

# NOVE TEHNOLOGIJE FOTONAPONSKIH MODULA

---

**Funjak, Renato**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*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:200:320881>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-15**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Sveučilišni studij**

**NOVE TEHNOLOGIJE FOTONAPONSKIH MODULA**

**Završni rad**

**Renato Funjak**

**Osijek, 2021.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

Osijek, 15.09.2021.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Prijedlog ocjene završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

<b>Ime i prezime studenta:</b>	Renato Funjak
<b>Studij, smjer:</b>	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>	4508, 23.07.2018.
<b>OIB studenta:</b>	02440300051
<b>Mentor:</b>	Prof.dr.sc. Damir Šljivac
<b>Sumentor:</b>	
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Naslov završnog rada:</b>	Nove tehnologije fotonaponskih modula
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Predložena ocjena završnog rada:</b>	Izvrstan (5)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 1 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
<b>Datum prijedloga ocjene mentora:</b>	15.09.2021.
<b>Datum potvrde ocjene Odbora:</b>	22.09.2021.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

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

Osijek, 23.09.2021.

<b>Ime i prezime studenta:</b>	Renato Funjak
<b>Studij:</b>	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>	4508, 23.07.2018.
<b>Turnitin podudaranje [%]:</b>	12

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Nove tehnologije fotonaponskih modula**

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

i sumentora

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 studenta:

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Zadatak završnog rada .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Učinkovitost FN ćelija i modul .....</b>	<b>2</b>
<b>2.1. Fotonaponska pretvorba .....</b>	<b>2</b>
<b>2.2. Tehnološki pravci fotonaponskih ćelija .....</b>	<b>3</b>
<b>2.3. FN ćelija .....</b>	<b>5</b>
<b>2.4. Učinkovitost fotonaponskih ćelija.....</b>	<b>8</b>
<b>2.5. Fotonaponski modul i niz .....</b>	<b>8</b>
<b>3. Fotonaponska tehnologija.....</b>	<b>11</b>
<b>3.1. Perovskite fotonaponske ćelije .....</b>	<b>16</b>
3.1.1. Upute za istraživanje .....	17
3.1.2. Mjerila i ciljevi .....	21
<b>3.2. Fotonaponska tehnologija s koncentriranim Sunčevim zračenjem(CPV).....</b>	<b>22</b>
<b>4. Usporedba energetske karakteristike različitih tehnologija fotonaponskih modula u Laboratoriju za obnovljive izvore energije.....</b>	<b>30</b>
<b>4.1. Učinkovitost modula .....</b>	<b>30</b>
<b>4.2. Maksimalna snaga modula.....</b>	<b>32</b>
<b>4.3. Struja modula.....</b>	<b>32</b>
<b>4.4. Napon modula .....</b>	<b>33</b>
<b>5. Zaključak .....</b>	<b>34</b>
<b>Literatura .....</b>	<b>36</b>
<b>SAŽETAK.....</b>	<b>37</b>

# 1. UVOD

U današnje vrijeme se sve više razvija fotonaponska tehnologija za proizvodnju električne energije. Cilj je da se sve više počnu koristiti obnovljivi izvori energije, a što manje fosilna goriva i ostali neobnovljivi izvori energije. Korištenjem obnovljivih izvora energije smanjuje se zagađenje zraka i okoliša, te se na taj način dolazi do očuvanja zdravlja ljudi i životinja. Od obnovljivih izvora energije koristi se sunčevo zračenje, voda(plima i oseka, vodotokovi), vjetar, toplinska energija Zemlje, a u današnje vrijeme i biomasa.

U ovom radu ću pisati o novim tehnologijama fotonaponskih modula jer oni rade pomoću jednog od najboljeg obnovljivog izvora energije. Fotonaponski moduli služe za proizvodnju električne energije uz pomoć sunčevog zračenja. Fotonaponski moduli su načinjeni od fotonaponskih ćelija, a ćelije stvaraju električnu energiju na način da kada se ona zagrije uz pomoć sunčevog zračenja oslobađaju se elektroni i nastaje električna struja. Ćelije od kojih su moduli načinjeni mogu biti načinjene od različitih materijala pa stoga i učinkovitost fotonaponskih modula može biti različita. Danas se sve više razvijaju fotonaponski moduli sa većom učinkovitošću.

Ovaj završni rad je napisan u pet poglavlja. Rad započinje s uvodom o temi završnog rada te zadatkom završnog rada. U drugom poglavlju opisana je učinkovitost fotonaponskih ćelija i modul. U trećem poglavlju je pisano o novim fotonaponskim tehnologijama koje se koriste i koje se još uvijek razvijaju. U četvrtom poglavlju se nalaze očitavanja rezultata mjerenja za jedan odabrani dan u godini. Zadnje poglavlje čini zaključak u kojem je donesen zaključak o završnom radu i o novim tehnologijama fotonaponskih modula.

## 1.1. Zadatak završnog rada

Zadatak završnog rada je pomoću dostupne literature opisati postojeće fotonaponske module i nove koji se razvijaju. Pomoću mjerenja je potrebno vidjeti kako promjene u danu utječu na učinkovitost fotonaponskih modula od različitih materijala.

## 2. Učinkovitost FN ćelija i modul

### 2.1. Fotonaponska pretvorba

Fotonaponska pretvorba je izravna pretvorba sunčevog svjetla u električnu struju. Sunčevo svjetlo se sastoji od fotona, a energiju fotona možemo izračunati prema izrazu:

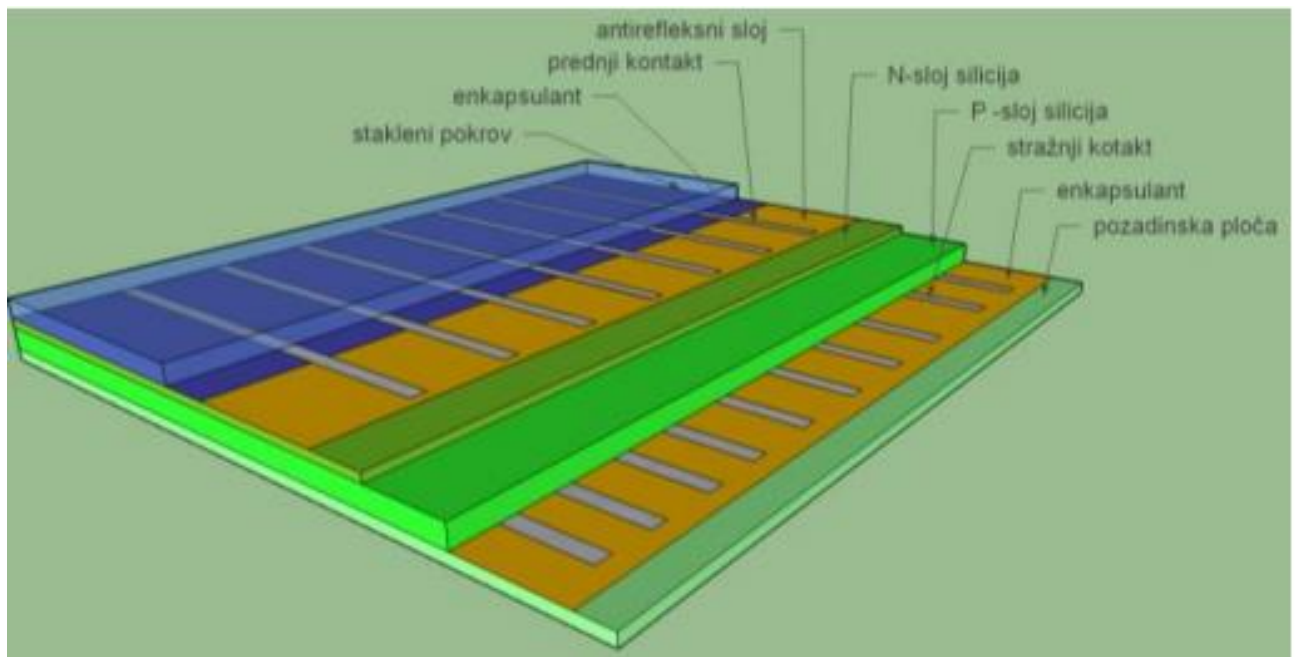
$$E = h \cdot \nu \quad [2.1]$$

gdje nam je  $\nu$ -frekvencija fotona,  $h$ -Planckova konstanta i ona iznosi  $6.625 \cdot 10^{-34}$  Js. Fotoni koji stižu do fotonaponske ćelije mogu biti apsorbirani u fotonaponsku ćeliju, reflektirani od nje ili mogu proći direktno kroz fotonaponsku ćeliju. Fotoni koji nam daju energiju kojom se mogu osloboditi elektroni i proizvoditi električna energija su apsorbirani fotoni i to se naziva fotonaponski efekt.

Postoje dva tipa uređaja fotonaponske pretvorbe: -1)fotonaponska ćelija(naziva se i sunčeva ili solarna)-ona je pasivan fotokemijski pretvarač jer je za gibanje elektrona koji se oslobode potreban nekakav vanjski izvor energije. Obično se pravi od legure silicija. [1]

-2)fotočlanak(fotoelement)-sastoji se od zapornog sloja između poluvodičke elektrode malog izlaznog rada i metalne podloge. Princip rada je takav da se na metalnoj podlozi sakupljaju elektroni, a na poluvodičkoj elektrodi se sakuplja pozitivan naboj te dolazi do nastanka razlike potencijala. Kao fotoelement se koristi bakar(oksidi na bakru), silicij na željezu i selen na željezu. Fotoelement ima jako nizak stupanj djelovanja koji iznosi 11-14%. [1]

Princip rada fotonaponske pretvorbe je taj da poluvodič uz dovoljnu apsorpciju sunčevog svjetla elektrone istiskuje iz materijala. Specijalna obrada materijala je takva da prednja površina ćelije načinjena za slobodne elektrone i na taj način se elektroni prirodno sele na površinu. Elektroni napuste svoju poziciju i kreiraju se šupljine. Putuju prema prednjoj površini ćelije: neravnoteža naboja između ćelijine prednje i stražnje površine – nastaje naponski potencijal. [1]



Slika 2.1. Osnova struktura fotonaponske ćelije [1]

Maksimalni stupanj djelovanja fotonaponske ćelije iznosi oko 35%, a on je ograničen radi toga što postoje gubici energije fotona manjih od zabranjenog pojasa 20,2%, postoje gubici energije fotona većih od zabranjenog pojasa iznosa 30,2% , gubici zbog ograničenja napona na veličinu manju od  $E_g/e$  ( $E_g$ -donja granična energija,  $e$ -jedinični naboj elektrona, kod silicija omjer iznosi 0.8 V, a gubici su 12%), i imamo gubitke koji nastaju iz dodatnih termodinamičkih razloga vezanih uz omjer struje kratkog spoja i napon praznog hoda(kod silicija ako je omjer 0,9 gubici su 3%). Ukupni gubici kod fotonaponske pretvorbe iznose minimalno 65%. Glavni problem uporabe fotonaponske uporabe su nizak stupanj djelovanja(maksimalno 0,35) i nizak izlazni napon iznosa do 0,7 V. Rješenje tih problema je korištenjem jeftinijeg materijala ili korištenjem više slojeva nekakvih različitih materijala koji imaju različiti spektralni odziv. [1]

## 2.2. Tehnološki pravci fotonaponskih ćelija

Postoji više tehnoloških pravaca fotonaponskih ćelija: 1) Monokristalni i polikristalni silicij: Površina ćelija ovisi o površini presjeka monokristala od kojih se želije proizvode. Ta površina iznosi od 5-10cm, a debljina iznosi 0,02-0,03 mm. Elektromotorna sila ima iznos od 0,55-0,70 V. Pri proizvodnji monokristalnih silicijskih ćelija koristi se apsolutno čisti poluvodički materijal. Monokristalni štapići se izvade iz rastaljenog silicija i režu se na pločice, a to omogućuje da stupanj iskorištenja bude veliki. Nedostatak pri proizvodnji ćelija od kristalnog silicija je bila njihova

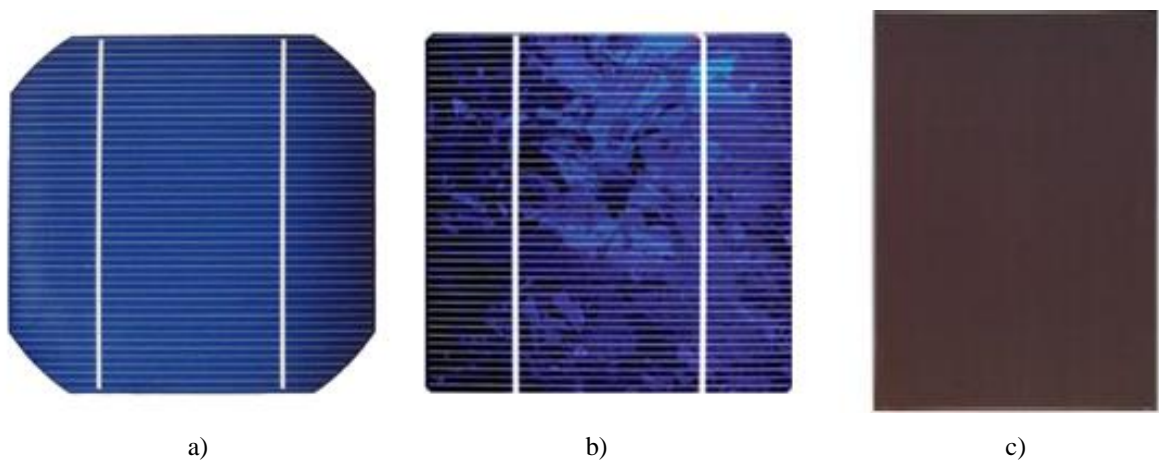


visoka cijena, ali s razvojem tehnologije i cijena proizvodnje se smanjila. Višeslojne ćelije načinjene od monokristalnog i amornog silicija su bolje jer imaju veću učinkovitost i veći otpor pri visokim temperaturama. [1]

2) Tanki filmovi: Kod tehnologije tankih filmova razlikujemo: amorfni silicij, CI(G)S (bakar indij galij selenid), CdTe(kadmij telurid). Debljina sloja kod tankih filmova je oko 1  $\mu\text{m}$ , a to rezultira manjom cijenom proizvodnje. Iako ima nižu cijenu ima i niži stupanj djelovanja(u porastu je) koji iznosi oko 4-9% za amorfni silicij, 10-11% za kadmij telurid i 7-11% za CI(G)S.

