

# Sunčevo zračenje i sunčana ćelija

---

**Matijević, Mirko Ivan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Split, Faculty of Maritime Studies / Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:164:196804>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-20**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository - Faculty of Maritime Studies - Split -  
Repository - Faculty of Maritime Studies Split for  
permanent storage and preservation of digital  
resources of the institution](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
POMORSKI FAKULTET U SPLITU**

**MIRKO IVAN MATIJEVIĆ**

**SUNČEVO ZRAČENJE I SUNČANA  
ĆELIJA**

**ZAVRŠNI RAD**

**SPLIT, 2023.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
POMORSKI FAKULTET U SPLITU**

**STUDIJ: POMORSKE ELEKTROTEHNIČKE I INFORMATIČKE  
TEHNOLOGIJE**

**SUNČEVO ZRAČENJE I SUNČANA  
ĆELIJA**

**ZAVRŠNI RAD**

**MENTOR:  
dr. sc. Igor Vujović**

**STUDENT:  
Mirko Ivan Matijević  
(MB:0171272466)**

**SPLIT, 2023.**

## SAŽETAK

U ovome radu opisano je Sunčevo zračenje kao obnovljivi izvor energije, svi njegovi parametri, od čega se sastoji te kako se može iskoristiti za proizvodnju električne energije pomoću fotonaponskih ćelija. Navedeni su i opisani parametri sunčanih ćelija i o čemu ovisi i kako se izračunava količina energije dobivena fotonaponskom konverzijom.

**Ključne riječi:** *sunčevo zračenje, sunčana ćelija, solarna konstanta, ozračenost, fotonaponska konverzija*

## ABSTRACT

This paper describes solar radiation as a renewable source of energy, all its parameters, what it consists of, and how it can be used to produce electrical energy by usage of photovoltaic cells. The parameters of solar cells are listed and described, what they depend on and how the amount of energy obtained by photovoltaic conversion can be calculated.

**Keywords:** *solar radiation, solar cells, solar constant, radiation, photovoltaic conversion*

## SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>5</b>
<b>2. OBNOVLJIVI IZVORI ELEKTRIČNE ENERGIJE .....</b>	<b>6</b>
<b>3. SUNČEVO ZRAČENJE .....</b>	<b>8</b>
<b>3.1. PRIVIDNO GIBANJE SUNCA.....</b>	<b>9</b>
<b>3.2. EKSTRATERESTIČKO I PRIZEMNO SUNČEVO ZRAČENJE.....</b>	<b>11</b>
<b>3.3. MJERENJE I PRORAČUN PRIZEMNOG SUNČEVOG ZRAČENJA .....</b>	<b>14</b>
<b>3.3.1. MJERENJE SUNČEVOG ZRAČENJA .....</b>	<b>14</b>
<b>3.3.2. PRORAČUN PRIZEMNOG SUČEVOG ZRAČENJA .....</b>	<b>15</b>
<b>4. SUNČANA ĆELIJA.....</b>	<b>18</b>
<b>4.1. PARAMETRI SUNČANE ĆELIJE .....</b>	<b>22</b>
<b>4.2. SNAGA I DJELOTVORNOST SUNČANE ĆELIJE.....</b>	<b>25</b>
<b>4.2.1. SNAGA SUNČANE ĆELIJE.....</b>	<b>25</b>
<b>4.2.2. DJELOTVORNOST SUNČANE ĆELIJE.....</b>	<b>26</b>
<b>4.3. ANTIREFLEKSIJSKI SLOJEVI .....</b>	<b>27</b>
<b>4.4. VRSTE SUNČANIH ĆELIJA.....</b>	<b>29</b>
<b>4.4.1. ĆELIJE OD MONOKRISTALIČNOG I POLIKRISTALIČNOG SILICIJA .....</b>	<b>29</b>
<b>4.4.2. ĆELIJE OD AMORFNOG SILICIJA .....</b>	<b>30</b>
<b>5. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>34</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>35</b>
<b>POPIS SLIKA .....</b>	<b>36</b>
<b>POPIS TABLICA.....</b>	<b>37</b>

## 1. UVOD

U posljednje vrijeme interes za obnovljivim izvorima energije, među kojima je i solarna energija, je u porastu te se njima pridaje veliki značaj u proizvodnji električne energije. Sunčeva ili solarna energija je resurs koji je u većoj ili manjoj mjeri dostupan svim ljudima, ovisno o geografskom položaju. Ova se energija u vidu svjetlosti i topline širi u svemiru, pa tako jedan manji dio dolazi i do Zemlje. Sunčevo zračenje osim što u velikim količinama može biti štetno za ljudsko zdravlje, također se može iskoristiti za proizvodnju električne energije kao obnovljivi izvor energije. Neki od ostalih obnovljivih izvora energije su vjetar, morske mijene, hidroenergija, hidrotermalna voda...

Cilj ovoga rada je prikazati sunčevo zračenje kao jednim od boljih i efikasnijih alternativnih (obnovljivih) izvora električne energije. Također, opisati sve prednosti i mane kod instalacija, troškova, energetske učinkovitosti u odnosu na ostale izvore.

Rad je podijeljen na pet poglavlja, pri čemu je uvod prvo od njih.

U drugom poglavlju ukratko su opisani obnovljivi izvori energije kao što su vjetar, voda, morske mijene itd.

Treće poglavlje opisuje Sunce i sunčevo zračenje, njegovo gibanje i ozračenje Zemljine površine te sve parametre o čemu ovisi i kako se mjere.

