bila još i veća [9, 11].



	Srp.	Kol.	Ruj.	Lis.	Stu.	Pro.	Sij.	Velj.	Ožu.	Tra.	Svi.	Lip.
MS	39,6	34,86	21,92	18,62	8,66	5,98	8,75	6,47	12,62	30,75	36,68	31,45
PS	35,88	31,83	20,1	16,53	7,61	5,48	7,98	5,93	11,68	28,2	33,44	28,68
HIT	40,1	40	27,1	22,7	12,1	7,6	7,3	5	10,9	30,5	35,8	34,3

Slika 4.3. Mjesečna proizvedena električna energija pojedinog modula



Slika 4.4. Učinkovitost modula

Iz tehničkih specifikacija može se naći podatak o učinkovitosti FN modula. Učinkovitost MS i PS je oko 15%, a HIT tehnologije 19 %. [9,10,11]

Na slici 4.4. može se vidjeti učinkovitost pojedinih modula po mjesecima. Krivulje učinkovitosti sva tri modula mijenjaju se gotovo isto to jest imaju isti trend. HIT tehnologija malo odstupa od druge dvije. U studenom i prosincu učinkovitost joj raste dok kod druge dvije pada. Najveća učinkovitost kod MS i PS je u rujnu, dok je kod HIT modula najveća u studenom. MS u usporedbi s PS svakog mjeseca ima učinkovitost veću za oko 1%.

5. OBRADA PODATAKA

5.1. Proračun prema normi IEC 61724-3

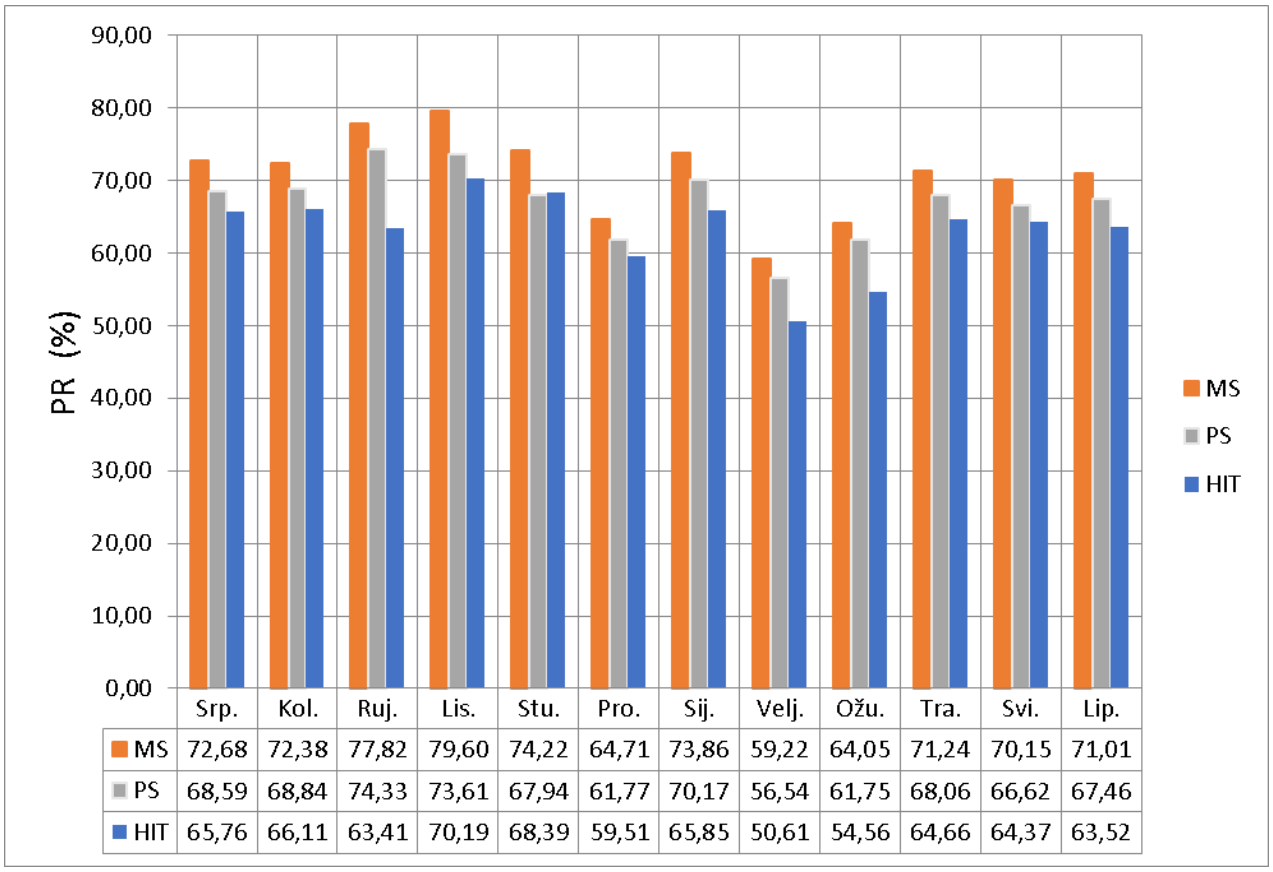
Da bi se obavila analiza performansi prema normi potrebno je izračunati PR (*engl. performance ratio*) i CF (*engl. capacity factor*). Ne postoji hrvatski prijevod za PR. Prema normi PR se računa prema 5-1.

U brojniku nalazi se omjer proizvedene električne energije E_{IZL} (kWh) i nazivne snage modula P_0 (kW). Rezultat omjera daje vrijeme u satima za koje bi modul dao izlaznu energiju E_{IZL} pri STC uvjetima.

U nazivniku se nalazi omjer energije sunčevog zračenja H (kWh/m^2) i ispitnog solarnog zračenja G (najčešće 1 kW/m^2). Omjer je povezan s lokacijom, kutom nagiba itd. Reprezentativan je za određeno područje, rezultat je također u satima. [1]

$$PR = \frac{\frac{E_{IZL}}{P_0}}{\frac{H}{G}} \left(\frac{\frac{kWh}{kW}}{\frac{\frac{kWh}{m^2}}{\frac{kW}{m^2}}} = \frac{h}{h} = 1 \right) \tag{5-1}$$

PR je na slici 5.1. prikazan u postocima. Iz slike može se vidjeti da je PR veći u ljetnim i jesenskim mjesecima, a manji u zimskim. Modul s monokristalnim silicijem u svim mjesecima ima najveći PR. HIT modul ima najmanji PR u svim mjesecima osim za mjesec studeni.