3) Višeslojne ćelije: Višeslojne ćelije se prave od galij arsenida, a načinjene su tako da imaju oblik tankog filma jednog ili dvaju slojeva. Ćelije načinjene na taj način bi trebale imati učinkovitost 25-40%. Razvijaju se i troslojne i četveroslojne ćelije koje imaju još veću učinkovitost, ali problem predstavlja cijena. [1]

4) Novi koncepti: Novi koncepti su one tehnologije koje se razvijaju kako bi imali veću učinkovitost ćelije za što manju cijenu. Prednost takvih ćelija je: fleksibilnost, imaju malu težinu, prozirnost, sloboda boja i oblika... Razvijaju se i ćelije s koncentracijom zračenja(Concentrated PV). [1]



Slika 2.2. Na slici vidimo a) monokristalni fotonaponski panel, b) polikristalni fotonaponski panel, c) panel od tankog filma [2]

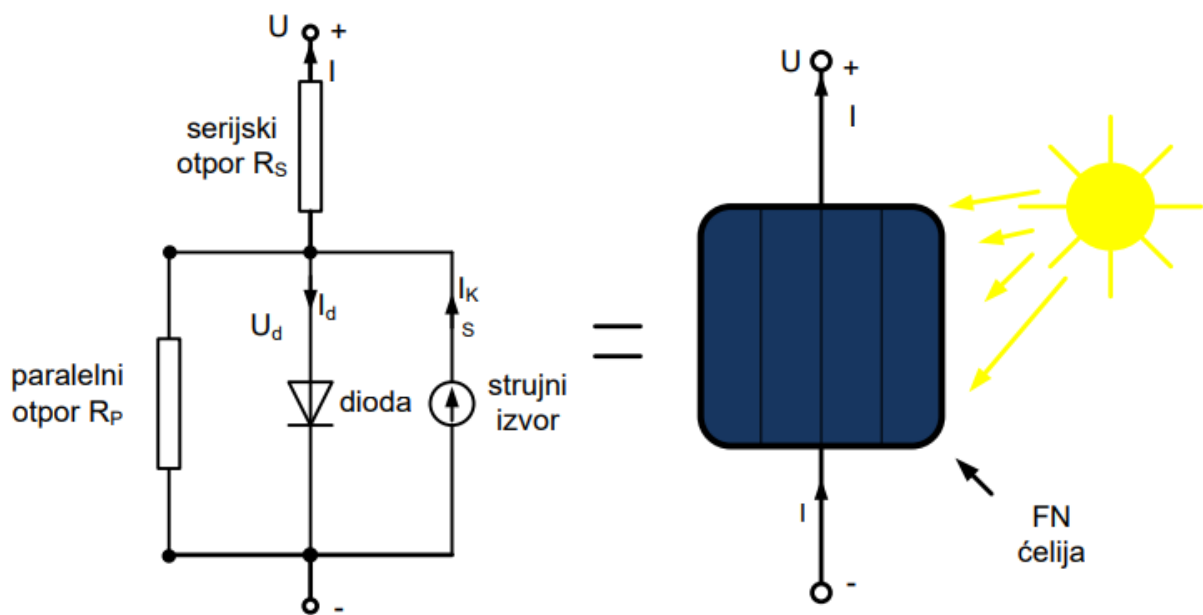


Slika 2.3. CdTe fotonaponski panel [3]



Slika 2.4. CI(G)S fotonaponski panel [4]

### 2.3. FN ćelija



Slika 2.5. Shema fotonaponske ćelije [1]

Fotonaponska ćelija predstavlja realan strujni izvor jer količina elektrona koja protječe je proporcionalna sunčevom zračenju. Izlazna struja je jednaka struji koju proizvodi sunčeva svjetlost (naziva se fotostruja)  $I_{fs}$  umanjenoj za struju diode  $I_d$  i struju kroz paralelni spoj otpora (shunt)  $I_p$ : [1]

$$I = I_{fs} - I_d - I_p = I_{fs} - I_0 \left[ e^{\frac{e(U+IR_s)}{mkT}} - 1 \right] - \frac{U}{R_p} \quad [2.2]$$

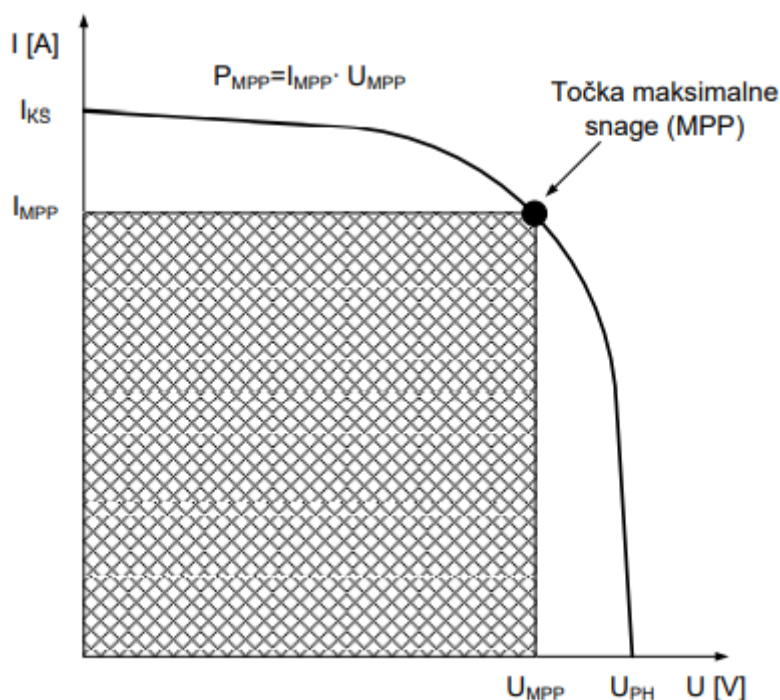
Zbog velikog otpora shunta možemo zanemariti  $I_p$ :

$$I = I_{fs} - I_0 \left[ e^{\frac{e(U+IR_s)}{mkT}} - 1 \right] \quad [2.3]$$

U formuli je: U-napon,  $R_p$ -paralelni otpor fotonaponske ćelije,  $I_0$ -struja zasićenja, e-iznos elementarnog naboja,  $R_s$  – serijski otpor fotonaponske ćelije, m – parametar fotonaponske ćelije(m=1), k – Boltzmanova konstanta, T – apsolutna temperatura [K]. [1]

$R_s$  je serijski otpor ćelije, to je omski otpor na koji će naići struja kroz ćeliju i kroz površinu ćelije prema omskim kontaktima do mjesta gdje se nalazi spoj s priključkom na vanjski krug. Umnožak površine ćelije i toga serijskog otpora je reda veličine  $0,0025 \Omega\text{m}^2$ . Okolni defekti u fotonaponskom spoju uzrokuju paralelni otpor ćelije  $R_p$ . Kada imamo idealnu fotonaponsku ćeliju nema serijskih gubitaka, odnosno  $R_s=0$  i  $R_p=\infty$ (znači da nemamo rasipanje prema zemlji). Kod obične silicijeve ćelije veličine jednog inča kvadratnog  $R_s = 0.05$  do  $0.10 \Omega$  i  $R_p = 200$  do  $300 \Omega$ . [1]

### Strujno-naponska karakteristika fotonaponske ćelije:



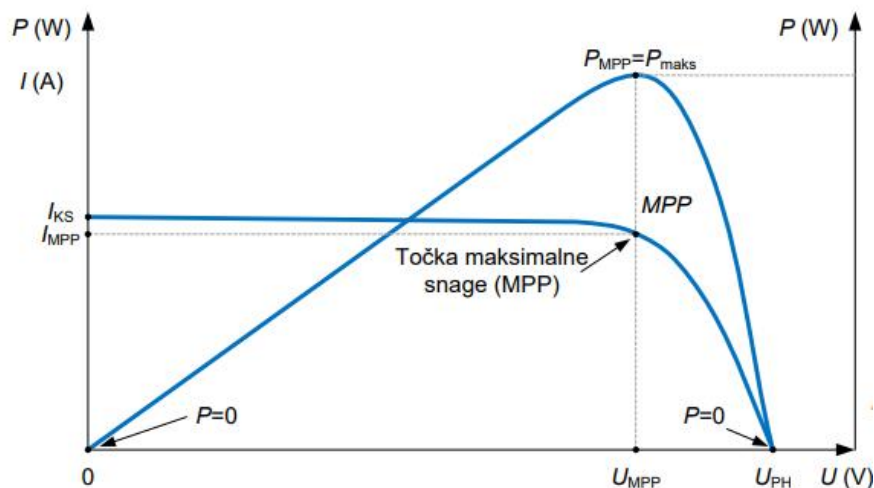
Slika 2.6. Strujno-naponska karakteristika fotonaponske ćelije [1]

Sa slike možemo vidjeti da u lijevom području ćelija radi skoro kao konstantan strujni izvor, stvarajući pri tome napon koji je usklađen s otporom opterećenja. U desnom području karakteristike vidimo da struja naglo pada, a da je napon približno konstantan (ima mali porast). U tom području ćelija radi kao izvor konstantnog napona pri čemu ima unutarnji otpor. Točka MPP predstavlja točku maksimalne snage, a ona se nalazi između lijevog i desnog područja strujno-naponske karakteristike. Ta točka se naziva još i nestabilna ili pregibna točka. [1]

Kod karakteristike postoje 3 karakteristične točke: 1) Točka kratkog spoja - imamo struju kratkog spoja  $I_{ks}$  koja predstavlja struju pri kratko spojenim stezaljkama fotonaponske ćelije. U toj točki iznos napona je  $U=0$  V, a struja kratkog spoja jednaka je fotostruji  $I_{ks}=I_{fs}$ . 2) Točka praznog hoda - to je točka kada imamo iznos napona otvorenog kruga (otvorenih stezaljki fotonaponske ćelije). [1]

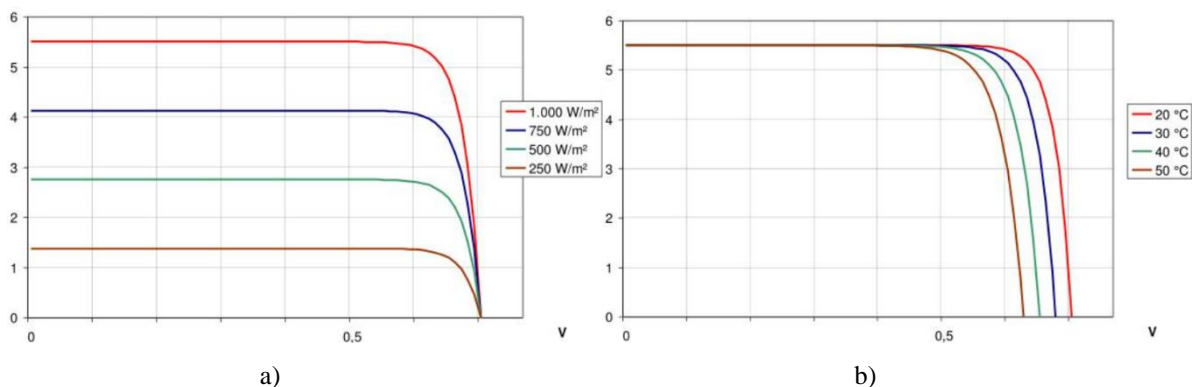
$$I_{PH} = \frac{k \cdot T}{e} \ln \left( \frac{I_{ks}}{I_0} \right) + 1 \quad [2.4]$$

### 3) Točka maksimalne snage (MPP)



Slika 2.7. Karakteristika snage fotonaponske ćelije [1]

Maksimalna snaga se postiže samo u jednoj točki koja se naziva točka pregiba.



Slika 2.8. a) Strujno-naponska karakteristika fotonaponske ćelije u ovisnosti o jakosti sunčevog zračenja, b) Strujno-naponska karakteristika fotonaponske ćelije u ovisnosti o radnoj temperaturi [5]

Prilikom instalacije fotonaponskog modula treba paziti na to da stupanj djelovanja ćelije pada s porastom temperature (pad za 0,5% pri porastu temperature za 1°C), a temperatura utječe i na izgled strujno-naponske karakteristike. [1]

$$T_{\text{ćel}} = T_{\text{okoline}} + \left( \frac{NOCT - 20^\circ}{0,8} \right) * G \quad [2.5]$$

Gdje je: NOCT – nominana radna temperatura ćelije kada je temperatura okoline 20°C, G – sunčevo zračenje [kW/m<sup>2</sup>]. Kada imamo konstantnu jakost sunčevog zračenja, struja diode I<sub>d</sub> predstavlja funkciju koja snažno ovisi o temperaturi ćelije, pa zbog toga ukupna struja fotonaponske ćelije pokazuje negativnu promjenu napona praznog hoda. [1]

## 2.4. Učinkovitost fotonaponskih ćelija

Izgled strujno-naponske karakteristike fotonaponske ćelije određuju unutarnji otpori, ovisno o vrsti ćelije, te vanjski utjecaji (temperatura, jakost zračenja). O ta dva parametra ovisi i učinkovitost fotonaponske ćelije, omjer maksimalne snage P<sub>MPP</sub> i snage Sunčevog zračenja G na površinu A<sub>FNC</sub> fotonaponske ćelije. [1]

$$h_{FNC} = \frac{P_{MPP}}{G * A_{FNC}} * 100 = F * \frac{U_{PH} * I_{KS}}{G} * 100 \quad [2.6]$$

gdje je F faktor punjenja:  $F = \frac{P_{MPP}}{U_{PH} * I_{KS}} = \frac{U_{MPP} * I_{MPP}}{U_{PH} * I_{KS}}$  [2.7]

To je omjer površine pravokutnika sa stranicama U<sub>MPP</sub> i I<sub>MPP</sub> i pravokutnika sa stranicama U<sub>PH</sub> i I<sub>KS</sub>. On pokazuje koliko se stvarna ćelija približuje idealnoj (koliko je kvalitetna), odnosno koliki je utjecaj serijskog otpora ćelije. Iznos faktora punjenja obično iznosi od 0.7 < F < 0.9. [1]

## 2.5. Fotonaponski modul i niz

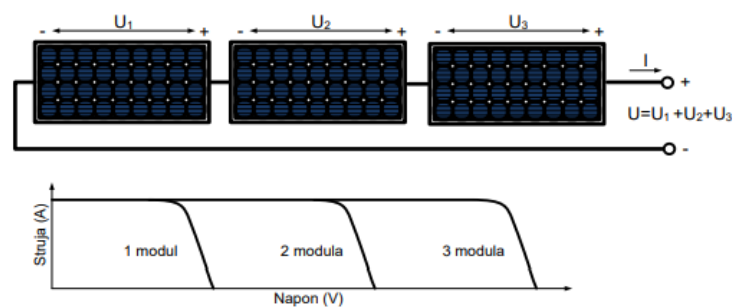
Fotonaponska ćelija je osnovni dio fotonaponskog sustava. Pošto jedna ćelija proizvodi samo 1-2 W, uz napon od oko 0,6 V, a to je premalo za primjenu u fotonaponskim sustavima. Zbog toga se te ćelije električno povezuju u module (serijsko-paralelni spoj ćelija) koji su zaštićeni od različitih utjecaja iz atmosfere. Niz dobijemo tako da povežemo određeni (potrebni) broj modula. [1]



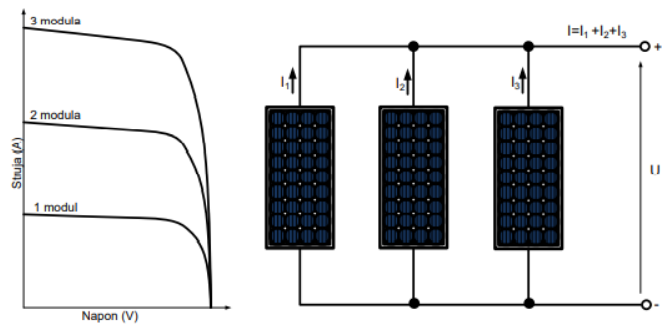
Slika 2.9. Fotonaponski niz(modul je samo jedna od tih ploča) [6]