Četvrto poglavlje se odnosi na sunčanu ćeliju i procese koji se odvijaju unutar sunčane ćelije kao što su fotonaponska konverzija i elektromotorna sila, sve njihove parametre te kako se izračunavaju.

U petom poglavlju, koje je ujedno i završno poglavlje, donesen je zaključak rada.

## 2. OBNOVLJIVI IZVORI ELEKTRIČNE ENERGIJE

Obnovljivi izvori energije, obnovljivi izvori dobara ili obnovljivi resursi su izvori materijala ili energije koji se stalno ili određenim postupcima obnavljaju pa se tako mogu iskorištavati bez iscrpljivanja. Neki od obnovljivih izvora su Sunce, vjetar (vjetroelektrane), morske mijene (elektrane na plimu i oseku), hidroenergija energija valova itd.

Hidroenergija, hidraulička energija ili energija vode je snaga dobivena iz sile ili energije tekuće vodene mase, koja se može upotrijebiti u čovjeku korisne svrhe.



**Slika 1. Hidroelektrana [2]**

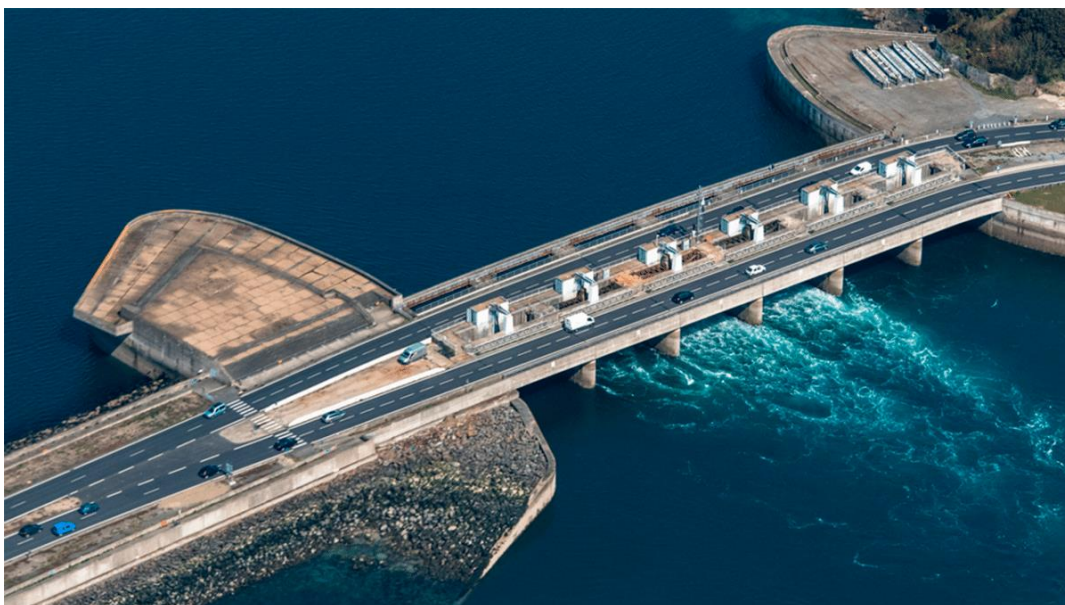
Energija vjetra se u vjetroelektranama iz mehaničke energije pretvara u korisnu električnu energiju, a vjetroelektrane se sastoje od vjetrenjača koje mogu biti raznih dimenzija i nazivnih snaga koje daju.

Za primjer Vjetroelektrana Trtar-Krtolin sastoji se od 14 vjetrenjača nazivnih snaga 0.8 MW, te ukupna snaga vjetroelektrane iznosi 14.2 MW.



**Slika 2. Vjetroelektrana Trtat-Krtolin [2]**

Energija plime i oseke spada u oblik hidroenergije koja gibanje mora uzrokovano mjesečevim mijenama ili padom i porastom razine mora koristi za pretvorbu u električnu energiju i druge oblike energije. Ovaj način dobivanja električne energije ograničen je na one dijelove svijeta gdje su morske mijene izraženije.