	Srp.	Kol.	Ruj.	Lis.	Stu.	Pro.	Sij.	Velj.	Ožu.	Tra.	Svi.	Lip.
MS	72,68	72,38	77,82	79,60	74,22	64,71	73,86	59,22	64,05	71,24	70,15	71,01
PS	68,59	68,84	74,33	73,61	67,94	61,77	70,17	56,54	61,75	68,06	66,62	67,46
HIT	65,76	66,11	63,41	70,19	68,39	59,51	65,85	50,61	54,56	64,66	64,37	63,52

Slika 5.1. PR fotonaponskih modula u postocima

CF (*engl. capacity factor*) ili faktor iskorištenja vršne snage predstavlja omjer stvarne proizvedene električne energije i električne energije koja bi se proizvela za određeni period (mjesec dana) ukoliko bi proizvodnja bila maksimalna (pri nazivnoj snazi). [1]

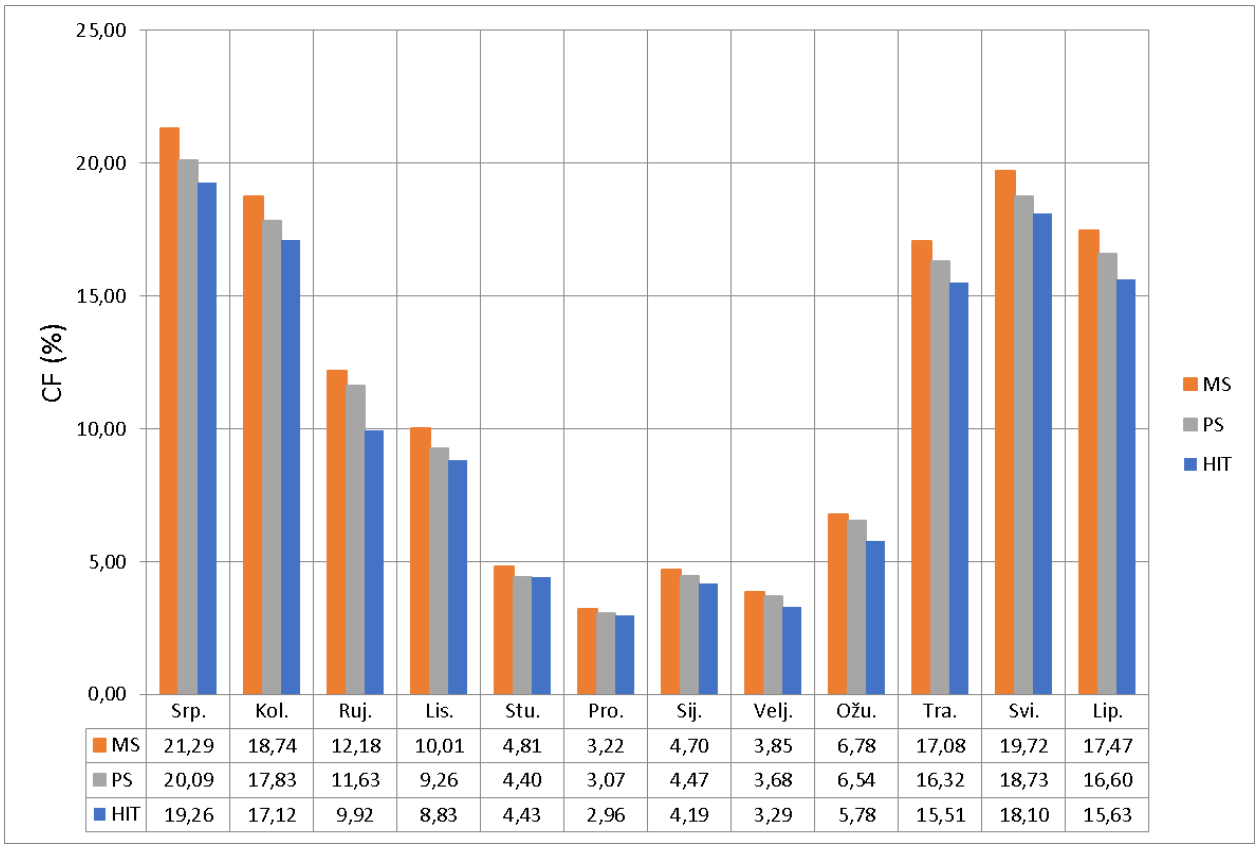
$$CF = 100 \cdot \frac{E_{IZL}}{P_0 \cdot 24 \cdot n} \ (\%) \tag{5-2}$$

Gdje je:

E_{IZL} proizvedena električna energija (kWh),

P_0 nazivna snaga modula (kW),

n broj dana u mjesecu.



	Srp.	Kol.	Ruj.	Lis.	Stu.	Pro.	Sij.	Velj.	Ožu.	Tra.	Svi.	Lip.
MS	21,29	18,74	12,18	10,01	4,81	3,22	4,70	3,85	6,78	17,08	19,72	17,47
PS	20,09	17,83	11,63	9,26	4,40	3,07	4,47	3,68	6,54	16,32	18,73	16,60
HIT	19,26	17,12	9,92	8,83	4,43	2,96	4,19	3,29	5,78	15,51	18,10	15,63

Slika 5.2. Dijagram faktora iskorištenja vršne snage pojedinih modula

Faktor iskorištenja vršne snage (CF) u postocima prikazan je na slici 20. CF najveći je u ljetnim mjesecima. Očita je razlika u postocima faktora iskorištenja u zimskim (3 do 4 %) i ljetnim mjesecima (18 do 21 %). Modul monokristalnog silicija ima najveći CF. Trend faktora iskorištenja mijenja se slično kao i PR.

5.2. Empirijska analiza FN modula

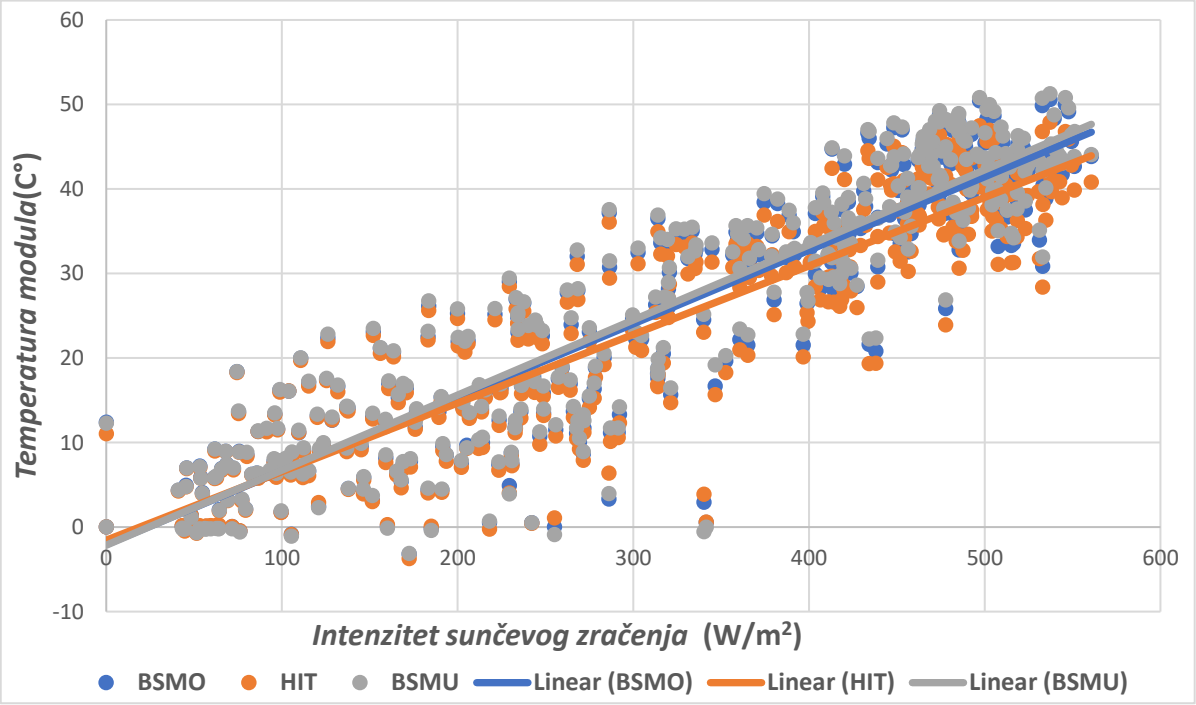
U ovom poglavlju biti će obavljena empirijska analiza meteoroloških i električnih podataka prikupljenih u vremenskom periodu od jedne godine. Svaka točka na slikama u nastavku predstavlja prosječnu dnevnu vrijednost.