Kada bi promatrali tehničke karakteristike modula, one bi bile slične kao tehničke karakteristike ćelije. Tehničke karakteristike se definiraju za standardne testne uvjete(STC). Tehničke karakteristike prema STC: nazivna vršna snaga  $P_{MPP}$  [kWp ], učinkovitost  $\eta$  [%](učinkovitost modula je nešto niža od učinkovitost ćelije zbog gubitaka u ožicama), 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  $\beta$  (V/0C) ili nekada u (%/0C), smanjenje napona zbog povećanja temperature  $\alpha$  (%/0C), duljina \* širina \* visina (mm \* mm \* mm), masa m (kg). [1]

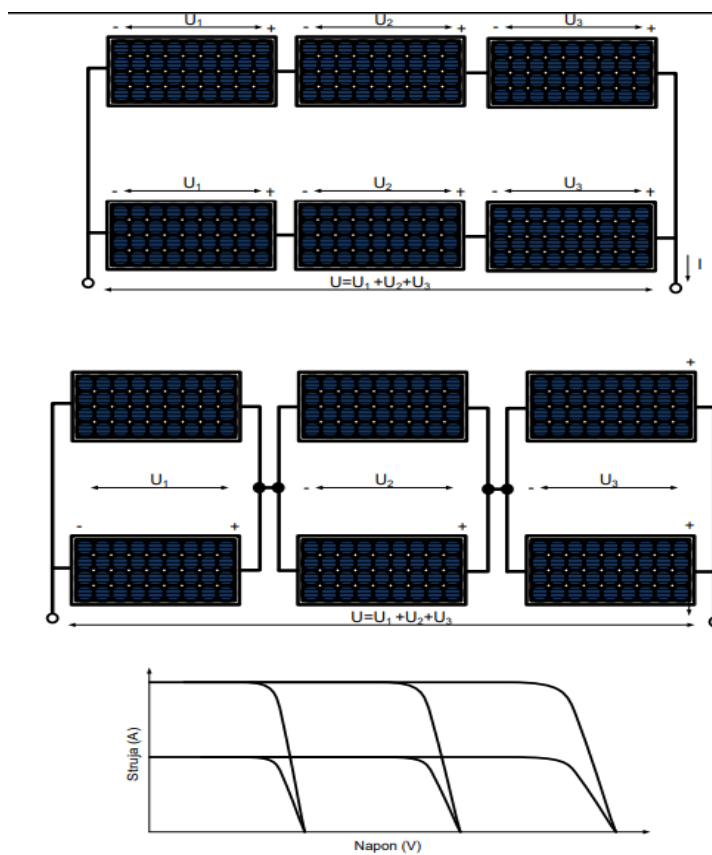
Karakteristike fotonaponskih modula koje su navedene na natpisnim pločicama se ostvaruju prilikom testiranja u standardnim testnim uvjetima. Standardni testni uvjeti uključuju: Sunčevo zračenje od  $1\text{kw/m}^2$ , temperatura fotonaponskog modula. Modularnost strujno-naponske karakteristike fotonaponskih nizova je to što je moguće vrlo brzo i u određenim dopuštenim veličinama instaliranje nizova kako bi ostvarili postupno povećanje snage. Fotonaponske module možemo spojiti serijski, paralelno i kombinirano kao što se može vidjeti na slikama. [1]



Slika 2.10. Strujno naponska karakteristika serijski spojenih fotonaponskih modula [1]



Slika 2.11. Strujno naponska karakteristika paralelno spojenih fotonaponskih modula [1]



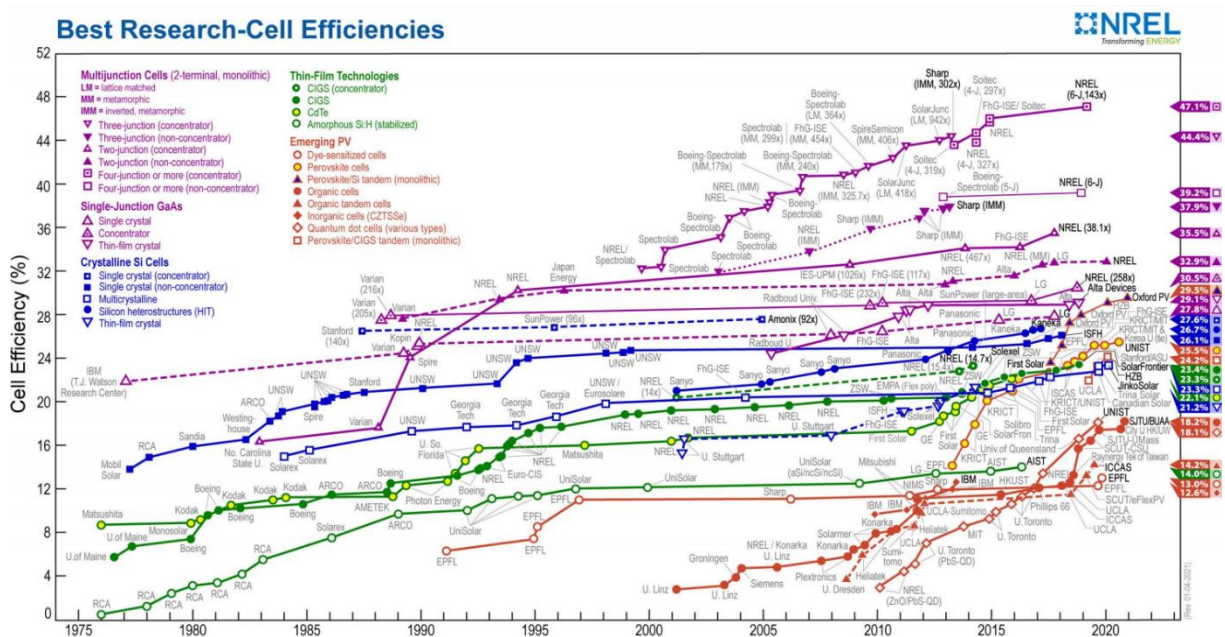
Slika 2.12. Strujno naponska karakteristika kombinirano spojenih fotonaponskih modula [1]

### 3. Fotonaponska tehnologija

Fotonaponski sustav je brzo rastuće tržište: složena godišnja stopa rasta (CAGR) prosječne fotonaponske instalacije, uključujući izvan mreže, iznosile su 34% između 2010. i 2020. godine.

U 2020. godini proizvođači iz Azije računaju na 95% ukupne proizvodnje kristalno silicijskog fotonaponskog modula. Kina (kopno) drži vodeću ulogu s udjelom od 67%. Europa je doprinijela s udjelom od 3%; SAD i Kanada mogu s 2%. Povećana veličina poluvodičke pločice omogućava veću veličinu fotonaponskog modula omogućavajući raspon snage od +600 W po modulu. 2020. godine doprinos Europe ukupnim prosječnim fotonaponskim instalacijama iznosio je 22% (u usporedbi na 24% u 2019.). Suprotno tome, instalacije u Kini činile su 33% (ista vrijednost kao i godinu prije). [7]

Fotonaponska tehnologija zasnovana na kristalno silicijskim pločama činila je oko 95% ukupne proizvodnje u 2020. Udio mono-kristalne tehnologije sada iznosi oko 84% (u usporedbi s 66% u 2019.) od ukupne proizvodnje. [7]

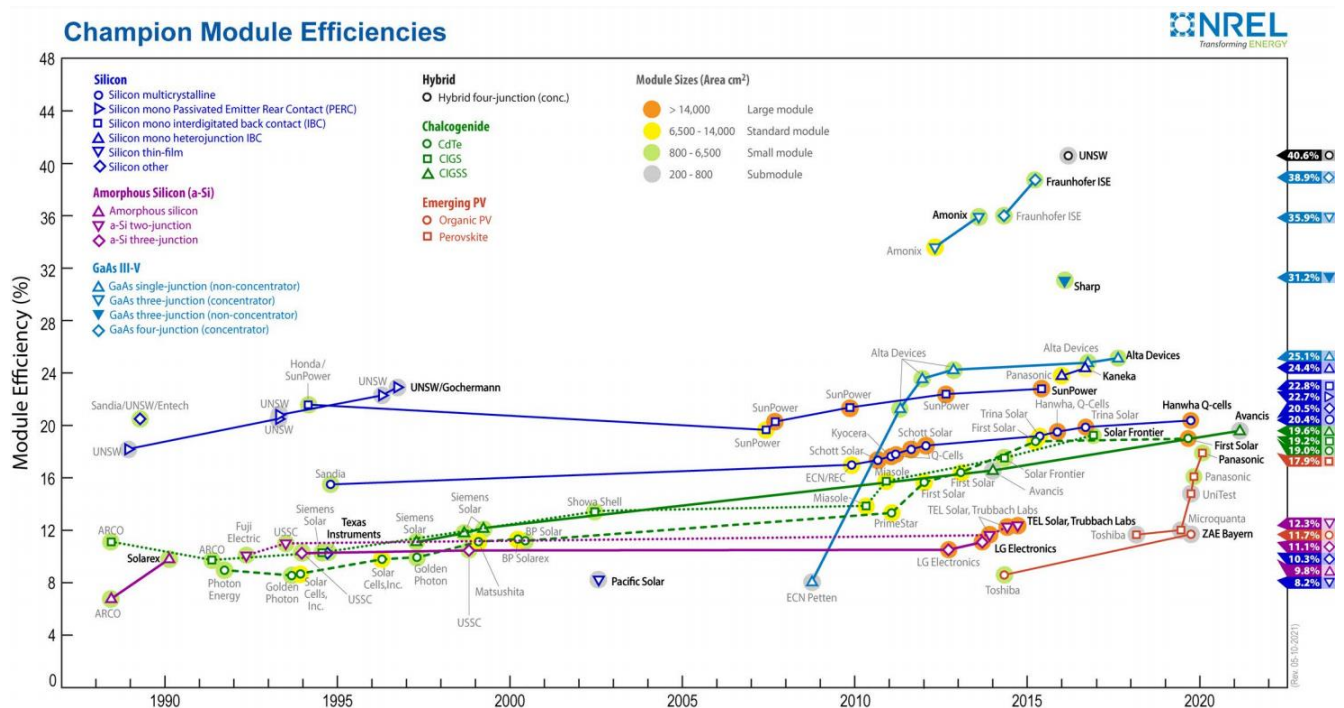


Slika 3.1. Učinkovitost fotonaponskih ćelija [8]

Na ovoj slici možemo vidjeti kako se razvijala učinkovitost fotonaponskih ćelija tijekom godina od 1975. pa sve do danas. Možemo primijetiti kako danas najveću učinkovitost imaju višestruko spojene ćelije (multi-junction cells), a najmanju učinkovitost imaju novonastale fotonaponske ćelije. Od višestruko spojenih ćelija najveću učinkovitost dostigla je četvero spojna ćelija koja ima koncentrator u sebi i ta učinkovitost iznosi 47,1%. Najmanju učinkovitost od novonastalih



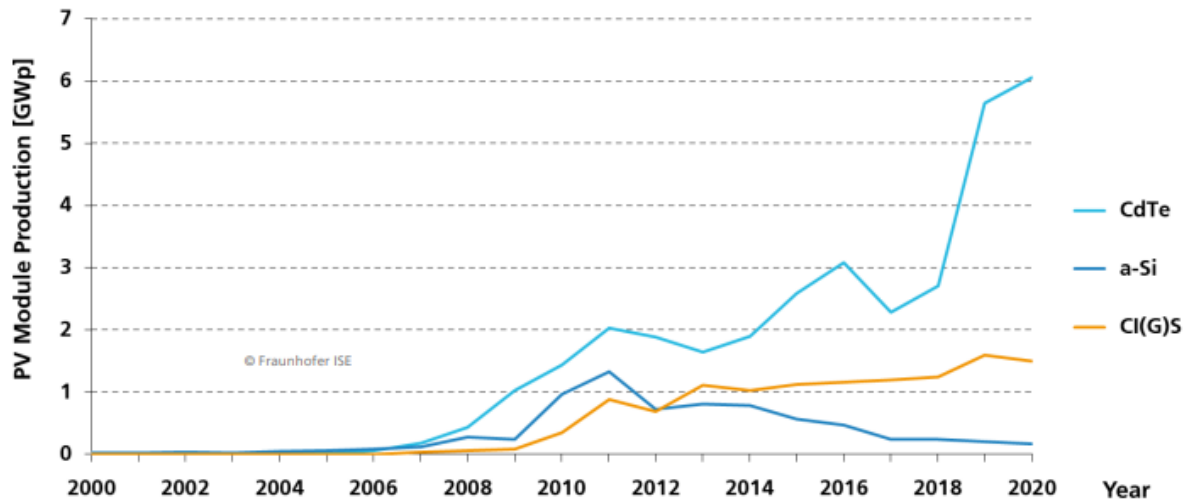
fotonaponskih ćelija imaju ćelija osjetljiva na boje i ona iznosi 13%, te anorganske ćelije gdje je učinkovitost 12,6%. Možemo vidjeti kako ćelije u tehnologiji tankog filma imaju učinkovitost od 14%(amorfni silicij),do 23,4%(ćelije od bakra, indija, galija i selenida). Ćelije od kadmij-telurida(CaCd) imaju učinkovitost od 22,1%. Petrovskite solarne ćelije su novonastale fotonaponske ćelije te su još u razvoju kako postići što veću učinkovitost, a njihova sadašnja učinkovitost iznosi 25,5% što je velika učinkovitost u usporedbi na ostale novonastale fotonaponske ćelije. Petrovskite ćelije u tandemu sa silicijem imaju učinkovitost od 29,5% i one imaju najveću učinkovitost od novonastalih fotonaponskih ćelija.



Slika 3.2. Fotonaponski moduli s najvećom učinkovitošću [9]

Sa grafa možemo primijetiti kako imamo puno manje fotonaponskih modula, nego ćelija iz razloga što se ćelije još razvijaju i još se nisu počele upotrebljavati. Kod fotonaponskih modula možemo vidjeti da imaju manju učinkovitost nego ćelije iz razloga što kada postavljamo fotonaponske module na kuće oni se sastoje iz više ćelija koje su povezane i tu nastaju gubitci pa zbog toga imamo smanjenu učinkovitost. Najveću učinkovitost koja iznosi 40,6% ima hibridni četvero spojni modul s koncentratorom. Najmanju učinkovitost ima modul od tankih filmova napravljenih od silicija i ona iznosi 8,2%. Možemo vidjeti da su moduli sa petrovskite fotonaponskim ćelijama dosegli učinkovitost od 17,9% i oni imaju najveću učinkovitost od modula načinjenih od novonastalih fotonaponskih ćelija. Kod modula od halogenida najveću učinkovitost ima modul od CIGSS(19,6%) ,a najmanju modul od kadmij-telurida (19%). Moduli koji koriste ćelije od

amornog silicija imaju jako malu učinkovitost koja iznosi 9,8%. Moduli od galijevog arsenida imaju učinkovitost od 25,1% (ćelija od galij-arsenida) pa do 38,9% (ćetvero spojna ćelija od galija-arsenida sa koncentratorom).