**Slika 3. Elektrana na plimu i oseku [2]**



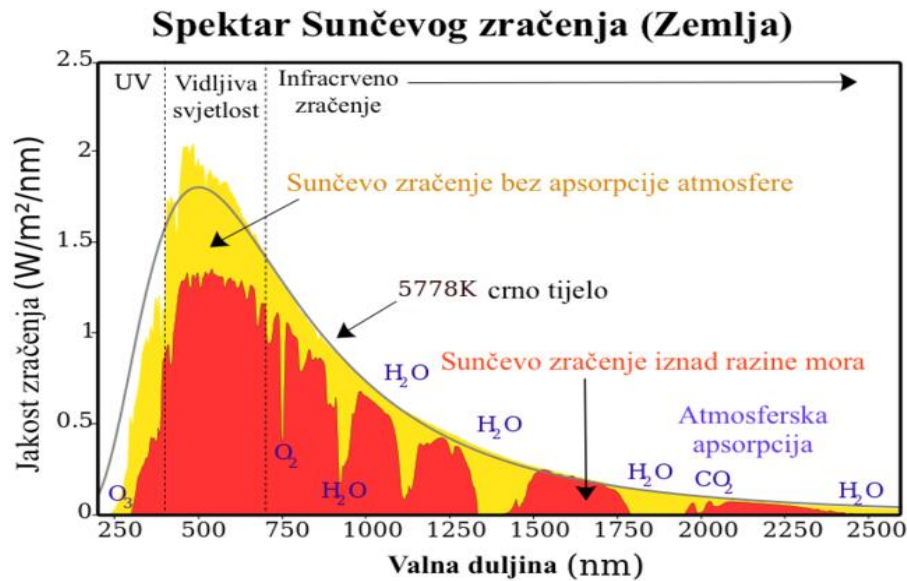
### 3. SUNČEVO ZRAČENJE

Sunčevo zračenje je osnovni energetski izvor za sve procese u Zemljinj atmosferi. Pri proračunavanju i projektiranju sunčanih uređaja potrebno je poznavati energiju Sunčeva zračenja koje upada na plohu kolektora. Sunčevo zračenje različito je na različitim mjestima, ovisi o klimatskim uvjetima područja i mijenja se tijekom dana, mjeseca i godine. U meteorologiji se mjeri zračenje na horizontalnu plohu i za mnogo mjesta postoje takvi podaci o ukupnom, globalnom Sunčevu zračenju.

Sunčevo zračenje sastoji se od izravne (direktne) i raspršene (difuzne) komponente. Izravno Sunčevo zračenje jest ono koje dopire do uređaja izravno iz prividnog smjera Sunca, a raspršeno zračenje nastaje raspršenjem Sunčevih zraka u atmosferi i dolazi na uređaj iz svih smjerova neba.

Nagnuta ploha (npr. kolektor) osim izravnog i raspršenog zračenja prima i zračenje reflektirano (odbijeno) od okolnih površina. Ukupno zračenje koje upada na uređaj sastoji se dakle od tri dijela: izravnog, raspršenog i odbijenog zračenja. Snaga koju Sunce odašilje iznosi oko  $3.8 \times 10^{23} \text{ kW}$ , odnosno godišnje oko  $3.3 \times 10^{27} \text{ kWh}$ . Od toga dopire do Zemlje oko  $1.7 \times 10^{14} \text{ kW}$ .

Spektar Sunca približno odgovara spektru crnog tijela ugrijanog na temperaturu 5760 K. Naravno, ne smije se zaboraviti da se temperatura Sunca mijena od unutrašnjosti (gdje je oko  $10^7 \text{ K}$ ) prema površini, ali i u slojevima same površine. Temperaturu 5760 K možemo odrediti kao efektivnu temperaturu Sunčeve površine s pomoću koje primjenom Stefan-Boltzmanova, Wienova i Plackova zakona možemo proračunati energijski spektar Sunčeva zračenja.



**Slika 4. Spektar Sunca [3]**

### 3.1. PRIVIDNO GIBANJE SUNCA

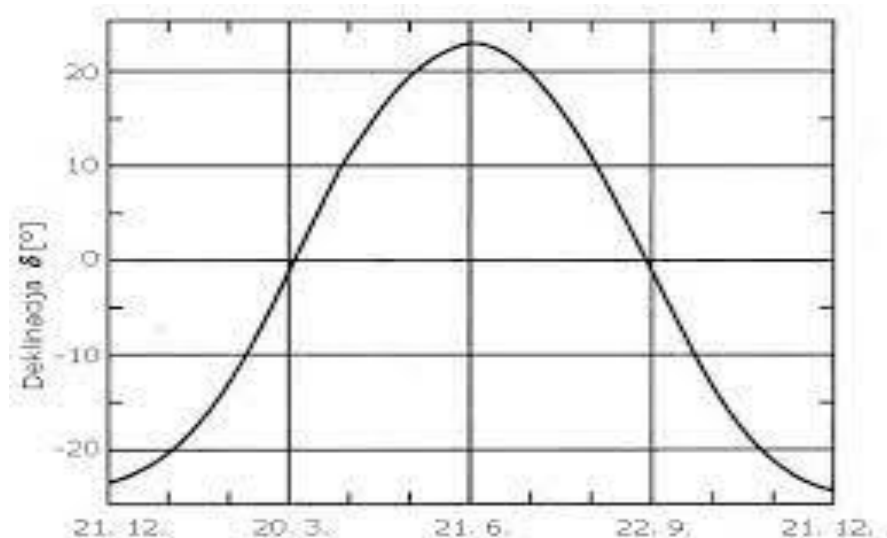
Iako se Zemlja giba oko Sunca, za razmatranje mogućnosti energetskog iskorištavanja Sunčeva zračenja pogodnije je promatrati prividno gibanje Sunca u odnosu na nepomičnu površinu Zemlje

Deklinacija Sunca ( $\delta$ ) je kut između spojnice središta Zemlje i središta Sunca te ravnine u kojoj leži ekvador. Ravnina ekvatora zatvara kut od  $23,45^\circ$  s ravninom Zemljine putanje. Deklinacija Sunca ovisi o danu u godini i mijena se od  $-23,45^\circ$  (21. Prosinca) do  $+23,45^\circ$  (21. Lipnja).