Iz slika 5.3. i 5.4. može se vidjeti ovisnost temperature modula o intenzitetu zračenja i temperaturi okoline. Izmjeren je i koeficijent determinacije R^2. To je podatak koji nam govori koliko se dobro točke na grafu podudaraju s iscrtanim pravcem [13]. Iznosi koeficijenta determinacije prikazani su u tablici 5.5. Zbog vrlo visokog postotka koeficijenta determinacije može se pretpostavit

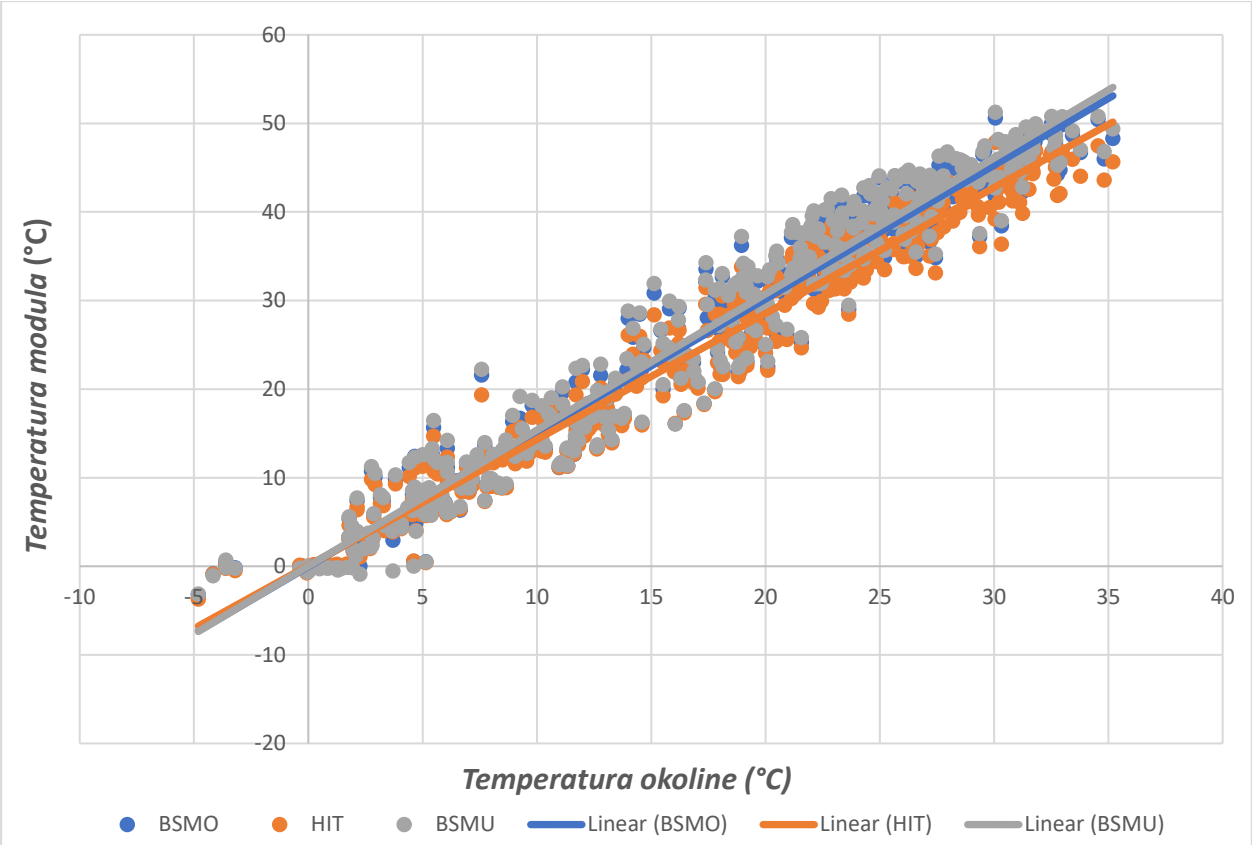
linearna ovisnost promatranih parametara. Temperatura modula linearno raste ili pada s promjenom temperature okoline i intenziteta zračenja.

Tablica 5.1. Koeficijenti determinacije za linearne ovisnosti

Tehnologije	BMO	BMU	HIT
R^2 (slika 5.3)	0,82	0,824	0,809
R^2 (slika 5.4)	0,952	0,959	0,951
R^2 (slika 5.5)	0,973	0,939	0,936
R^2 (slika 5.7)	0,931	0,928	0,929