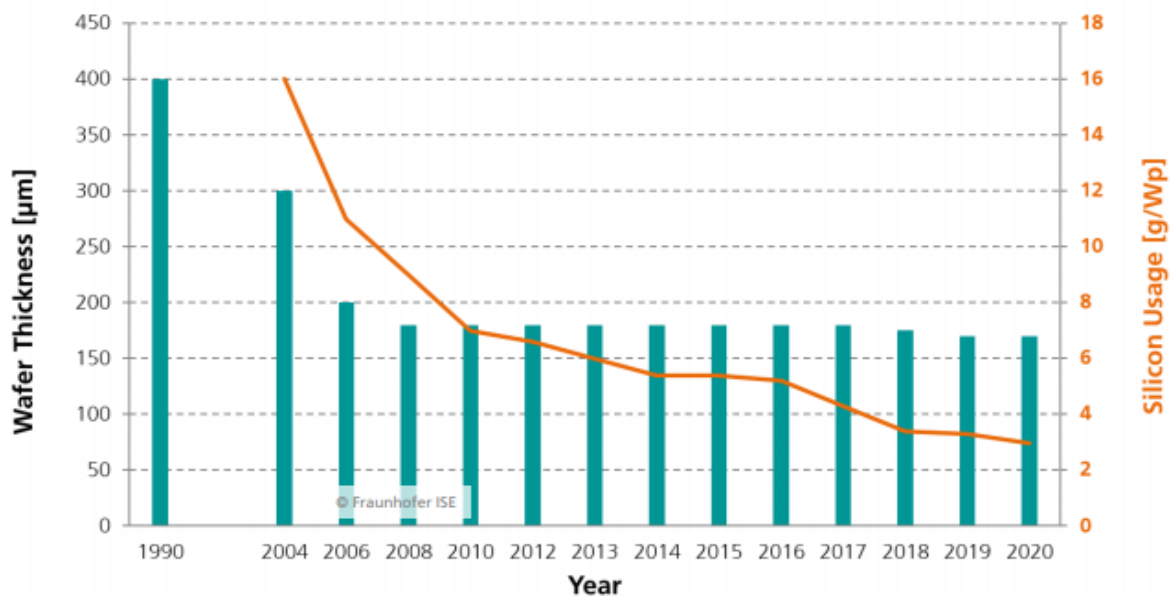


Slika 3.3. Prosječna proizvodnja energije fotonaponskim modulima [7]

Na grafu koji je prikazan slikom iznad možemo vidjeti da se najviše energije proizvede pomoću fotonaponskih ćelija kadmij telurid, a proizvodnja energije pomoću modula od amornog silicija opada s godinama.

Učinkovitost laboratorijskih ćelija za Perovskite iznosi 25,5%. U posljednjih 10 godina povećala se učinkovitost prosječnih komercijalnih silicijskih modula na bazi pločica od oko 15% do 20%. Istodobno, učinkovitost kadmij telurid (CdTe) modula povećala se s 9% na 19%. U laboratoriju se moduli s najboljom izvedbom temelje na mono-kristalnom siliciju s 24,4% učinkovitost. Prema istraživanjima učinkovitost pokazuje potencijal za daljnje povećanje učinkovitosti na nivo proizvodnje. U laboratoriju fotonaponske ćelije visoke koncentracije višestrukih spojeva postižu učinkovitost do 47,1% danas. Tehnologijom koncentratora postignuta je učinkovitost modula do 38,9%. [7]

Korištenje materijala za silicijske ćelije znatno se smanjilo tijekom posljednjih 16 godina otprilike sa 16 g / W do manje od 3 g / W zbog povećane učinkovitosti, tanje poluvodičke pločice i piljenje dijamantne žice kao i većih šipki. [7]



Slika 3.4. Razvoj kristalno silicijske fotonaponske ćelije [7]

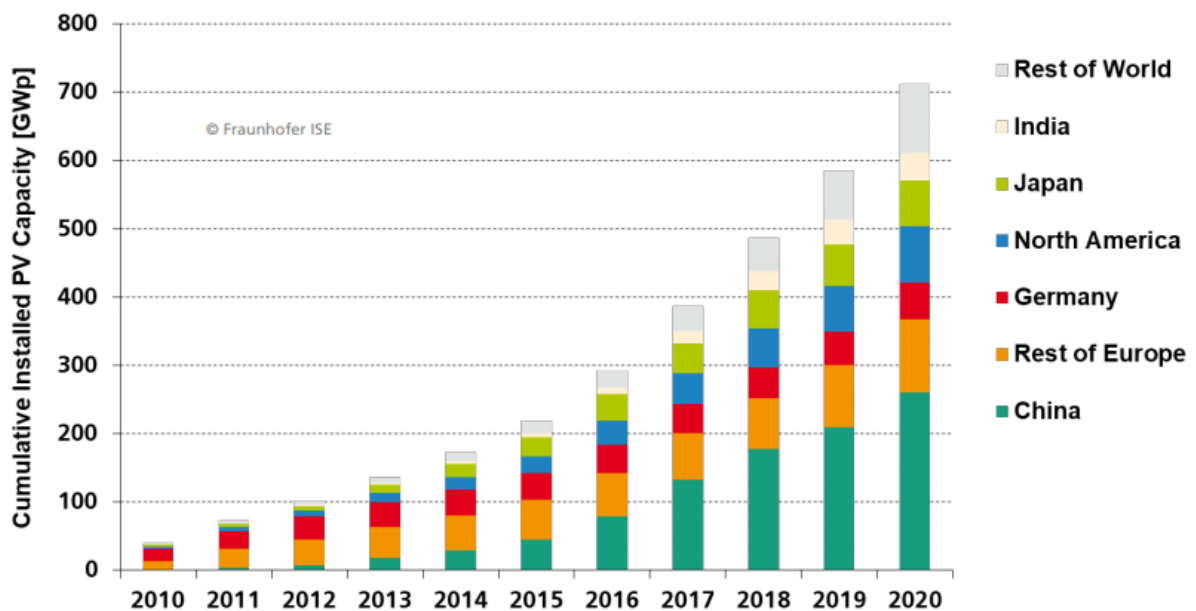
Na slici se vidi kako se debljina poluvodičke pločice smanjila tijekom godina za 50%, također se vidi smanjenje iskoristivosti silicija tijekom godina što nam dovoljno govori kako se kristalno silicijska fotonaponska ćelija razvila.

Vrijeme povrata energije fotonaponskih sustava ovisi o zemljopisnom položaju: Fotonaponski sustavi u Sjevernoj Europi trebaju oko 1,2 godine da uravnoteže ulaznu energiju, dok fotonaponskim sustavima na jugu jednake uložene energije nakon 1 godine i manje, ovisno o instaliranoj tehnologiji i učinkovitosti mreže. [7]

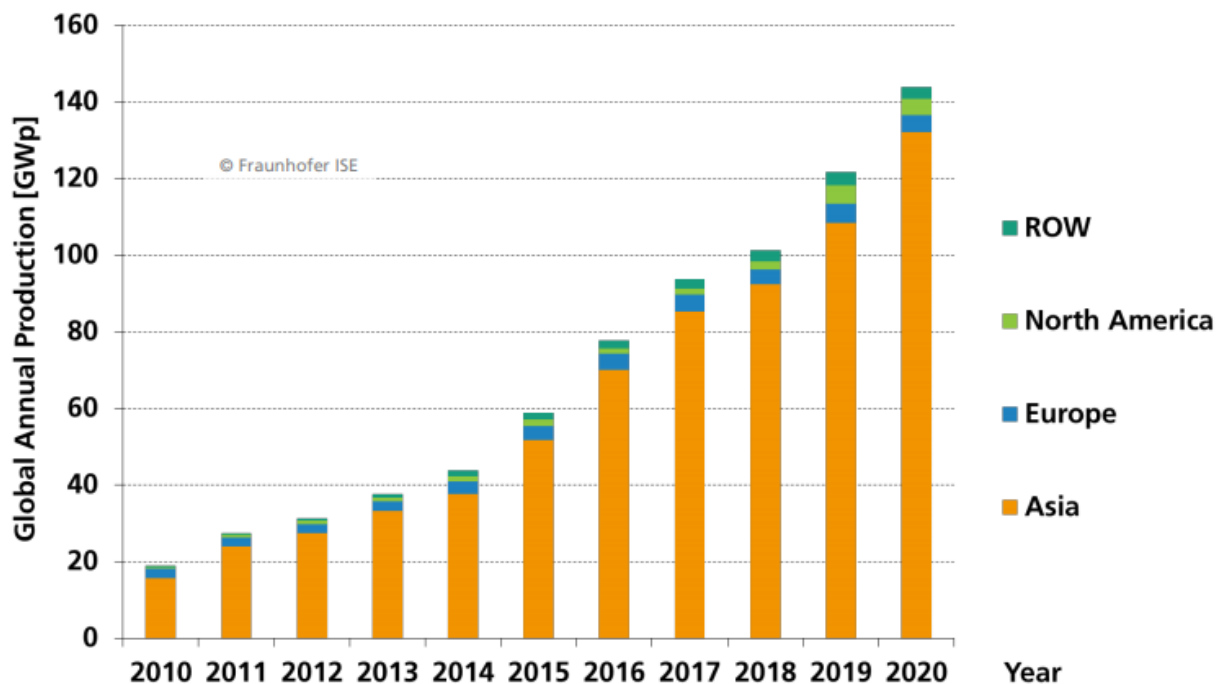
Fotonaponski sustav smješten na Siciliji sa silicijskim modulima na bazi pločica ima približno vrijeme vraćanja energije od jedne godine. Uz pretpostavku da traje 20 godina, ovakav sustav može proizvesti dvadeset puta više energije nego što je bilo potrebno za njegovu proizvodnju. [7] Učinkovitost pretvarača za vrhunske proizvodne marke iznosi 98% i više. Tržišni udio strujnih pretvarača procjenjuje se na 64%. Ovi se pretvarači uglavnom koriste u stambene, male i srednje komercijalne primjene u fotonaponskim sustavima do 150 kW. Udio središnjih pretvarača, s primjenama uglavnom u velikim komercijalnim i komunalnim sustavima, je oko 34%. Mali udio na tržištu (oko 1%) pripada mikro-pretvaračima (koji se koriste na razini modula). Procjenjuje se da će tržišni udio pretvarača istosmjerne / istosmjerne struje, koji se nazivaju i "optimizatori snage", iznositi 5% ukupnog tržišta pretvarača. [7]

Trendovi: Digitalizacija, osnaživanje, nove značajke za stabilizaciju mreže i optimizaciju samo potrošnje; skladištenje; korištenje inovativnih poluvodiča (SiC ili GaN) koji omogućuju vrlo visoku učinkovitost i kompaktni dizajn; 1500 V maksimalni istosmjerni napon struje. [7]

U Njemačkoj su cijene za tipični fotonaponski krovni sustav od 10 do 100 kW bile oko 14 000 € / kW 1990. Na kraju 2020. takvi sustavi koštaju samo 7,4% cijene 1990. To je regresija neto cijene oko 92% u razdoblju od 30 godina. Krivulja iskustva - koja se naziva i krivulja učenja - pokazuje da je u posljednjih 40 godina cijena modula smanjila se za 26% sa svakim udvostručavanjem kumulirane proizvodnje modula. Rezultati smanjenja troškova iz ekonomskih razmjera i tehnoloških poboljšanja. [7]



Slika 3.5. Prosječna godišnja instalirana fotonaponska energija u svijetu [7]



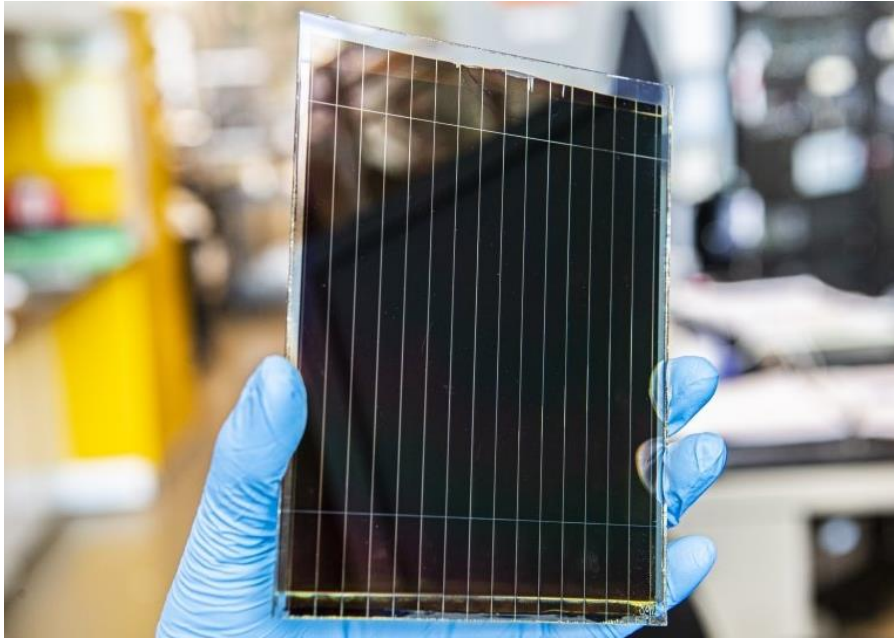
Slika 3.6. Prosječna godišnja proizvodnja fotonaponske energije [7]

U 2010 82% ukupne fotonaponske proizvodnje energije bilo je iz Azije, a u 2020 taj postotak je porastao i na 92%. Ukupna godišnja proizvodnja se povećala za 7 puta u prethodnom desetljeću. [7]

### 3.1. Perovskite fotonaponske ćelije

Perovskiti su porodica materijala sa specifičnom kristalnom strukturom, koja je dobila ime po mineralu s tom strukturom. Kada se koriste za stvaranje fotonaponskih ćelija, pokazali su potencijal za visoke performanse i niske troškove proizvodnje. [10]

Sunčane ćelije Perovskite pokazale su izuzetan napredak posljednjih godina brzim porastom učinkovitosti pretvorbe, prema izvještaju od oko 3% u 2006. do preko 25% danas. Iako su perovskite fotonaponske ćelije postale vrlo učinkovite u vrlo kratkom vremenu, ostaju brojni izazovi prije nego što postanu konkurentna komercijalna tehnologija. [10]



Slika 3.7. Izgled Perovskite fotonaponske ćelije [10]