Vrijednost deklinacije može se izračunati pomoću aproksimacijskog izraza:

$$\delta = 23,45^\circ \sin\left(\frac{284 + n}{365} * 360^\circ\right)$$

Gdje je:  $\delta$ -deklinacija Sunca  
n-redni broj dana u godini



**Slika 5. Godišnji hod deklinacije Sunca [1]**

Mjerenja i proračuni Sunčeva zračenja provode se prema pravom Sunčevu vremenu. Da bi se iz mjesnog odredilo sunčano vrijeme, potrebno je poznavati zemljopisnu duljinu  $\lambda$ , vremensku zonu promatranog područja i korekcijski član  $\Delta t_v$  kojim se uzima u obzir nepravilnost Zemljine putanje i rotacije. Za mjesta na referentnom meridijanu (koji za srednjeeuropsko vrijeme iznosi  $\lambda_{st} = 15^\circ$  E) pravo sunčano vrijeme dobija se tako da se mjesnom vremenu doda član  $\Delta t_v$ . Ako mjesto nije na mjesnom meridijanu za svaki stupanj odstupanja od referentnog meridijana prema zapadu treba dodati 4 min. Veza između sunčanog  $t_s$  i mjesnog vremena  $t_{mj}$  je:

$$t_s = t_{mj} - (\lambda_{st} - \lambda_{mj}) + \Delta t_v$$

Satni kut Sunca ( $\omega$ ) vrijeme je izraženo pomoću kuta, a računa se počevši od sunčanog podneva. To je doba dana kad je Sunce u najvišem položaju i taj trenutak odgovara kutu  $\omega = 0^\circ$ . Određuje se tako da se vremenski interval od sunčanog podneva u satima pomnoži sa  $15^\circ$ . Prijepodneveni satni kut ima negativan, a poslijepodneveni pozitivan predznak.

Visina Sunca ( $\alpha$ ) kut je između sunčevih zraka i horizontalne plohe, a može se odrediti iz izraza:

$$\sin \alpha = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega$$

Gdje je:       $\varphi$ -zemljopisna širina  
                   $\delta$ -deklinacija Sunca  
                   $\omega$ -satni kut sunca

Sunčev azimut ( $\Psi$ ) jest kut između projekcije sunčeve zrake na horizontalnu plohu smjera sjever-jug u horizontalnoj ravnini. Obično se uzima da je  $\Psi = 0$  kada je Sunce na jugu, pozitivan je prema istoku, a negativan prema zapadu.

### 3.2. EKSTRATERESTIČKO I PRIZEMNO SUNČEVO ZRAČENJE

Sunčevo zračenje na ulazu u Zemljinu atmosferu nazivamo ekstraterestičkim zračenjem. To zračenje se opisuje gustoćom energijskog toka koji upada na određenu površinu, okomitu na smjer sunčevih zraka i nazivamo ozračenjem (iradijancijom), označavamo znakom  $E$  i izražavamo jedinicom vat po četvornom metru ( $W/m^2$ ). Kako se udaljenost Zemlje od Sunca mijena tokom godine tako se mijenja i ekstraterestičko zračenje od najmanje vrijednosti  $1307 W/m^2$  do najveće  $1399 W/m^2$ . Njegova srednja vrijednost naziva se solarna konstanta. Ona se definira kao tok sunčeva zračenja kroz jediničnu površinu, okomitu na smjer sunčevih zraka na srednjoj udaljenosti Zemlje od Sunca ( $r = 1,5 \cdot 10^{11} m$ ), ali izvan Zemljine atmosfere tako da nema slabljenja zbog apsorpcije i raspršenja u atmosferi. Dogovorena standardna vrijednost za solarnu konstantu je:

$$\bar{E}_0 = 1353 W m^{-2} = 4871 kJ m^{-2} h^{-1}$$

Prije ulaska u atmosferu spektar sunčeva zračenja proteže se od oko  $0,12 \mu m$  do više od  $10 \mu m$ , s maksimumom na  $0,48 \mu m$  i sastoji se od: ultraljubičastog ( $0,12 \mu m - 0,4 \mu m$ ), vidljivog ( $0,4 \mu m - 0,75 \mu m$ ) i infracrvenog dijela ( $\lambda > 0,75 \mu m$ ). Ultraljubičasti dio je oko 8%, vidljivi 45% i infracrveni oko 47% od ukupne energije. Spektar završava pri  $10 \mu m$  jer je udio valnih duljina iznad  $10 \mu m$  samo 0,05%.

Zemlja se giba oko sunca u periodu od godinu dana ( $T = 365,25$  dana) po elipsi. Kako jakost sunčeva zračenja ovisi o udaljenosti od Zemlje, ekstraterestičko ozračenje površine okomite na smjer sunčeva zračenja približno se može prikazati izrazom