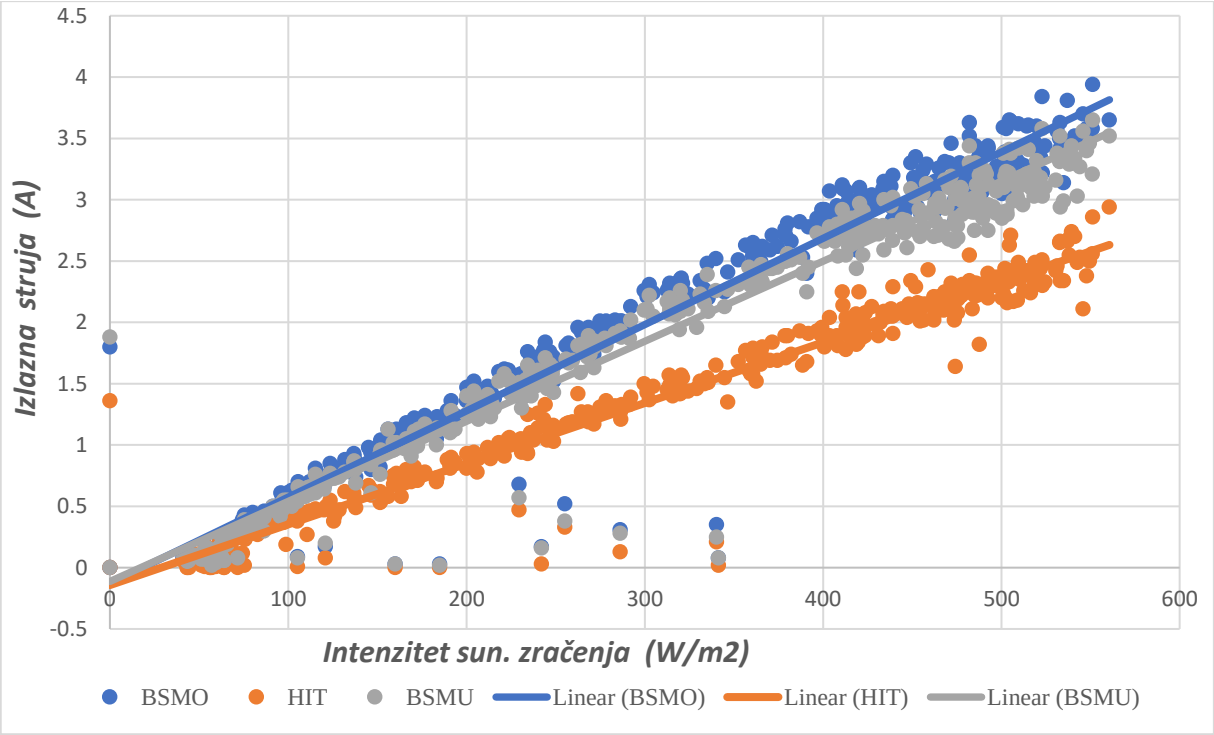
Slika 5.3. Ovisnost temperature modula o intenzitetu sunčevog zračenja



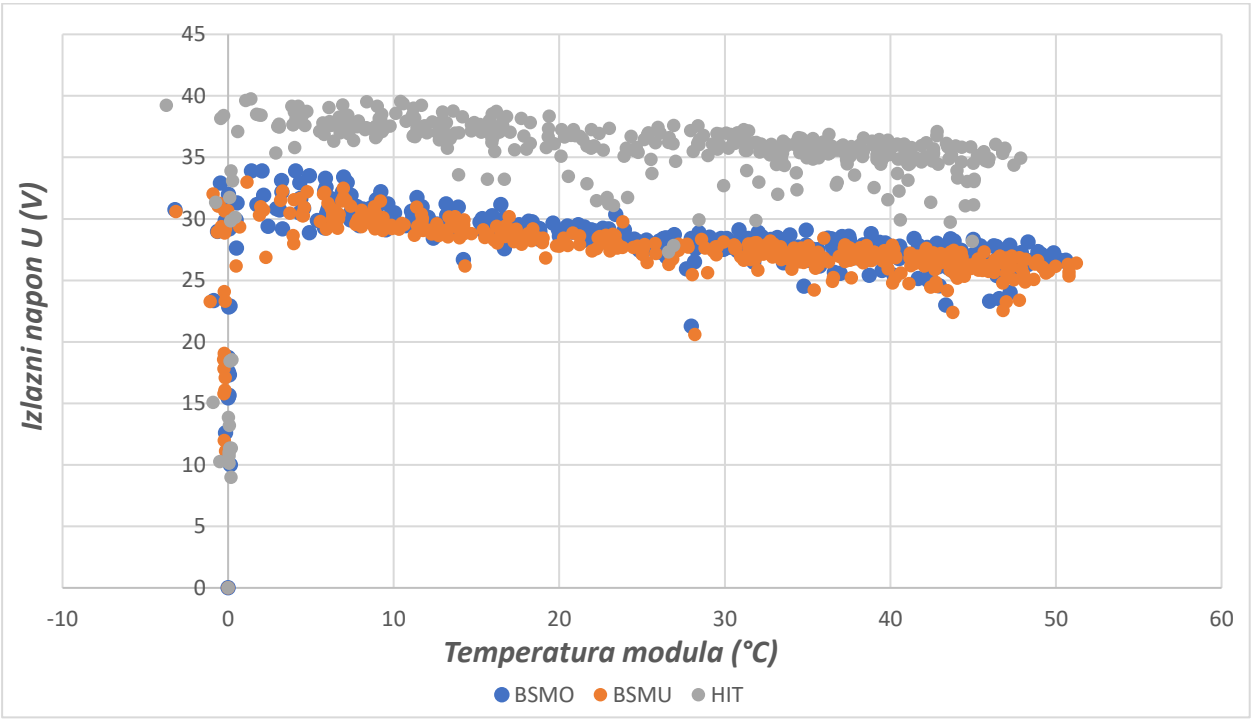
Slika 5.4. Ovisnost temperature modula o temperaturi okoline

Slika 5.5. prikazuje ovisnost izlazne struje modula o intenzitetu sunčevog zračenja. Koeficijent determinacije je vrlo visok (oko 94%u sva tri slučaja) pa se može pretpostavit linearna ovisnost među njima.

Iz slike 5.6. može se vidjeti da se s povećanjem temperature izlazni napon smanjuje. Što odgovara teorijskoj pretpostavci (negativni temperaturni koeficijent napona). Ovisnost se ne mijenja linearno.