Većim dijelom nedavnih radova na fotonaponskim ćelijama na perovskitu dominiraju upijajući materijali na bazi metilamonijevog halogenida olova. Iako se perovskitni materijali proučavaju više od jednog stoljeća, početna ispitivanja halogenida metilamonijevog olova za primjene poluvodiča započela su u posljednja dva desetljeća. Početna primjena apsorbira perovskita u fotonaponskim ćelijama dogodila se 2006. godine, a objavljene su 2009. Međutim, te stanice nisu bile vrlo učinkovite (manje od 4%) i nisu bile stabilne, budući da su se oslanjale na korozivnu tekuću fazu koja je polako narušavala ostale slojeve unutar uređaj. Do 2012. komponente tekuće faze zamijenjene su čvrstim kontaktima, a učinkovitost je poboljšana na 10%. Naknadna poboljšanja performansi i stabilnosti nastala su kontinuiranim istraživanjem novih materijala, novih arhitektura uređaja, poboljšanim postupcima izrade, što je dovelo do povećanja učinkovitosti ćelije od 20% u 2014. godini. [10]

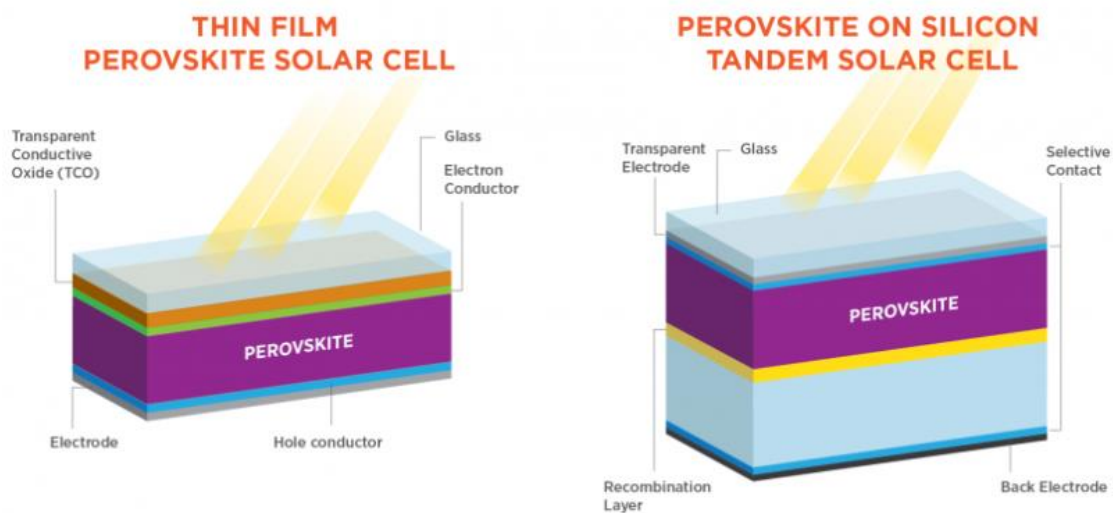
### 3.1.1. Upute za istraživanje

SETO je identificirao četiri glavna izazova koja se moraju istodobno riješiti kako bi perovskite tehnologije bile komercijalno uspješne. Svaki izazov predstavlja jedinstveni skup prepreka i zahtijeva postizanje određenih tehničkih i komercijalnih ciljeva. [10]

**PRVI PRIORITET - Učinkovitost pretvorbe energije:** Uređaji Perovskite premašili su sve tehnologije tankog filma u učinkovitosti pretvorbe energije, pokazujući brza poboljšanja tijekom posljednjih pet godina. Međutim, uređaji visoke učinkovitosti nisu nužno upareni s održivom

stabilnošću i karakteristikama izrade. Za veliko zemaljsko raspoređivanje perovskita bit će potrebno održavanje ove visoke učinkovitosti uz postizanje stabilnosti i skaliranja. U međuvremenu, kontinuirano poboljšanje učinkovitosti samo po sebi moglo bi biti dragocjeno za mobilna tržišta, reagiranje na katastrofe ili operativna energetska tržišta gdje su lagani uređaji velike snage presudni. [10]

Perovskiti se mogu prilagoditi tako da reagiraju na različite boje u sunčevom spektru promjenom sastava materijala, a razne formulacije pokazale su visoke performanse. Ova fleksibilnost pojaseva otvara još jednu korisnu aplikaciju za perovskite fotonaponske ćelije u arhitekturi tandemskih uređaja visokih performansi, s potencijalnom učinkovitošću pretvorbe snage preko 30%. U tim se strukturama perovskiti kombiniraju s drugim, drugačije podešenim apsorpcijskim materijalom radi isporuke veće snage. Sunčane ćelije Perovskite određenih sastava mogu vrlo učinkovito pretvoriti ultraljubičastu i vidljivu svjetlost u električnu energiju, što znači da bi mogle biti izvrsni hibridno-tandemski partneri za upijajuće materijale poput kristalnog silicija koji učinkovito pretvaraju infracrvenu svjetlost. Također je moguće kombinirati dvije perovskitne fotonaponske ćelije različitog sastava kako bi se dobio tandem samo s perovskitom. To bi moglo dovesti do još veće učinkovitosti i isplativijih tandemskih fotonaponskih (PV) aplikacija. Tandemi samo s perovskitom mogli bi biti posebno konkurentni u mobilnim područjima, područjima operativne energije u odgovoru na katastrofe i obrani, jer se mogu proizvoditi na fleksibilnim podlogama s visokim omjerima snage i mase. [10]



b)

Slika 3.8. a) Perovskitna fotonaponska ćelija napravljena u tehnologije tankog filma, b) Perovskitna fotonaponska ćelija u tandemu sa silicijem [10]

Može se vidjeti da se perovskitna fotonaponska ćelija napravljena u tehnologiji tankog filma sastoji od: prozirnog vodljivog oksida (eng. *Transparent Conductive Oxide, TCO*), stakla (eng. *Glass*), sloja koji vodi elektrone (eng. *Electron Conductor*), elektrode, sloj koji vodi šupljine (eng. *Hole Conductor*) i perovskitne sunčeve ćelije. Perovskitna fotonaponska ćelija u tandemu sa silicijem izgleda malo drugačije od fotonaponske ćelije napravljene u tehnologiji tankog filma, ona se sastoji od: perovskitne fotonaponske ćelije, stakla (eng. *Glass*), prozirne elektrode (eng. *Transparent Electrode*), stražnje elektrode (eng. *Back Electrode*), rekombinacijskog sloja (eng. *Recombination Layer*) i selektivnog kontakta (eng. *Selective Contact*).

**DRUGI PRIORITET - Stabilnost i razgradnja:** Sunčane ćelije Perovskite pokazale su konkurentnu učinkovitost s potencijalom za veće performanse, ali njihova je stabilnost prilično ograničena u usporedbi s vodećom PV tehnologijom: Ne podnose dobro vlagu, kisik, dulje svjetlosne periode, ili veliku vrućinu. Da bi povećali stabilnost, istraživači proučavaju razgradnju i perovskitnih materijala i kontaktnih slojeva. Poboľšana izdržljivost stanica najvažnija je za razvoj komercijalnih fotonaponskih proizvoda od perovskita. [10]

Unatoč značajnom napretku u razumijevanju stabilnosti i razgradnje perovskitnih fotonaponskih ćelija, trenutni radni vijek nije komercijalno isplativ. Mobilna tržišta mogu tolerirati kraći radni vijek, ali stabilnost tijekom skladištenja (prije upotrebe) i dalje je ključni kriterij izvedbe za ovaj sektor. Za uobičajeno generiranje sunčeve energije, tehnologije koje ne mogu raditi dulje od dva desetljeća vjerojatno neće biti održive bez obzira na ostale koristi.

Rani uređaji za perovskite brzo su se razgrađivali. Prije nekoliko godina, tipični perovskitni uređaji razgradili bi se za nekoliko minuta ili sati u nefunkcionalna stanja. Sada je više skupina pokazalo životni vijek od nekoliko mjeseci rada. Za komercijalnu proizvodnju električne energije na razini mreže, SETO cilja na to da operativni životni vijek bude najmanje 20 godina, a po mogućnosti više od 30 godina. [10]

Zajednica za istraživanje i razvoj PV-a perovskite usredotočena je na operativni životni vijek i razmatra višestruke pristupe za razumijevanje i poboljšanje unutarnje i vanjske stabilnosti i degradacije. Napori uključuju poboljšanu površinsku pasivizaciju (degradaciju) slojeva apsorbera; alternativni materijali i formulacije za slojeve apsorbera, slojeve za transport naboja i elektrode; te napredni materijali i pristupi za inkapsulaciju koji ublažavaju izvore razgradnje tijekom proizvodnje i rada. [10]

Jedno pitanje s procjenom razgradnje perovskita odnosi se na razvoj dosljednih metodologija ispitivanja i validacije. Istraživačke skupine često izvještavaju o rezultatima izvedbe na temelju



različitih uvjeta ispitivanja, uključujući varijabilnost pristupa inkapsulaciji, atmosferski sastav, osvjetljenje, električnu pristranost i druge parametre. Iako tako različiti uvjeti ispitivanja mogu pružiti uvid u dragocjene podatke, nedostatak standardizacije predstavlja izazov za izravnu usporedbu rezultata i teško je predvidjeti izvedbu na terenu iz rezultata ispitivanja. To utječe na cjelokupnu zajednicu istraživanja i razvoja perovskita, neovisno o bilo kojem specifičnom istraživačkom području, skupu materijala ili pristupu poboljšanju stabilnosti. [10]

**TREĆI PRIORITET - Izvodljivost:** Povećavanje proizvodnje perovskita potrebno je kako bi se omogućila proizvodnja perovskitnih fotonaponskih ćelija. Stvaranje skalabilnih i ponovljivih postupaka moglo bi povećati proizvodnju i omogućiti da perovskitni PV moduli zadovolje i potencijalno premaše uredske ciljeve poravnate cijene električne energije. Stanice su tanko slojni uređaji građeni slojevima materijala, tiskani ili presvučeni tekućom tintom ili nanoseni vakuumom. Izrada ujednačenog perovskitnog materijala visokih performansi u velikom proizvodnom okruženju je teška i postoji značajna razlika u performansama između učinkovitosti ćelija male površine i performansi modula velike površine. Budućnost proizvodnje perovskita ovisit će o rješavanju ovog izazova, koji i dalje ostaje aktivno područje rada unutar istraživačke zajednice za PV. [10]

Za proizvodnju laboratorijskih uređaja za perovskite korištene su razne metode. Mnoge od ovih metoda nisu lako skalabilne, ali postoje značajni naponi kako bi se primijenili visoko skalabilni pristupi izradi perovskita. Za tehnologije tankog filma one se mogu podijeliti u dvije glavne vrste proizvodne linije:

*-List u list:* Slojevi uređaja nanose se na krutu podlogu koja obično djeluje kao prednja površina dovršenog fotonaponskog modula. Ovaj se pristup obično koristi u industriji tankih filmova kadmij-telurida .

*-Svitak u svitak:* Slojevi uređaja nanose se na fleksibilnu podlogu koja se zatim može koristiti kao unutarnji ili vanjski dio dovršenog modula. Istraživači su isprobali ovaj pristup za druge fotonaponske(PV) tehnologije, ali on nije stekao značajnu komercijalnu vuču zbog prepreka za postizanje visoke učinkovitosti solarne konverzije (neovisno o pristupu izrade). Međutim, široko se koristi za proizvodnju fotografskih i kemijskih filmova i proizvoda od papira, poput novina.

Skalabilnost ovih pristupa izradi daje perovskitima potencijal da omoguće brže širenje kapaciteta u odnosu na silicijske fotonaponske elemente. Procesi koji se razmatraju dobro su uspostavljeni u filmskoj i ekranskoj industriji, čineći lance znanja i opskrbe oko alata i komponenata lakim za daljnje smanjenje troškova i rizika. [10]

Dodatne prepreke komercijalizaciji su potencijalni utjecaji na okoliš povezani s apsorberom perovskita koji se temelji na olovu. Kao takvi, proučavaju se alternativni materijali za procjenu, smanjenje, ublažavanje i potencijalno uklanjanje toksičnosti i zabrinutosti za okoliš. [10]

**ČETVRTI PRIORITET - Provjera valjanosti i mogućnost financiranja razvoja:** Provjera valjanosti, provjera učinka i isplativost - osiguravajući spremnost financijskih institucija da financiraju projekt ili prijedlog po razumnim kamatama - ključni su za komercijalizaciju perovskitnih tehnologija. Fleksibilnost u protokolima ispitivanja i minimalni terenski podaci ograničili su mogućnost uspoređivanja performansi perovskite uređaja i razvijanja povjerenja u dugoročno operativno ponašanje. [10]

Trenutni protokoli ispitivanja PV uređaja razvijeni su za postojeće uobičajene PV tehnologije. Oni koriste testiranje u zatvorenom prostoru koristeći protokole potvrđene na temelju desetljeća korelacije s performansama na otvorenom. Možda nisu dobri prediktori dugoročnih performansi novih PV tehnologija na otvorenom. Objektivna, pouzdana provjera valjanosti pomoću testnih protokola koji mogu adekvatno predvidjeti dugoročne performanse na otvorenom presudna je za stjecanje dovoljnog povjerenja u perovskite tehnologije kako bi se omogućilo ulaganje u povećanje i implementaciju proizvodnje. Sastavi materijala i uređaja brzo mijenjajućih fotonaponskih ćelija čine ovu standardiziranu provjeru posebno izazovnom i važnom. [10]

### **3.1.2. Mjerila i ciljevi**

SETO (eng. *Solar Energy Technologies Office*) prati napredak u istraživačko-razvojnoj i proizvodnoj zajednici i surađuje s potencijalnim zainteresiranim subjektima, investitorima, financijerima i krajnjim korisnicima kako bi stvorio mjerila i ciljeve za komercijalnu primjenu fotonaponskih elemenata od perovskita za tržište proizvodnje električne energije. Ta će se mjerila i ciljevi vjerojatno razvijati s povećanim razumijevanjem onoga što će omogućiti proizvodnju i primjenu fotonaponskih elemenata od perovskita na skali od GW. [10]

Slijede razni materijali, strukture uređaja i proizvodne tehnike, a nejasno je koji od ovih pristupa najviše obećava. Ciljevi za perovskitne ćelije i module s jednim spojem bit će različiti od ciljeva za hibridne perovskitne tandeme i potpuno perovskitne tandeme. Slijede neki generalizirani ciljevi u ranoj fazi relevantni za poticanje komercijalizacije PV perovskita. Ciljevi u kasnijoj fazi su u fazi izrade i bit će objavljeni u budućnosti. Kako se perovskit PV komercijalizira, mora postojati ravnoteža između pokazivanja visoke učinkovitosti pretvorbe energije i visoke stabilnosti, korištenjem skalabilnih proizvodnih procesa i skaliranjem od pojedinačnih stanica do više ćelijskih modula s većim aktivnim površinama. Ovdje su navedeni ciljevi za module, a ne za ćelije. Neki

gubitak u učinkovitosti aktivnog područja svojstven je povećanju od ćelija do modula. Da bi se perovskite PV tehnologija pomaknula prema komercijalnoj održivosti, u ranim fazama nužni su ciljevi učinkovitosti pretvorbe energije između 18% i 25%, što se pokazuje s više ćelijskim modulima koji se kreću od desetaka kvadratnih centimetara do četvornih metara. Više od polovice slojeva (uključujući sloj perovskita) u hrpi uređaja treba nanijeti skalabilnim tehnikama taloženja pri relevantnim protocima ili brzinama taloženja za veliku količinu proizvodnje. U početku bi ovi moduli trebali biti sposobni pokazati operativnu stabilnost, zadržavajući 80% do 95% svog izvornog učinka nakon 1.000 sati ubrzanog ispitivanja. Te će brojke trebati dodatno poboljšati u budućnosti kako bi bile reprezentativne za željeni dekadski operativni životni vijek. U međuvremenu, ti ciljevi pružaju korisnu metodologiju koja pomaže zajednici perovskita da poveća pouzdanost. [10]

### 3.2. Fotonaponska tehnologija s koncentriranim Sunčevim zračenjem(CPV)

Koncentrirana fotonaponska (CPV) tehnologija pojavila se na tržištu kao opcionalna opcija za proizvodnju fotonaponske električne energije s kumulativnim 370 MW instalacija, uključujući nekoliko lokacija s više od 30 MW. Koncentrirana fotonaponska industrija se borila sa cijenom fotonaponskih tehnologija, neke glavne tvrtke su izašle s tržišta dok se druge suočavaju s tim da povećaju svoj kapital. Koncentrirani fotonaponski moduli i dalje postižu jako veliku učinkovitost, veću nego što je moguće s tradicionalnom tehnologijom ravnih ploča i imaju prostora za povećanje učinkovitost u budućnosti, pružajući potencijalni put za smanjenje troškova sustava. Ključno načelo CPV-a je upotreba isplative koncentrirane optike koja dramatično smanjuje površinu ćelija, omogućujući upotrebu skupljih ćelija s visokom učinkovitošću i potencijalno poravnati trošak električne energije koji je konkurentan standardnoj tehnologiji ravnih ploča u određenim sunčanim područjima s visokim izravnim zračenjem. [11]



Slika 3.9. Dva uzorka korištenja Fresnelovih leća i uzorak korištenja ogledala kao koncentrirane optike [11]

Koncentrirana fotonaponska tehnologija se koristi za proizvodnju električne energije u onim regijama koje su bogate suncem gdje je vrijednost zračenja veća od  $2000 \text{ kWh/m}^2$ .