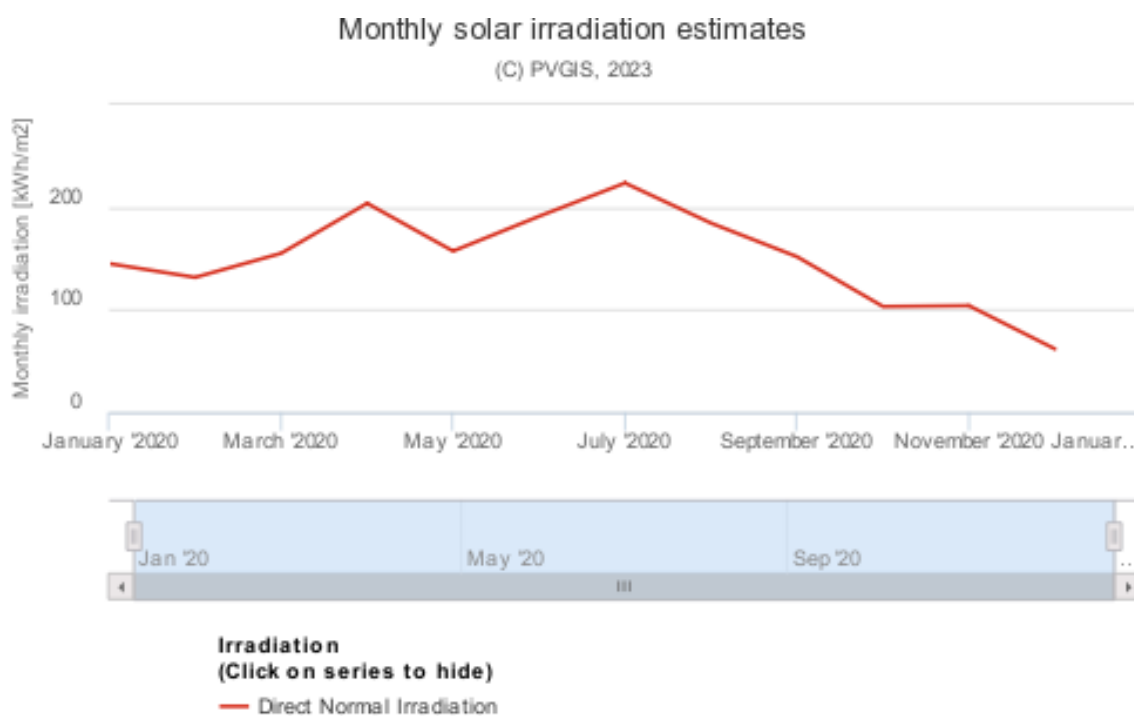
$$E_{on}(n) = \varepsilon(n) \bar{E}_0 = \left[ 1 + 0,33 \cos \frac{360^\circ n}{365} \right] \bar{E}_0$$

Gdje je:  $\bar{E}_0$ -solarna konstanta  
n-redni broj dana u godini  
 $\varepsilon(n)$ -ekscentricitet Zemljine orbite

Integrira li se ozračenje po vremenu, dobivaju se površinske gustoće energije zračenja koje u promatranom vremenskom interval upadnu na jedinicu površine (1 m<sup>2</sup>) plohe. Veličina koja se dobije naziva se ozračenost (iradijacija, ekspozicija) plohe I označava se znakom H.

$$H = \int E dt$$

Na slici 6. prikazana je količina ozračenosti po mjesecima za Split 2020. godine. Za izračun vrijednosti korišten je online softver PVGIS.



**Slika 6. Ozračenost za Split 2020. Godine [4]**

Dnevna ekstraterestička ozračenost horizontalne plohe od izlaska do zalaska Sunca je:

$$H_{oh} = \int_{t_1}^{t_2} \varepsilon(n) \bar{E}_0 \cos \vartheta_z dt$$

$$H_{oh} = \frac{86400}{\pi} \bar{E}_0 \left(1 + 0,033 \cos\left(\frac{n}{365} 360^\circ\right)\right) \left(\frac{\pi}{180} \omega_s \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \sin \omega_s\right)$$

Da bi se dobila prosječna dnevna ozračenost  $\bar{H}_{oh}$  (mjesečni prosjek) ekstraterestičkog zračenja na horizontalnu plohu, potrebno je pomoću izraza iznad izračunati dnevnu ozračenost  $H_{oh}$  za svaki dan u mjesecu I odrediti aritmetičku sredinu.

U tablici 1. prikazani su prosjeci dnevne ekstraterestičke ozračenosti horizontalne plohe za prvih 6 mjeseci u godini i za zemljopisne širine od 40° do 48°.

**Tablica 1. Mjesečne srednje dnevne vrijednosti ozračenosti ekstraterestičkog zračenja horizontalne plohe  $\bar{H}_{oh}/(MJm^{-2})$  [1]**

$\varphi/^\circ$	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.
40	15,24	20,24	27,37	34,58	39,65	41,73
41	14,62	19,66	26,91	34,31	39,56	41,74
42	14,01	19,08	26,44	34,03	39,47	41,75
43	13,39	18,5	25,96	33,74	39,37	41,75
44	12,78	17,91	25,48	33,44	39,26	41,74
45	12,16	17,32	24,99	33,13	39,14	41,72
46	11,55	16,73	24,49	32,81	39,01	41,70
47	10,94	16,13	23,99	32,48	38,87	41,67
48	10,33	15,53	23,47	32,14	38,8	41,63

Dok sunčevo zračenje prolazi kroz Zemljinu atmosferu ujedno i slabi jer se raspršuje na molekulama plinova, na česticama prašine i dimu (aerosol), također se apsorbira zbog interakcije s molekulama (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> itd.) te apsorbira i raspršuje na oblacima. Zračenje pojedinih valnih duljina se pri tome više apsorbira nego drugih te se i spektralni sastav mijenja što se može vidjeti i na slici 4. Pri prolazu kroz atmosferu gubi se oko 25% do 50% energije zbog raspršenja i apsorpcije.

Ukupno zračenje koje upada na površinu Zemlje sastoji se od izravnog Sunčeva zračenja i raspršenog zračenja iz svih smjerova. Ukupno zračenje se može prikazati kao zbroj izravnog  $E_b$  i raspršenog  $E_d$  zračenja  $E = E_b + E_d$ .