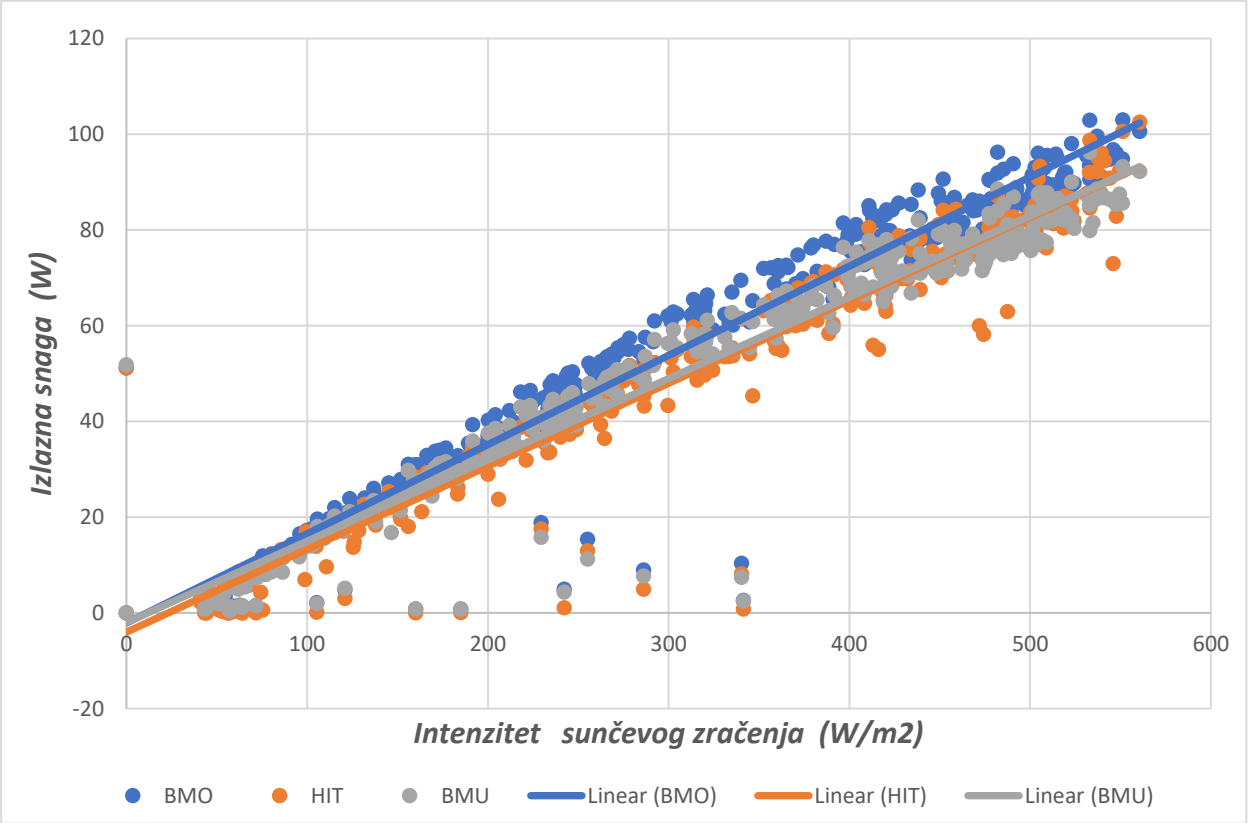


Slika 5.5. Ovisnost izlazne struje o intenzitetu zračenja



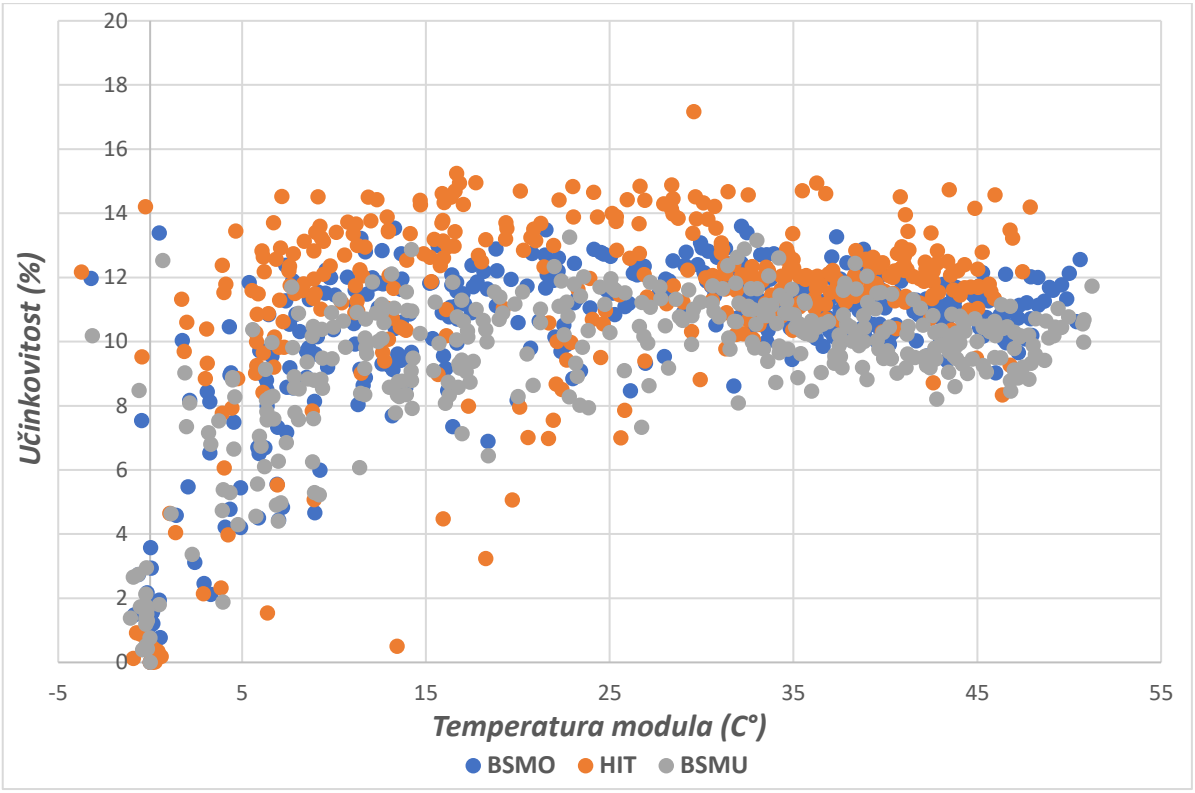
Slika 5.6. Ovisnost izlaznog napona o temperaturi modula

Na slici 5.7. prikazana je ovisnost izlazne snage modula o snazi (intenzitetu) sunčevog zračenja. Ovisnost je linearna što se može i zaključiti iz koeficijenta determinacije koji iznosi oko 93% u sva tri slučaja.