Postoje dvije klase koncentriranih fotonaponskih sustava. Prva klasa je visoko koncentrirani fotonaponski sustavi, a druga je nisko koncentrirani fotonaponski sustavi. Kod visoko koncentriranih fotonaponskih sustava koncentracijski omjer je od 300-1000 i imaju mogućnost dvoosnog praćenja sunca. One koriste fotonaponske ćelije s trostrukim spojem izrađene od GaInP/GaInAs/G. Nisko koncentrirani fotonaponski sustavi imaju koncentracijski omjer manji od 100 i koriste jednoosno praćenje, ali mogu koristiti i dvoosno. Nisko koncentrirani fotonaponski sustavi koriste fotonaponske ćelije od kristalnog silicija ili neke druge. [11]

Izvješća pokazuju da su cijene instaliranih sustava za koncentrirane fotonaponske sustave značajno opale otkako je tehnologija uvedena na tržište 2013. godine, a Izvještaj Fraunhofer ISE otkrio je da su instalirane cijene elektrane CPV-a za 10 MW projekte bile između  $1400 \text{ € / kW}$  i  $2200 \text{ € / kW}$ . Širok raspon cijena je rezultat različitih tehnoloških koncepata, kao i novonastalih i regionalno varijabilnih tržišta. Iako su istraživanja ćelija, modula i sustava za CPV u tijeku desetljećima, CPV je na tržište došao tek sredinom 2000-ih. S ukupno više od 300 MW vidio je značajan broj instalacija u razdoblju od 2011. do 2014. godine. Unatoč tome još uvijek predstavlja mladu(novu)tehnologiju i u usporedbi s konvencionalnom tehnologijom ravnih ploča za proizvodnju električne energije, još uvijek je mali „igrač“ na tržištu za fotonaponsku proizvodnju električne energije. To implicira nedostatkom pouzdanih podataka za tržište, cijenama i statusu industrije. [11]

Koncentrirana fotonaponska tehnologija ima svoje bolje i lošije strane. Što se tiče boljih strana ima visoku učinkovitost upotrebe izravnog zračenja, niske temperaturne koeficijente, imaju mogućnost dodatne upotrebe otpadne topline za sustave s aktivnim hlađenjem, mali izdatci za proizvodnju CPV infrastruktura što omogućuje brzi rast, povećana i stabilna proizvodnja električne energije tijekom dana zbog praćenja, jako nisko vrijeme povrata energije, imaju mogućnost dvostruke namjene zemljišta(za poljoprivredu), varijacije u cijeni poluvodiča se ne osjete jako, veći potencijal za povećanje učinkovitosti u budućnosti. Lošije strane su HCPV ne može koristiti difuzno zračenje, a CPV može iskoristiti samo djelić difuznog zračenja, problem praćenja sunca s dovoljnom točnošću, ovisno o mjestu gdje je instalirana CPV elektrana fotonaponske ćelije mogu zahtijevati često čišćenje ćelija kako bi se smanjili gubitci(kako bi više sunca dopiralo na površinu ćelije, a ako je prljava to nije moguće), imaju ograničeno tržište zbog toga što mogu biti instalirane samo u područjima s visokim izravnim sunčevim zračenjem, a teško se postavljaju na krovove kuća, veliko smanjenje cijene silicijskih pločastih modula otežavaju

ulazak na tržište i za one najniže troškove tehnologije, tehnologije nove generacije koje nemaju nikakvu povijest proizvodnje, dodatni optički gubici, nedostatak tehnološke standardizacije... CPV se počeo pojavljivati na tržištu tek nekoliko posljednjih godina. Prva elektrana koja prelazi razinu od 1 MW instaliran je u Španjolskoj 2006. Od tada su komercijalne elektrane instalirane u rasponu MW godišnje, s nekoliko više od 20 MW vršnog kapaciteta. [11]

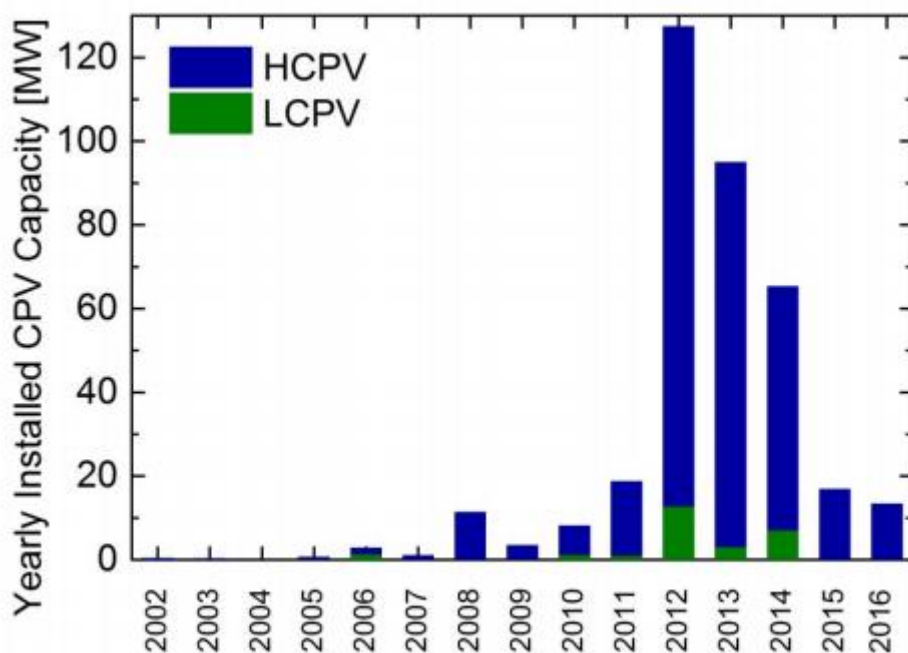


Slika 3.10. Koncentrirana fotonaponska elektrana snage 30MW u Alamosu u Sjedinjenim Američkim Državama [11]

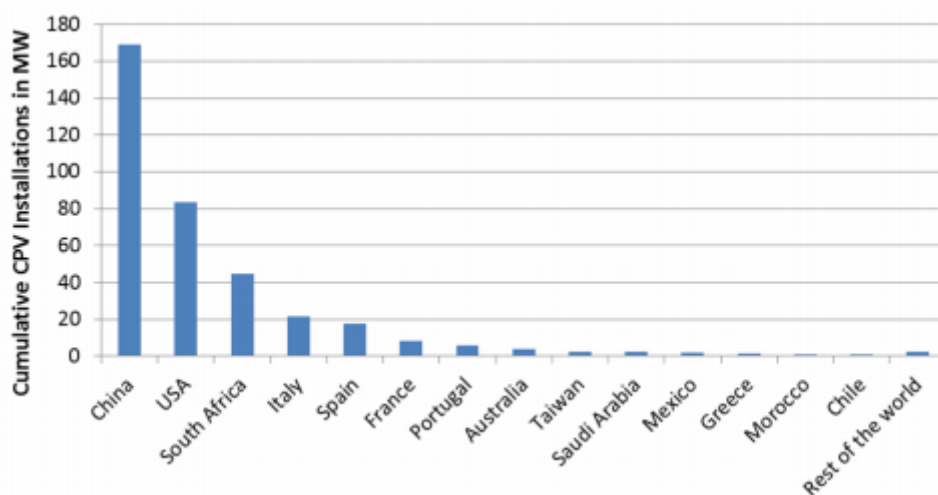


Slika 3.11. Koncentrirana fotonaponska elektrana snage 140 MW u Golmundu u Kini [11]

Najveći udio, više od 90% do danas instaliranih kapaciteta, je u obliku HCPV s dvoosnim praćenjem. HCPV sustavi uglavnom su bili opremljeni kristalno silicijskim koncentracijskim ćelijama prije 2008., od tada višestruke fotonaponske ćelije su postale standard. LCPV sustavi još uvijek koriste ili malo izmijenjeni standard ili kristalno silicijske stanice visoke učinkovitosti. [11]



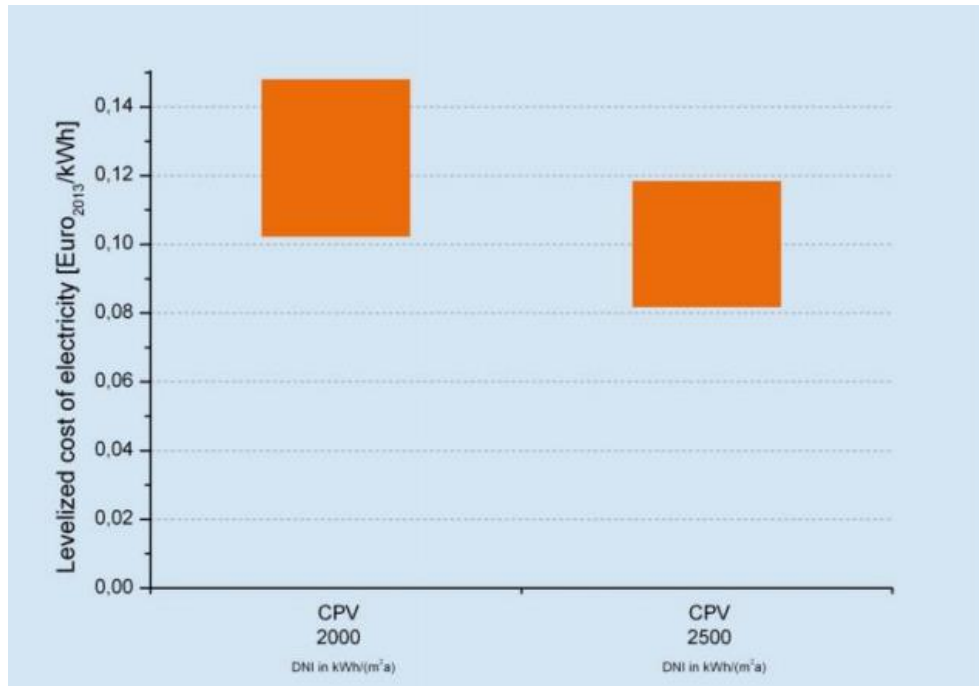
Slika 3.12. Koncentratorski fotonaponski sustavi instalirani svake godine u svijetu sa naznakom tipa sustava [11]



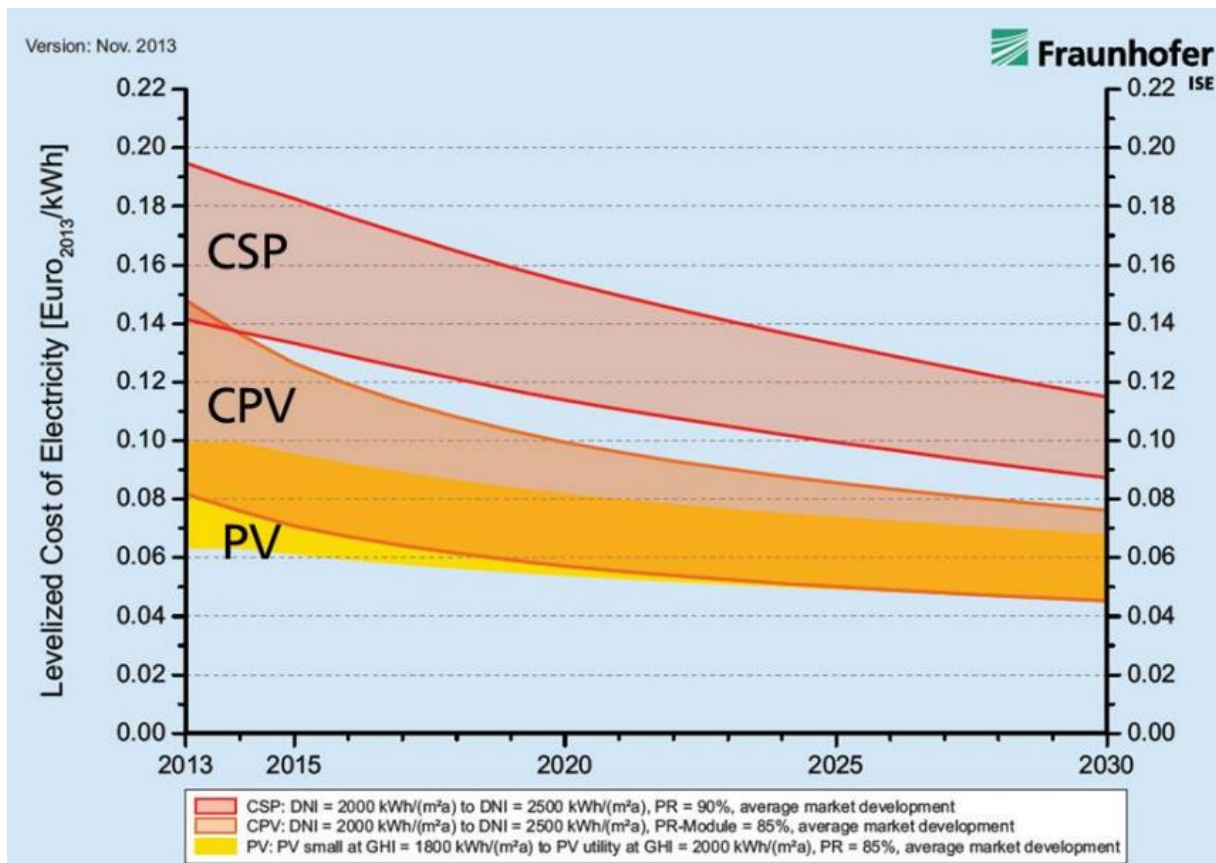
Slika 3.13. Kapaciteti koncentratorskih fotonaponskih sustava koji su povezani na mrežu do kraja 2016.godine [11]