### 3.3. MJERENJE I PRORAČUN PRIZEMNOG SUNČEVOG ZRAČENJA

#### 3.3.1. MJERENJE SUNČEVOG ZRAČENJA

Podaci o Sunčevu zračenju dobivaju se mjerenjem. Grana meteorologije koja se time bavi naziva se aktinometrija. Za što veće iskorištenje sunčeve energije bitan je pojam insolacija. Insolacija je vrijeme kroz koje izravno Sunčevo zračenje dopire do Zemljine površine, odnosno do horizontalne plohe mjernog uređaja. Za mjerenje insolacije koristi se uređaj heliograf koji je prikazan na slici 7. Iako heliograf daje samo podatke o tome da li ima ili nema izravnog zračenja a ne daje podatke o ozračenosti, ipak se iz podataka o insolaciji može procijeniti ozračenost. U tablici 2. je prikazana prosječna mjesečna i godišnja insolacija za nekoliko mjesta u Hrvatskoj.



Slika 7. Heliograf [3]

Tablica 2. Prosječna insolacija za Hvar, Split i Zagreb [1]

Mjesto	Dnevna insolacija po mjesecima sati/dan												Godišnje sati
	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.	
Hvar	4,1	5,0	6,2	7,9	9,3	10,8	12,0	11,0	8,7	6,7	4,1	3,3	2713
Split	4,0	4,8	5,8	7,4	8,7	10,3	11,4	10,6	8,3	6,5	4,1	3,2	2591
Zagreb	1,6	2,7	3,9	5,7	6,7	7,7	8,8	8,2	6,4	4,4	2,0	1,2	1806

Za razliku od heliografa, piranometar je uređaj koji mjeri ukupno ozračenje Sunčeva zračenja koje upada iz prostornog kuta  $2\pi$  na njegovu ravnu plohu za primanje zračenja. Uređaj se obično postavlja tako da mu je ta ploha primanja horizontalna. Ako je Sunčev disk zasjenjen tako da do te plohe za primanje zračenja ne može doprijeti Sunčevo zračenje, piranometar će registrirati raspršeno zračenje neba. Uređaj je prikazan na slici 8.



**Slika 8. Piranometar [3]**

### **3.3.2. PRORAČUN PRIZEMNOG SUČEVOG ZRAČENJA**

U slučaju kada se Sunčevo zračenje ne može dobiti mjerenjem, upadno Sunčevo zračenje može se izračunati pomoću raznih formula. Razrađene su različite metode za proračun mjesečnog prosjeka ukupne dnevne ozračenosti horizontalne plohe  $\bar{H}$  iz ostalih klimatoloških podataka dobivenih mjerenjem kao što je insolacija.

Ako su poznati podaci o srednjoj dnevnoj vrijednosti  $\bar{S}$  relativnog trajanja zračenja, tada se mjesečni prosjek dnevne ozračenosti  $\bar{H}$  može izračunati iz srednje dnevne vrijednosti ekstraterestičke ozračenosti horizontalne plohe  $\bar{H}_0$  za promatrani mjesec primjenom Angstrom-Pageove relacije

$$\bar{H} = \bar{H}_0(a + b\bar{S})$$



Gdje su  $a$  i  $b$  koeficijenti ovisni o promatranom mjestu (za primjer za Zagreb je  $a = 0,2$  i  $b = 0,59$ ). Podaci koji su dobiveni mjerenjem trajanja zračenja Sunca mogu se upotrijebiti za izračunavanje ukupne ozračenosti za ona mjesta gdje se Sunčevo zračenje ne mjeri. Koeficijenti  $a$  i  $b$  se izračunavaju za mjesta gdje se mjeri ozračenost  $H$  i zatim upotrebljavaju u proračunima za mjesta sličnog klimatskog područja.

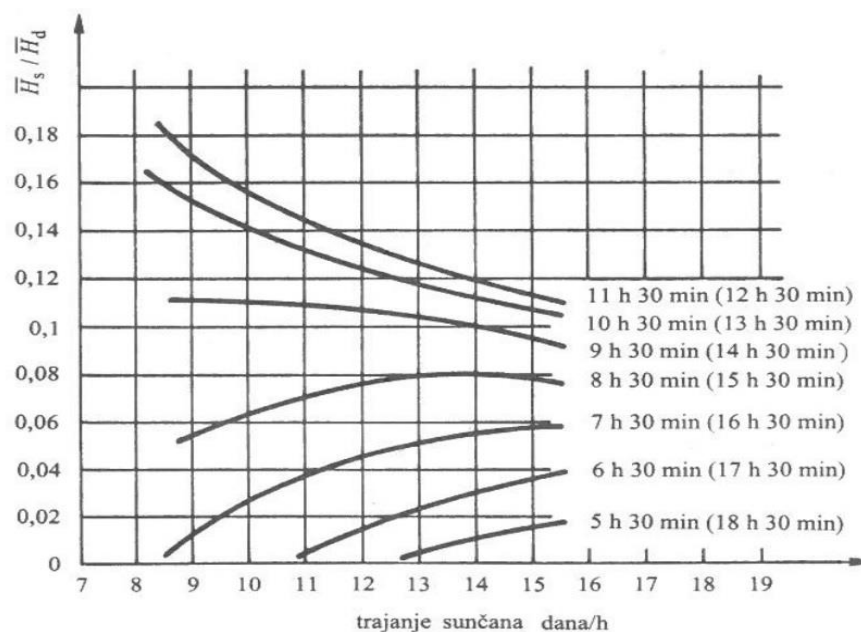
Pri proračunima je nekad potrebno poznavati prosječni dnevni hod ozračenosti (srednje satne ozračenosti). Kako su podaci o srednjoj dnevnoj ozračenosti dostupniji, često je potrebno izračunati prosječne satne ozračenosti  $\bar{H}_s$ . Približno je moguće izračunati pomoću Collares-Pereirove formule iz podataka o prosječnim dnevnim ozračenostima  $\bar{H}_{dn}$ .