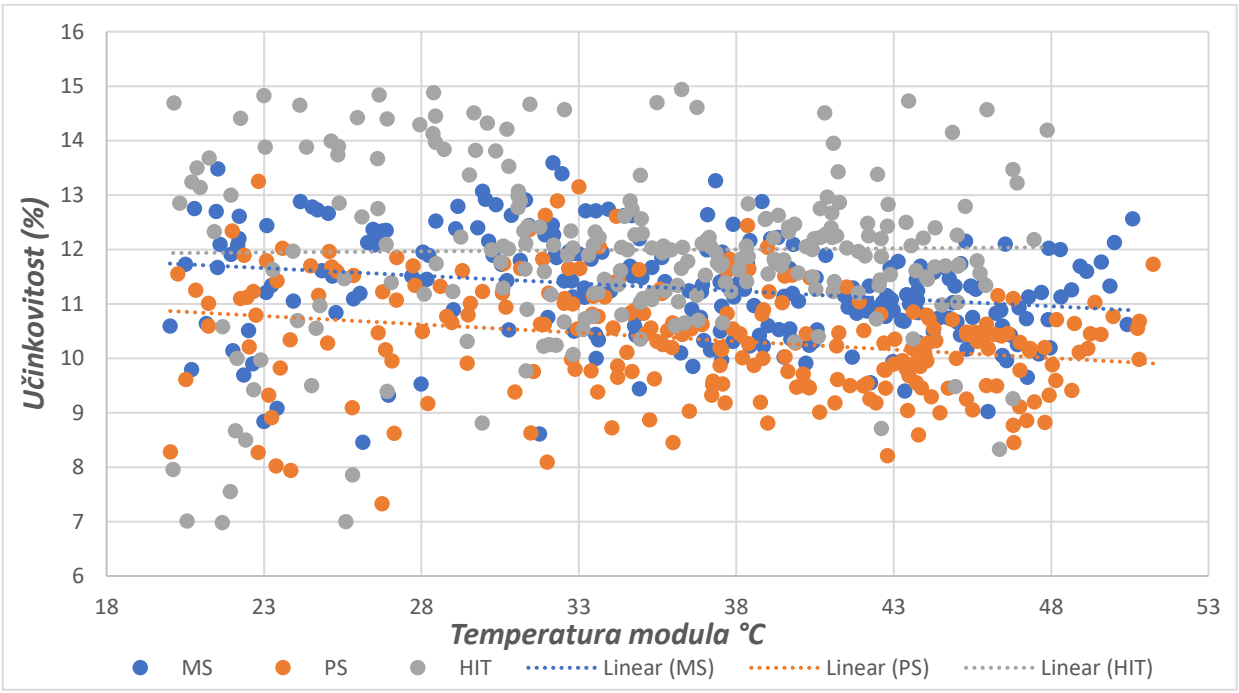


Slika 5.7. Ovisnost snage sunčevog zračenja o izlaznoj snazi

Slika 5.8. prikazuje ovisnost učinkovitosti o temperaturi modula. Može se primijetiti da je pri nižim temperaturama modula, što odgovara hladnijim i oblačnijim danima učinkovitost niža. Zbog daljnje analize izbačeni su podaci o učinkovitosti za temperature manje od 20 °C (slika 5.9).



Slika 5.8. Ovisnost učinkovitosti o temperaturi modula



Slika 5.9. Ovisnost učinkovitosti modula o temperaturi modula s odbačenim mjerenjima pri niskim temperaturama

Može se primijetiti određena linearnost između promatranih parametara. S povećanjem temperature modula smanjuje se učinkovitost. Kod monokristalne i polikristalne tehnologije temperaturni koeficijent učinkovitosti pada za oko 0,03 %/°C. Kod HIT tehnologije pravac gotovo i nema nagib to jest učinkovitost mu se vrlo malo mijenja s promjenom temperature (ε =0,0038).

Tablica 5.3. Vrijednosti temperaturnih koeficijenata učinkovitosti

PV tehnologija	δ	ε (%/°C)
m-Si	12,3	-0,028
p- Si	11,49	-0,0308
HIT	11,86	-0,0038

Koeficijenti δ i ε dobiveni su iz jednadžbi pravaca sa slike 5.9. Koeficijent δ je odsječak na y-osi (učinkovitost), a koeficijent ε je nagib pravca. ε prikazuje koliko se smanjuje učinkovitost s povećanjem temperature od 1 °C.

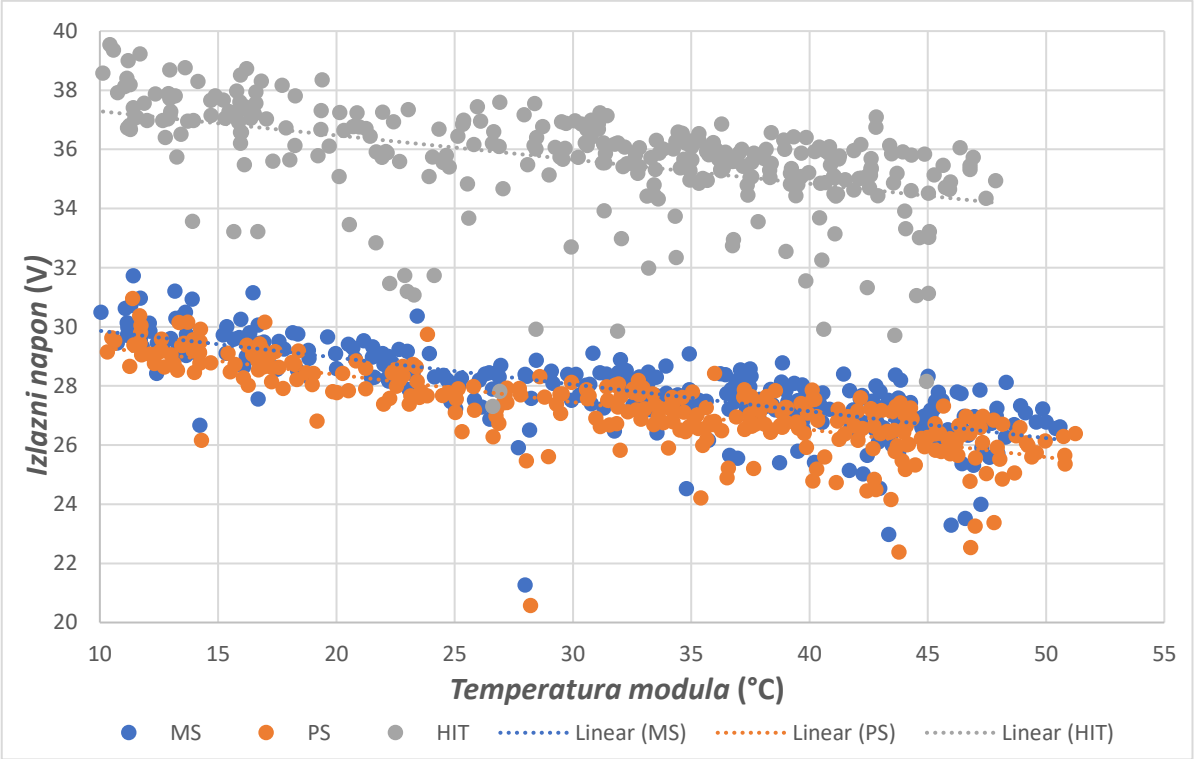
Formula pomoću koje se računa učinkovitost FN modula pri različitim temperaturama glasi:

$$\eta = \eta_{STC} \cdot [\delta - \varepsilon \cdot (T_{MOD} - 25)] \quad (5\text{-}3)$$

Gdje je:

- η učinkovitost modula
- η_{STC} učinkovitost modula pri standardnim testnim uvjetima (STC)
- δ odsječak na y osi
- ε temperaturni koeficijent učinkovitosti
- T_{MOD} temperatura modula

Slika 5.10. prikazuje ovisnost izlaznog napona o temperaturi modula s izbačenim mjerenjima pri temperaturama manjim od 10 °C. Pri nižim temperaturama ovisnost je vrlo nelinearna.