Koristeći tehničke i financijske pretpostavke izračuni rezultiraju u vrijednosti LCOE (eng. *Levelized Cost of Electricity*) za CPV elektrane od 0,10 € / kWh do 0,15 € / kWh na lokacijama sa izravnim normalnim zračenjem od 2000 kWh / m<sup>2</sup> i 0,08 € / kWh do 0,12 € / kWh s 2500 kWh / m<sup>2</sup>. Za CPV i danas postoje velike neizvjesnosti u pogledu budućeg tržišta i razvoja, a time i mogućnost postizanja dodatnih smanjenja troškova kroz tehnološki razvoj. Analiza, međutim, pokazuje da CPV ima potencijal za smanjenje (nivelirani trošak energije), što potiče daljnji razvoj tih tehnologija. Ako instalacije nastave rasti do 2030. godine, CPV bi mogao doseći trošak

u rasponu od 0,045 € / kWh do 0,075 € / kWh . Cijene sustava, uključujući instalacije za CPV elektrane tada bi iznosile između 700 € i 1100 € / kW. Današnji niski troškovi za fotonaponske sustave s ravnim pločama motivirali su koncentrirane fotonaponske tvrtke da dalje inoviraju svoj dizajn kako bi postigle još niže troškove od ovih, odražava se nedavnim smanjenjem razvoja, dok tvrtke preispituju njihov dizajn. [11]



Slika 3.14. Nivelirani trošak energije za koncentrirane fotonaponske sustave kada imamo jako sunčevo zračenje od 2000kWh/m<sup>2</sup> i 2500kWh/m<sup>2</sup> [11]



Slika 3.15. Razvoj niveliranog troška energije fotonapona, sunčeve koncentrirane snage i koncentriranih fotonaponskih postrojenja na mjestima s visokim sunčevim zračenjem

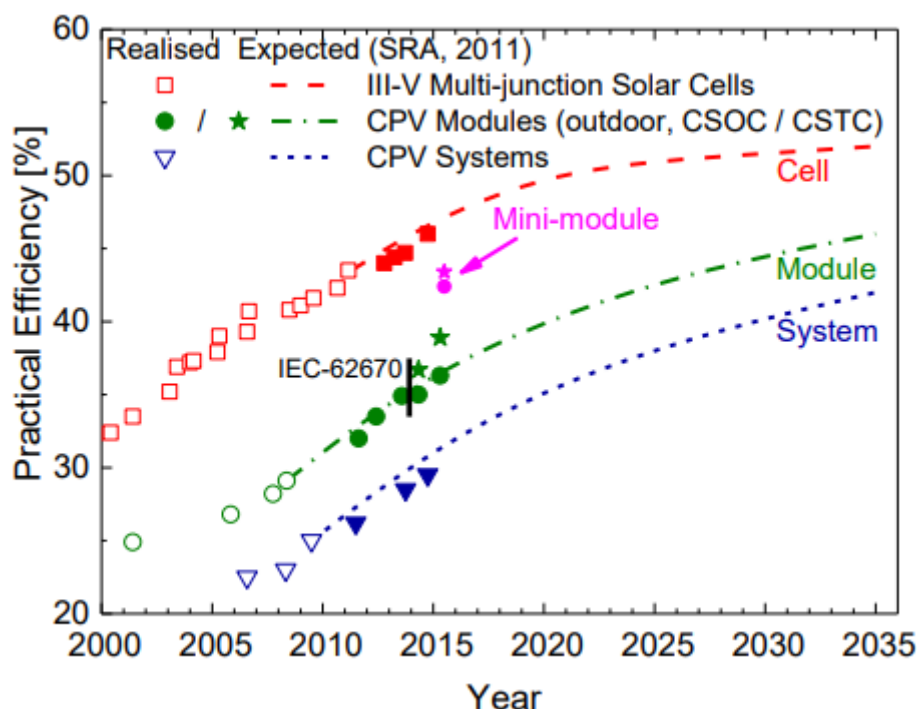
2000 kWh / m<sup>2</sup> - 2500 kWh / m<sup>2</sup> [11]

Visoka učinkovitost jedan je od ključnih elementa koji HCPV čini cjenovno konkurentnijim na LCOE razini. Stoga većina napora u istraživanju teži ka povećavanju učinkovitosti na svim razinama, od ćelije i modula pa sve do sustava. [11]

Slika prikazuje povećanje učinkovitosti od 2000. godine i naglašava napredak postignut istraživanjem i razvojnim naporima. Linije trendova temelje se na očekivanjima Europskog fotonaponskog sustava Tehnološke platforme 2011. [11]

Učinkovitost laboratorijskih ćelija dosegla je 46%, a CPV modul 38.9%. Potrebno je napomenuti da se vrijednosti odnose na velike module s više leća. Mini modul koji se sastoji od jedne cjelovite staklene leće i GaInP / GaAs / GaInAsP / GaInAs ćelije postigli su rekordnu učinkovitost od 43.4%. Danas je predviđen još značajniji potencijal za veću učinkovitost. Ovo poglavlje za cilj ima sažeti odgovarajući razvoj u CPV istraživanju i tehnologiji posljednjih godina što može dovesti do dodatnih poboljšanja učinkovitosti. [11]

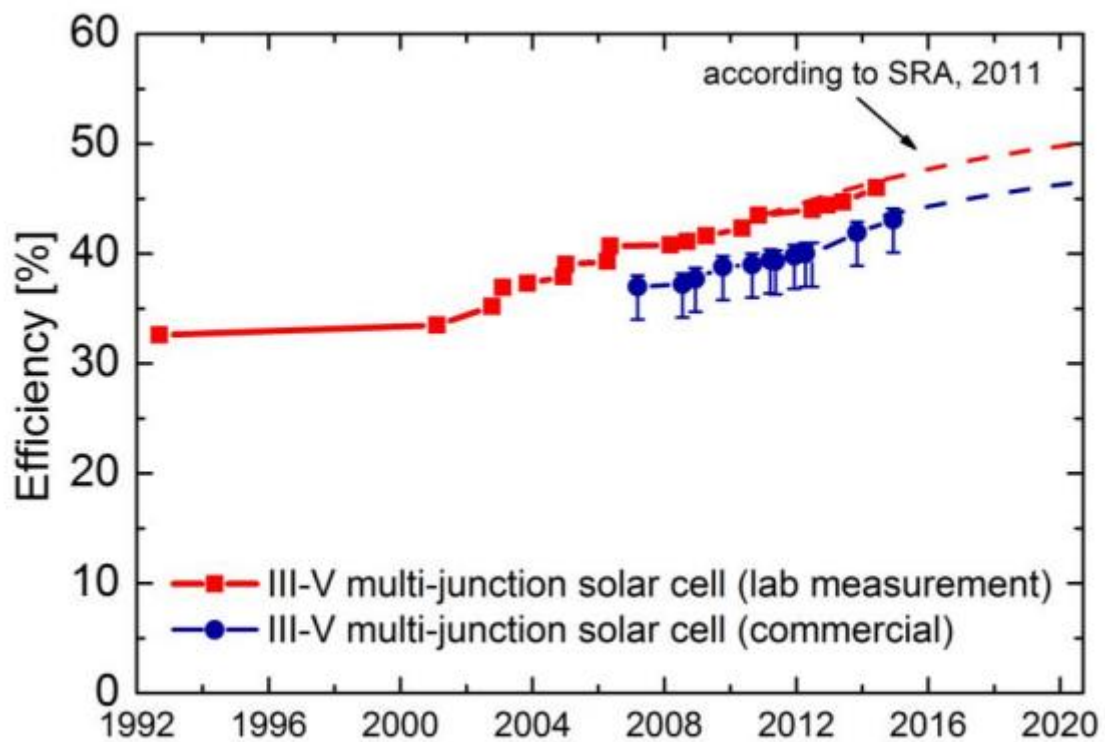




Slika 3.16. Razvoj rekordne učinkovitosti višenamjenskih fotonaponskih ćelija III-V i CPV modula [11]

Na slici je naznačen i napredak u vrhunskoj učinkovitosti CPV sustava. Linije pokazuju očekivanu učinkovitosti iz Agende strateških istraživanja (SRA) koju je razvila Europska Tehnološka platforma za foto napone u 2011. Najnovije vrijednosti učinkovitosti vrlo dobro prate trend. [11]

Učinkovitost III-V fotonaponskih ćelija s više spojeva ključni je pokretač smanjenja niveliranog troška energije proizvedene HCPV tehnologijom. Od 2002. učinkovitost se povećala za oko 0,9% apsolutno godišnje. Fotonaponske ćelije koje su napravili Sharp i Fraunhofer ISE dostigli su do sada jako veliku učinkovitost od 44,4% i 46,0% za tročlane i četveročlane fotonaponske sustave ćelija. Prema podacima o proizvodima tvrtki, danas su fotonaponske ćelije s više spojeva komercijalno dostupne s učinkovitošću između 38% i 43%. [11]



Slika 3.17. Razvoj učinkovitosti III-V fotonaponskih ćelija sa više spojeva pod koncentriranim svjetlom [11]

Sa slike gore možemo vidjeti kako se u posljednje vrijeme značajno povećala učinkovitost fotonaponskih ćelija ,a to ukazuje da su nova istraživanja dobra i da se brzo prilagođavaju na proizvodnju. [11]

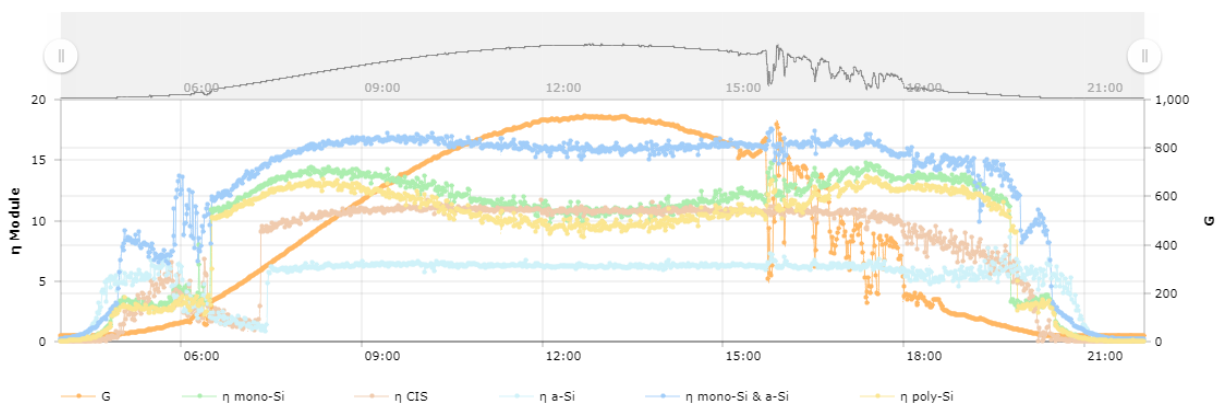
## 4. Usporedba energetske karakteristike različitih tehnologija fotonaponskih modula u Laboratoriju za obnovljive izvore energije.

U praktičnom dijelu zadatka izvršena je usporedba mjerenja energetske karakteristike različitih tehnologija fotonaponskih modula u Laboratoriju za obnovljive izvore energije Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Fakultet uz elektranu i svoje testno polje na kojem je postavljeno pet fotonaponskih modula različitih tehnologija:

- 1) Monokristalnog silicija (mono-Si),
- 2) Bakra, indija i selenida (CIS),
- 3) Amornog silicija (a-Si),
- 4) Spoja monokristalnog silicija i Amornog silicija (mono-Si + a-Si, eng. *heterojunction, HTJ*),
- 5) Polikristalnog silicija (poly-Si).

Mjerenje je provedeno za dan 20.6.2021. godine. Taj dan je bilo sunčano većinu dana sve do 15:40h kada je došao oblak pa će se utjecaj promjenjivog vremena moći vidjeti na grafovima koji će biti prikazani na slikama. Slijedi usporedba energetske karakteristike modula gore opisanih tehnologija.

### 4.1. Učinkovitost modula

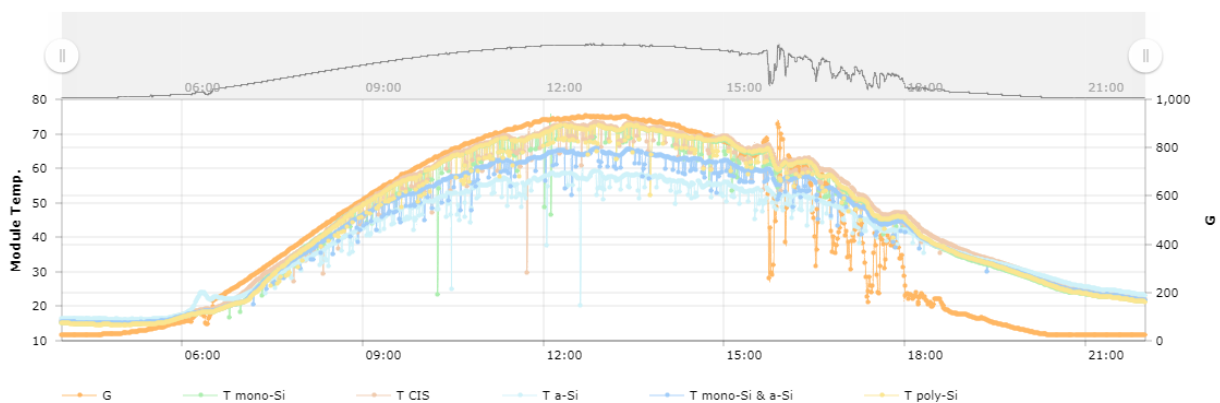


Slika 4.1. Učinkovitost fotonaponskih modula [12]

Učinkovitost pojedinih modula u standardnim testnim uvjetima (eng. *Standard Test Conditions, STC*) nikada neće biti dostignuta u mjerenjima s obzirom na nižu vrijednost Sunčenog zračenja a višu temperaturu. Naime, u standardnim testnim uvjetima pri  $1000 \text{ W/m}^2$  uz temperaturu modula

od 25 °C, modul od monokristalnog silicija može postići učinkovitost od 15,3%, modul od bakra, indija i selenida 12,2%, modul od spoja monokristalnog i amornog silicija 19%, modul od amornog silicija 7% , a modul od polikristalnog silicija 15,3%.