$$\bar{H}_s = \bar{H}_{dn} \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{2\pi\omega_s}{360} \cos \omega_s}$$

Gdje su koeficijenti:  $a = 0,409 + 0,5016 \sin(\omega_s - 60^\circ)$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \sin(\omega_s - 60^\circ)$$

Na slici 8. prikazan je omjer  $\bar{H}_s/\bar{H}_{dn}$  u funkciji trajanja sunčana dana  $Z$  dobiven pomoću podataka mjerenja za područja Splita i Zagreba. Ti se dijagrami mogu upotrijebiti još i za određivanje satnih ozračenosti u ostalom našem području, možda i točnije negoli pomoću empirijskih formula izvedenih za druga klimatska područja.



Slika 9. Određivanje satnih ozračenosti iz dnevnih [1]

Ako ne postoje podaci dobiveni mjerenjem, udio raspršenog zračenja se može izračunati. Izračunava se iz srednje dnevne ukupne ozračenosti horizontalne plohe  $\bar{H}$ . Poznato je da je udio raspršene ozračenosti u ukupnoj  $\bar{K}_d = \bar{H}_d/\bar{H}$  funkcija tzv. indeksa prozračnosti

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0}$$

Gdje je:  $\bar{H}$ -srednja dnevna prizemna vrijednost ukupne ozračenosti

$\bar{H}_0$ -srednja dnevna ekstraterestička vrijednost

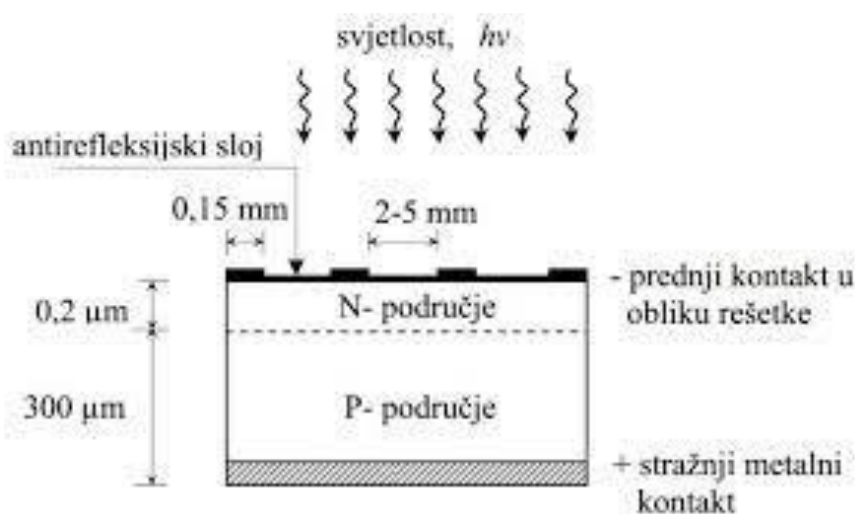
Tablica 3. prikazuje udio ozračenosti raspršenim zračenjem u Splitu i Zagrebu dobiven proračunom i uspoređen s izmjerenim vrijednostima u Zagrebu.

**Tablica 3. Udio ozračenosti raspršenim zračenjem  $\bar{H}_d/\bar{H}$  [1]**

Mjesec	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.
Split	48%	44%	43%	42%	38%	35%	35%	35%	36%	36%	47%	48%
Zagreb	70%	63%	60%	52%	49%	46%	45%	44%	47%	56%	70%	75%
Zagreb*	70%	62%	53%	52%	49%	48%	45%	44%	47%	59%	69%	72%

## 4. SUNČANA ČELIJA

Sunčana ćelija, prikazana na slici 10. je PN-spoj dioda. Mogu biti izrađene od više materijala. Materijali koji se trenutno upotrebljavaju za izradu fotonaponskih solarnih ćelija su: monokristalni silicij, polikristalni silicij, amorfni silicij, kadmij telurid, bakar-indij-selen sulfid. Pomoću fotonaponskog efekta, sunčana energija se može izravno pretvoriti u električnu energiju u sunčanim ćelijama. Kada sunčana ćelija apsorbira Sunčevo zračenje, fotonaponskim efektom se njezinim krajevima proizvede elektromotorna sila i tako sunčana ćelija postaje izvor električne energije.