Slika 5.10. Ovisnost izlaznog napona o temperaturi s izbačenim mjerenjima pri niskim temperaturama

Tablica 5.2. Usporedba strujnih i naponskih temperaturnih koeficijenata dobivenih empirijskom analizom sa zadanim koeficijentima proizvođača

PV tehnologija	$\alpha_{IZMJ.}$ (mA/°C)	$\alpha_{PROIZ.}$ (mA/°C)	$\beta_{IZMJ.}$ (mV/°C)	$\beta_{PROIZ.}$ (mV/°C)
m-Si	7	4,5	-90,7	-135
p- Si	4,9	4,9	-93	-121
HIT	6,5	1,76	-81,8	-131

Koeficijent alfa dobije se iz jednadžbe pravca ovisnosti izlazne struje i intenziteta sunčevog zračenja. U teoriji koeficijent alfa trebao bi se izračunati pomoću struje kratkog spoja, a pošto

nema mjerenja o struji kratkog spoja koristi se I_{MPPT}. Koeficijent beta dobije se iz jednadžbe pravca ovisnosti napona o temperaturi modula. Kao i kod struje kratkog spoja, u teoriji trebao bi se koristit napon praznog hoda za kojeg također nemamo mjerenja pa se koristi U_{MPPT}.

Kao što je i očekivano, temperaturni koeficijenti struje (α) su pozitivni, a koeficijenti napona (β) negativni. Za sve tri tehnologije naponski temperaturni koeficijenti manji su od koeficijenata koje su dali proizvođači. Kod modula od polikristalnog silicija strujni temp. koeficijent je jednak teorijskom. Velika razlika α koeficijenta je kod HIT tehnologije. Struja bi trebala rasti za 1,76 mA s povećanjem temperature od 1°C dok se iz dobivenih mjerenja vidi da raste za 6,5 mA/°C.

6. ZAKLJUČAK

Ovaj rad analizira performanse tri FN modula različitih tehnologija. Prvi ispitivani modul napravljen je od monokristalnog silicija. Monokristalni silicij ima pravilno građenu kristalnu rešetku te zbog toga ima veću učinkovitost od drugog ispitivanog modula koji je građen od polikristalnog silicija . Treći ispitivani modul je građen od visokoučinkovitog silicija. On se dobiva kombinacijom monokristalanog i amorfnog silicija. Sva tri modula postavljena su pod istim upadnim kutom sunčevih zraka od 7°. To nije optimalni kut za područje u kojem je obavljeno mjerenje, ali je postavljeno u istraživačke svrhe.

Mjerenja su obavljena u vremenskom periodu od godinu dana. Mjerene veličine su: struja, napon, proizvedena električna energija, učinkovitost , temperatura okoline, temperatura modula i intenzitet sunčevog zračenja . Rad je baziran na mjesečnim vrijednostima pojedinih veličina. U prvom djelu rada grafički su prikazane promjene pojedinih izmjerenih veličina (proizvedena el. energija, učinkovitost i temperature) po mjesecima. Kao što se moglo i pretpostaviti najviše električne energije proizvedeno je u ljetnim mjesecima, kao i što je učinkovitost u tim mjesecima najveća. Izuzetak je HIT modul koji je postigao najveću učinkovitost u listopadu i studenom. Temperature modula pratile su temperaturu okoline. Uspoređujući performanse pojedinih modula međusobno, HIT tehnologija daje najbolje rezultate što se moglo i pretpostaviti prije mjerenja . Zatim su prema normi izračunati *performance ratio* (PR) i *capacity factor* (CF). PR nema službeni prijevod na hrvatski jezik, a CF predstavlja faktor iskorištenja vršne snage. Oba faktora su prikazana grafički (u postocima) za svaki mjesec. PR ne oscilira previše, najmanji je u veljači , a najveći u listopadu za sve tri tehnologije. Monokristalni silicij ima najveći *performance ratio,* 3 do 6 % veći od polikristalnog silicija i 7 do 10 % veći od HIT tehnologije.

Gledajući sve tri tehnologije CF je najmanji u zimskim mjesecima, a najveći u ljetnim mjesecima. Monokristalni silicij ima najveći faktor iskorištenja vršne snage, a HIT najmanji.

Zadnji dio rada je empirijska analiza. U empirijskoj analizi koristile su se prosječne dnevne vrijednosti. Izlazna struja linearno ovisi o snazi sunčevog zračenja. Temperatura modula također linearno ovisi o snazi sunčevog zračenja te o temperaturi okoline. Izlazni napon modula smanjuje se s povećanjem temperature modula. Iz ovisnosti učinkovitosti o temperaturi modula može se vidjeti da je učinkovitost manja pri manjim temperaturama (oblačni i hladniji dani). Iz grafova pomoću jednadžbi pravaca izračunati su temperaturni koeficijent struje i napona i uspoređeni sa zadanim koeficijentima od strane proizvođača.

Literatura

[1] IEC TS 61724-3 Edition 1.0 2016-07 Photovoltaic system performance – Part 3: Energy evaluation method, 2016

[2] Ljubomir Majnandžić - Fotonaponski sustavi- priručnik, Tehnička škola Ruđera Boškovića u Zagrebu, 2012

[3] Udovičić B, *Energetika*, Školska knjiga, Zagreb, 1993.

[4] Damir Šljivac: "Obnovljivi izvori električne energije", predavanja ETFOS, 2015/16.

[5] SVEUČILIŠTE U ZAGREBU FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA SEMINAR Paneli sunčanih ćelija Ivan Debelec Marko Vraničar Zagreb, siječanj, 2013.

[6] Mario Perić-RAČUNALNA SIMULACIJA RADA FOTONAPONSKOG SUSTAVA, MAGISTARSKI RAD, 2002.

[7] Energija sunca i fotonaponske ćelije - http://e-learning.gornjogradska.eu/energijaekologijaengleski-ucenici/2-energija-sunca-i-fotonaponske-celije/ (pristupio 1.9.2018.)

[8] Osnove o fotonaponskoj ćeliji i fotonaponskom modulu - https://www.schrack.hr/know-how/alternativni-izvori/osnove-o-fn-celiji-i-modulu/ (pristupio 1.9.2018.)

[9] Karakteristike fotonaponskog modula Bisol BMO 250, http://reslab.ferit.hr/BISOL%20Produktna%20specifikacija%20BMO%20HR%20-%20mono.pdf (pristupio 2.9.2018.)

[10] Karakteristike fotonaponskog modula Bisol BMU 250, http://reslab.ferit.hr/BISOL%20Produktna%20specifikacija%20BMU%20HR%20-%20poli.pdf (pristupio 2.9.2018.)

[11] Karakteristike fotonaponskog modula Panasonic HIT N240, http://reslab.ferit.hr/Panasonic_240W_Hybrid_PV_Module_Black_Technical.pdf (pristupio 2.9.2018.)

[12] Geografske koordinate Osijek – zemljopisne dužine i širine, https://mapszoom.com/hr/coordinates.php?town=Osijek (pristupio 2.9.2018.)