Sa slike možemo vidjeti kako najveću učinkovitost ima modul koji je kombinacija monokristalnog silicija i amornog silicija. Njegova učinkovitost za najtopliji dio dana (kada je najjače sunčevo zračenje od preko 900 W/m<sup>2</sup>) iznosi 16,1%. Najmanju učinkovitost ima fotonaponski modul načinjen od amornog silicija i ona za najtopliji dio dana iznosi 6,2%. Učinkovitost fotonaponskog modula od polikristalnog silicija za najtopliji dio dana iznosi 9,9%, za monokristalni silicij 10,8%, a za modul od galij, indij selenida 10,82%. Možemo primijetiti kako je u jednom trenutku prije nego je nastupilo najjače sunčevo zračenje učinkovitost modula bila malo veća, a to je zbog toga što ako se modul previše zagrije smanjuje mu se učinkovitost.

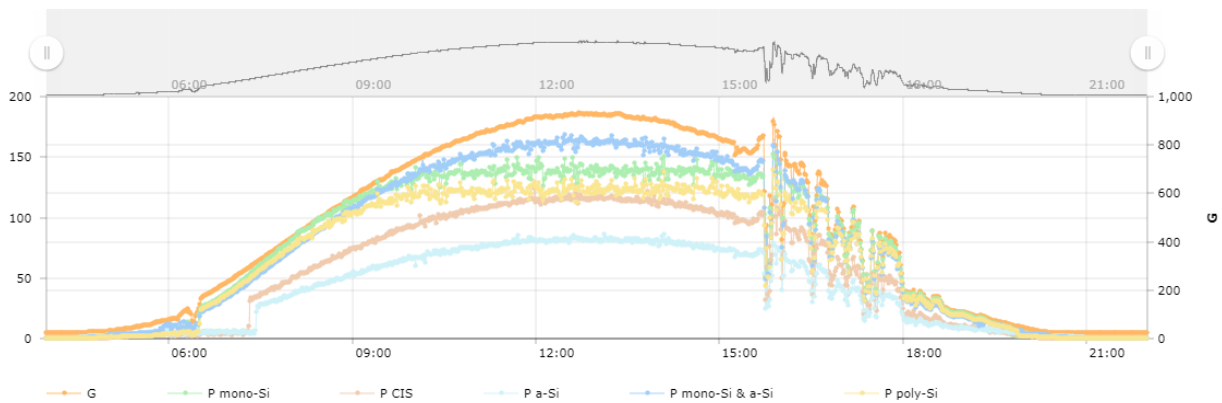


Slika 4.2. Temperatura fotonaponskih modula [13]

Kao što se može vidjeti na slici 4.2. temperatura fotonaponskog modula je rasla kako se pojačavalo sunčevo zračenje. Može se primijetiti kako modul s najvećom učinkovitošću ima nižu temperaturu nego moduli koji imaju manju učinkovitost. Uspoređujući grafove sa slika 4.1. i 4.2. vidimo kako modul koji je kombinacija monokristalnog silicija i amornog silicija (HTJ) ima najveću učinkovitost pri temperaturi modula oko 55°C, dok moduli načinjeni od monokristalnog silicija i polikristalnog silicija imaju najveću učinkovitost pri temperaturi modula oko 40°C.

Možemo primijetiti kako kada naiđe oblak temperatura modula počinje opadati, a učinkovitost modula od polikristalnog silicija, monokristalnog silicija i od modula načinjenog od kombinacije monokristalnog i amornog silicija se povećava iz razloga što se malo ohlade i dolaze do temperature pod kojom imaju najveću učinkovitost. Moduli od amornog silicija i od CIS (bakar, indij, selenid) imaju smanjenju učinkovitost kada oblak naiđe.

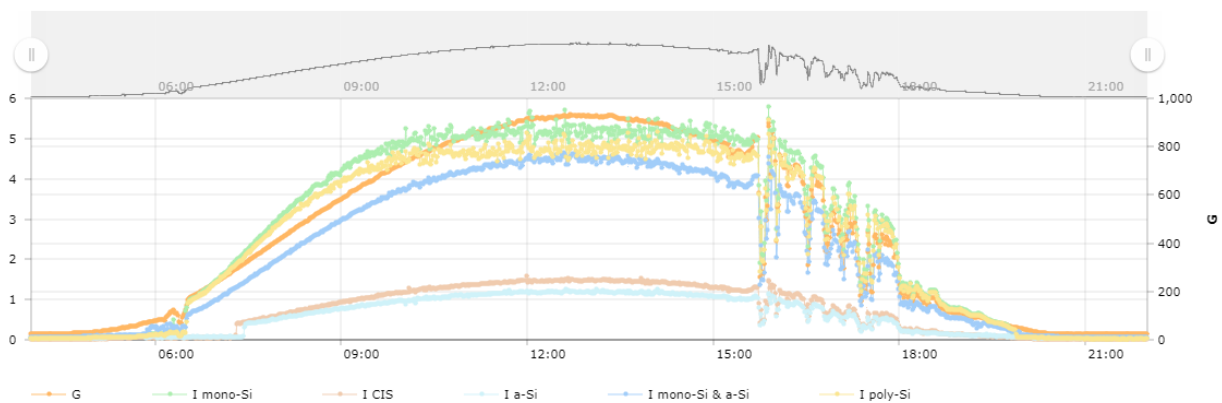
## 4.2. Maksimalna snaga modula



Slika 4.3. Točka maksimalne snage za navedene fotonaponske module[14]

Sa slike gore može se vidjeti da najveći iznos maksimalne snage ima spoj monokristalnog i amornog silicija (HTJ). Najmanju točku maksimalne snage ima modul koji je načinjen od amornog silicija. Možemo primijetiti kako se točka maksimalne snage naglo spustila u onom trenutku kada je došao oblak.

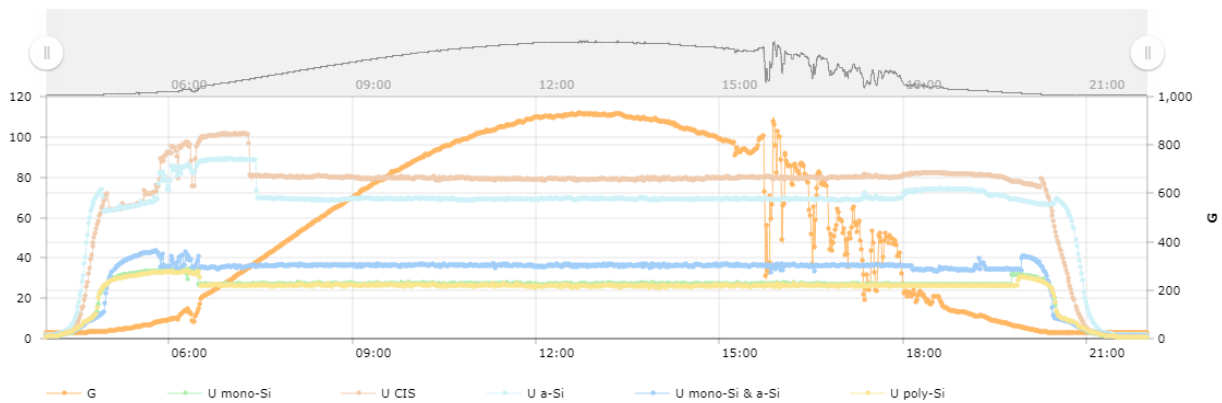
## 4.3. Struja modula



Slika 4.4. Iznos struje na modulima [15]

Očitavanjem sa slike vidimo da najveću vršnu struju ima modul od monokristalnog silicija, a najmanju modul načinjen od amornog silicija što je vezano uz karakteristike serijsko-paralaleno spoja i izlazne snage samih modula. U trenutku nailaska oblaka vidimo nagli pad iznosa struje na modulima i gotovo linearni odziv struje modula na jakost Sunčevog zračenja u skladu s strujno-naponskim karakteristikama modula.

## 4.4. Napon modula



Slika 4.5. Iznos napona na modulima[16]

Prema slici 4.5. vidimo da najveći iznos napona ima modul od bakra, indija i selenida, a najmanji iznos napona modul od polikristalnog silicija. Napon na svakom modulu je naglo porastao tijekom zore u ovisnosti o Sunčevom zračenju i onda se ustalio na određenoj vrijednosti (za svaki modul jedna ustaljena vrijednost napona) s postupnim smanjenjem odnosno povećanjem vezanim uz zagrijavanje (tijekom sunčanog razdoblja) odnosno hlađenje (tijekom promjenjivog razdoblja) samih modula. Tijekom sumraka počeo opadati za svaki modul u skladu s strujno-naponskim karakteristikama modula.

## 5. Zaključak

Povećanjem uporabe obnovljivih izvora energije dolazi do toga da proizvođači teže razvijanju elektrana na obnovljive izvore energije kako bi imale što veću učinkovitost. Uporabom obnovljivih izvora energije ne moramo strahovati da će nam u jednom trenutku ponestati „goriva“ za proizvodnju električne energije. Jedini problem je to što Sunčevo zračenje je obnovljivi izvor energije koji ne može proizvesti istu količinu zračenja svaki dan tijekom godine jer se mijenjaju vanjski uvjeti (godišnja doba, promjena vremena), ali znamo da nam Sunca nikada neće ponestati. Upravo zbog toga što je Sunce svima dostupno danas se sve više koriste fotonaponski moduli za proizvodnju električne energije.

S vremenom kako se fotonaponska tehnologija razvijala tako se i smanjivao trošak za proizvodnju pojedinih fotonaponskih modula, a povećavala učinkovitost. Fotonaponski moduli imaju manju učinkovitost od ćelija zbog gubitaka, ali se ta učinkovitost povećava. Proizvodnja električne energije pomoću fotonaponskih modula se svake godine povećava jer se ljudi sve više odlučuju za taj način proizvodnje električne energije.

U poglavlju 3. možemo vidjeti da danas najveću učinkovitost imaju više-spojne ćelije i moduli. Dodatak tim ćelijama je koncentrador koji još više povećava učinkovitost. Takve ćelije i moduli imaju veću cijenu, ali daljnjim razvojem bi se ta cijena smanjivala. Upravo zbog te velike učinkovitosti bi trebali težiti razvoju takvih fotonaponskih tehnologija jer bi dodatna poboljšanja samo mogla povećati tu učinkovitost. Od novih tehnologija treba istaknuti Perovskite fotonaponske ćelije koji za sada imaju izrazito veliku učinkovitost u odnosu na ostale nove tehnologije, ali se i dalje razvijaju takvi sustavi proizvodnje električne energije.

Iz poglavlja 4. vidimo da ako se smanji iznos sunčevog zračenja i modul se ohladi smanjuje se učinkovitost tog modula. U pokusu mjerenja taj iznos se smanjio zbog toga što je naišao oblak, ali isto tako učinkovitost fotonaponskih modula može biti manja i ako ima nekakve prljavštine na modulu ili ako se modul postavi u sjenovito područje. Jako je bitno pri postavljanju modula postaviti na ga na način da bude izložen direktnom sunčevom zračenju što više vremena jer ako se stavi na neku površinu koja je u sjeni neće se iskoristavati puni potencijal modula, nego će se proizvoditi samo dio električne energije. Baš zbog toga što treba što više sunčevog zračenja dopirati do površine modula se razvija Fotonaponska tehnologija s koncentriranim sunčevim zračenjem. Iako je još u procesu razvoja svoju primjenu nalazi u područjima izloženim jakim sunčevim zračenjem širom svijeta.

U Hrvatskoj postoji potencijal za proizvodnjom električne energije iz sunčevog zračenja, ali je potrebno dati poticaje kako bi se ljudi odlučili za proizvodnju električne energije fotonaponskim modulima.



## Literatura

- [1] Damir Šljivac, Danijel Topić: Obnovljivi izvori električne energije, sveučilišni udžbenik, FERIT Osijek, 2018.
- [2] <http://www.solarna-energija.rs/solarni-paneli/tipovi-solarnih-panela> (02.09.2021)
- [3] [https://www.sbb-battery.com/Battery\\_View.asp?ClassID=&ID=760](https://www.sbb-battery.com/Battery_View.asp?ClassID=&ID=760) (02.09.2021)
- [4] <https://nice-solarenergy.com/en/cigs-modules.html> (02.09.2021)
- [5] <https://www.slideserve.com/huslu/elektrostrojarska-kola-vara-din> (02.09.2021)
- [6] <https://eko-modul.hr/solarna-energija/> (02.09.2021)
- [7] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE with support of PSE Projects GmbH: PHOTOVOLTAICS REPORT, Freiburg, 27 July 2021
- [8] <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (27.07.2021)
- [9] <https://www.nrel.gov/pv/module-efficiency.html> (27.07.2021)
- [10] <https://www.energy.gov/eere/solar/perovskite-solar-cells> (24.07.2021)
- [11] <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/studie-current-status-of-concentrator-photovoltaic-cpv-technology.html> (24.07.2021)
- [12] <https://reslab.ferit.hr/?measurements=2021-06-20&par=n#v> (07.09.2021)
- [13] <https://reslab.ferit.hr/?measurements=2021-06-20&par=T#v> (07.09.2021)
- [14] <https://reslab.ferit.hr/?measurements=2021-06-20&par=Pdc#v> (07.09.2021)
- [15] <https://reslab.ferit.hr/?measurements=2021-06-20&par=Idc#v> (07.09.2021)
- [16] <https://reslab.ferit.hr/?measurements=2021-06-20&par=Udc#v> (07.09.2021)

## SAŽETAK

Zadatak ovog završnog rada je prikazati koje su to nove tehnologije fotonaponskih modula i opisati ih. U radu je objašnjen način fotonaponske pretvorbe sunčevog zračenja u električnu energiju i navedeni su osnovni tehnološki pravci fotonaponskih modula. Nove tehnologije fotonaponskih modula predstavljaju te osnovne tehnološke pravce, ali kao razvijenije ili nove koncepte fotonaponskih modula koji se još uvijek razvijaju. Novi koncepti fotonaponskih modula objašnjeni u radu su Perovskite fotonaponske ćelije i Fotonaponska tehnologija s koncentriranim sunčevim zračenjem koja ima mogućnost praćenja sunca. U radu su provedena mjerenja za jedan dan na različitim fotonaponskim modulima gdje se moglo vidjeti kako se koji modul ponaša u slučaju jakog sunčevog zračenja ili u slučaju nailaska oblaka, odnosno stvaranja sjene na modul.

**Ključne riječi:** fotonaponski modul, fotonaponska pretvorba, novi koncepti, sunčevo zračenje, Perovskite fotonaponske ćelije

## ABSTRACT

The task of this final paper is to show what are the new technologies of photovoltaic modules and to describe them. The paper explains the method of photovoltaic conversion of solar radiation into electricity and lists the basic technological directions of photovoltaic modules. New technologies of photovoltaic modules represent these basic technological directions, but as more developed or new concepts of photovoltaic modules that are still being developed. The new concepts of photovoltaic modules explained in the paper are Perovskite photovoltaic cells and Photovoltaic technology with concentrated solar radiation that has the ability to monitor the sun. In this paper, measurements were performed for one day on different photovoltaic modules where it was possible to see how each module behaves in the case of strong solar radiation or in the case of clouds, or the creation of shadows on the module.

**Key words:** photovoltaic module, photovoltaic conversion, new concepts, solar radiation, Perovskite photovoltaic cells