[13] Korelacije, HRVOJE KRPAN, SRPANJ 17, 2013 http://www.znanostblog.com/korelacije/ (pristupio 4.9.2018.)

[14] . Matić, Z: Sunčevo zračenje na području Republike Hrvatske – Priručnik za energetsko korištenje Sunčevog zračenja, Zagreb: Energetski institut Hrvoje Požar, 2007.

[15] PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM, http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_download/map_pdfs/G_hor_HR.png (pristupio 10.9. 2018.)

[16] Marijo Radman, SIMULATOR FOTONAPONSKIH PANELA, DIPLOMSKI RAD br. 68, SVEUČILIŠTE U ZAGREBU, FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA, Zagreb, srpanj 2010.

[17] Gilbert M, Renewable and efficient electric power systems, masters, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004.

Sažetak

Cilj rada je analizirati performanse rada tri fotonaponska modula različitih tehnologija na temelju mjerenja prikupljenih u vremenskom periodu od jedne godine prema IEC 61724-3 normi. Mjerenja su prikupljena u laboratoriju obnovljivih izvora energije koji se nalazi na Fakultetu elektrotehnike, računalstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Moduli se razlikuju prema tehnologiji izrade, a to su monokristalni silicij, polikristalni silicij i visokoučinkoviti silicij (HIT). Prikupljeni podaci su obrađeni i prikazani u obliku dijagrama. Prema normi izračunati su faktori PR (performance ratio) i CP (capacity factor) koji su također prikazani dijagramima. Tehnologije su međusobno uspoređene (prednosti, mane, proizvedena električna energija, cijena itd). U završnom dijelu rada obavljena je empirijska analiza mjernih podataka. U njoj su prikazane različite međusobne ovisnosti električnih, temperaturnih i meteoroloških parametara te njihov međusobni utjecaj u obliku dijagrama. Na osnovu dijagrama izvučeni su matematički modeli učinkovitosti u ovisnosti o temperaturi modula.

Ključne riječi: monokristalni silicij, polikristalni silicij, visokoučinkoviti silicij, analiza performansi modula, empirijska analiza

Abstract

The goal of this paper is to analyze the performance of three photovoltaic modules made of different technologies based on measurements collected over a period of one year according to IEC 61724-3 standard. The measurements were collected in the the Laboratory for Renewable Energy Sources of the Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology in Osijek. The modules differ by the technology type, that is monocrystalline silicon, polycrystalline silicon and high performance silicon (HIT). Collected data is processed and displayed in the form of a diagrams. According to the IEC 61724-3 standard, the PR ratio (performance ratio) and CP (capacity factor) of each photovoltaic technology (module) is calculated which are also shown in diagrams. Furthermore, technologies are compared with each other (advantages, disadvantages, electricity producduction, price, etc.). In the final part of the paper and empirical analysis of the measurements is conducted. Empirical analysis compared different relations of electrical, temperature and meteorological parameters and their mutual influence in the form of diagrams. Mathematical model of the efficiency in relation with the module temperature is formed based on empirical analysis diagrams.

Key words: monocrystalline silicon, polycrystalline silicon, high performance silicon, module performance analysis, empirical analysis

Životopis

Karlo Runac rođen 18.10.1994. godine u Osijeku. U Belišću završava „Osnovnu školu Ivana Kukuljevića“ nakon čega upisuje elektrotehničku školu u Valpovu. Po završetku srednjoškolskog obrazovanja upisuje preddiplomski studij elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu Osijek. Na 2. godini studija se opredjeljuje za smjer elektroenergetika. Upisuje diplomski studij energetike na Fakultetu elektrotehnike, računalstva i informacijskih tehnologija u Osijeku i opredjeljuje se za smjer održiva elektroenergetika (DEB).

Tijekom školovanja sudjelovao je na županijskom natjecanju iz Osnova elektrotehnike te na natjecanju iz Crvenog križa u osnovnoj školi.

U Osijeku, rujan 2018. Karlo Runac

Prilozi

Prilog 1. Tablice s mjesečnim mjerenjima:

Tablica 1 . Mjerenja obavljena s BMO modulom

Monokristalni silicij	Struja (A)	Temperatura modula (°C)	Napon (V)	Proizvedena el. energija (kWh)	Učinkovitost (%)
Srpanj	3,26	42,62	26,8	39,6	11,34
Kolovoz	3,04	42,3	26,7	34,86	10,72
Rujan	2,24	28,57	28,2	21,92	11,54
Listopad	2,12	23,96	27,7	18,62	11,4
Studeni	1,11	13,64	30,3	8,66	9,7
Prosinac	0,89	7,82	30,7	5,98	8,68
Siječanj	1,13	9,73	30,5	8,75	9,71
Veljača	0,84	5,26	27,7	6,47	7,59
Ožujak	1,26	11,34	27,1	12,62	7,78
Travanj	2,78	32,25	28	30,75	10,85
Svibanj	3,04	38	27,7	36,68	11,09
Lipanj	2,54	36	27,2	31,45	11,11

Tablica 2. Mjerenja obavljena s BMU modulom

Polikristalni silicij	Struja (A)	Temperatura modula (°C)	Napon (V)	Proizvedena el. energija (kWh)	Učinkovitost (%)
Srpanj	3,07	43,18	25,9	35,88	10,38
Kolovoz	2,85	42,8	25,9	31,83	10,07
Rujan	2,11	29	27,4	20,1	10,96
Listopad	1,93	24,4	27,1	16,53	10,51
Studeni	1	12,87	29,7	7,61	8,54
Prosinac	0,84	7,9	30	5,48	8,02
Siječanj	1,05	10,1	30	7,98	8,78
Veljača	0,79	5,2	27,3	5,93	7,06
Ožujak	1,2	11,8	36,6	11,68	7,31
Travanj	2,61	33,3	24,4	28,2	10,07
Svibanj	2,85	38,9	27,2	33,44	10,1
Lipanj	2,39	36,8	26,7	28,68	10,3

Tablica 3. Mjerenja obavljena s HIT modulom

HIT tehnologija	Struja (A)	Temperatura modula (°C)	Napon (V)	Proizvedena el. energija (kWh)	Učinkovitost (%)
Srpanj	2,26	40,1	34,5	35,83	12,15
Kolovoz	2,12	40	34,4	31,84	11,6
Rujan	1,46	27,1	34,6	17,86	11,3
Listopad	1,42	22,7	35,4	16,42	12,51
Studeni	0,77	12,1	37,7	7,98	12,65
Prosinac	0,62	7,6	37,7	5,5	10,7
Siječanj	0,76	7,3	37,7	7,8	11,14
Veljača	0,55	5	32,33	5,53	7,98
Ožujak	0,81	10,9	31,42	10,75	8
Travanj	1,9	30,5	36	27,91	11,84
Svibanj	2,1	35,8	35,84	33,66	11,82
Lipanj	1,7	34,3	35	28,13	10,91