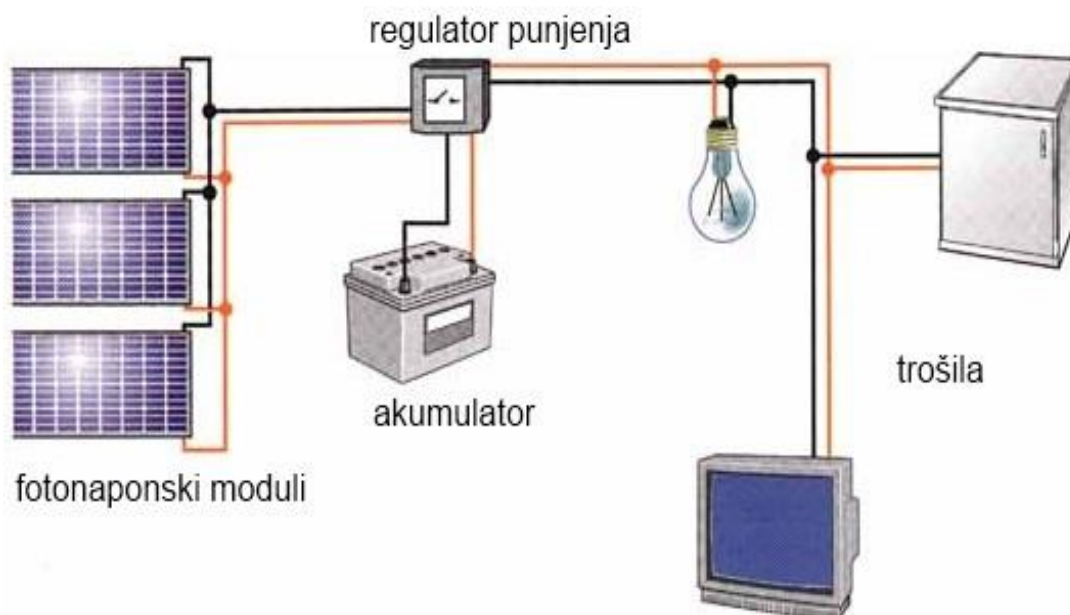


Slika 10. Silicijska sunčana ćelija [1]

U silicijskoj sunčanoj ćeliji na površini pločice P-tipa silicija difundirane su primjese, npr. fosfor, tako da na tankom površinskom sloju nastane područje N-tipa poluvodiča. Da bi se skupili naboji nastali apsorcijom fotona iz Sunčeva zračenja, na prednjoj površini nalazi se metalna rešetka, a zadnja je strana prekrivena metalnim kontaktom. Rešetkasti kontakt na prednjoj strani napravljen je tako da ne prekrije više od 5% površine te on gotovo i ne utječe na apsorpciju Sunčeva zračenja. Prednja strana ćelije može biti prekrivena i prozirnim antirefleksirajućim slojem koji smanjuje refleksiju Sunčeve svjetlosti i tako povećava učinkovitost ćelije.

Fotonaponske ćelije proizvode napon od oko 0.5 V uz gustoću struje oko 20 mA/cm<sup>2</sup>. Da bi se dobio odgovarajući napon odnosno snaga, ćelije se mogu spajati serijski i paralelno. Tako se dobivaju moduli sunčanih ćelija u obliku ploče (panela) na kojoj su

ćelije osigurane i zaštićene od vanjskih i ostalih utjecaja. Moduli se slažu jedan pored drugoga u fotonaponske ravne kolektore, a kolektori zajedno sa ostalim potrebnim elementima (pretvaračima, regulatorima, ekumulatorima...) i tvore fotonaponski sustav.



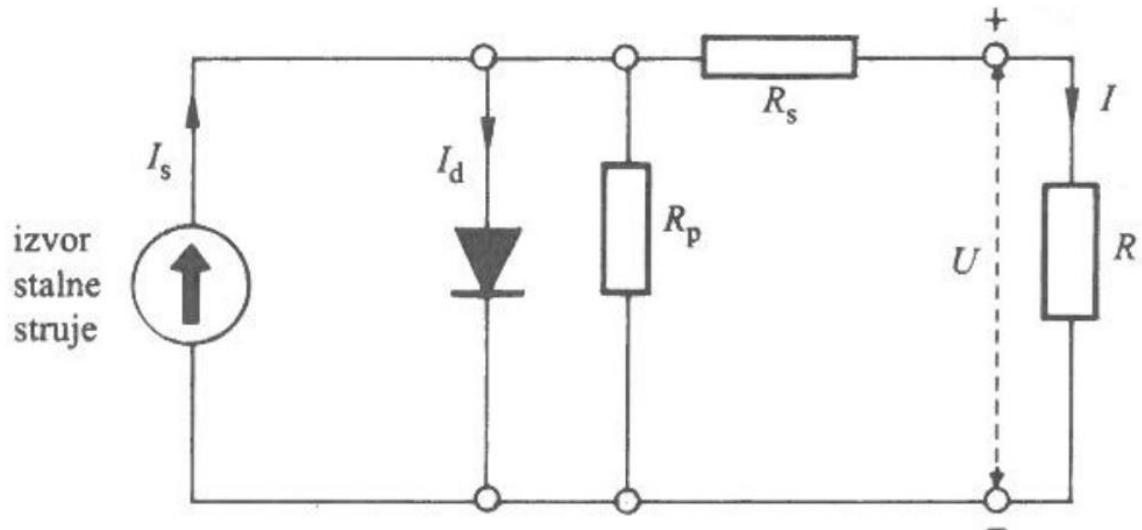
**Slika 11. Fotonaponski sustav [5]**

Sunčane ćelije napravljene su tako da se, kada su osvijetljene, na njezinim krajevima se javlja elektromotorna sila (napon). Kada se sunčana ćelija (PN-spoj) osvijetli, apsorbirani fotoni proizvode parove elektron-šupljina. Ako apsorpcija nastane daleko od PN-spoja, nastali par se ubrzo rekombinira. Međutim, nastane li apsorpcija unutar ili u blizini PN-spoja, unutrašnje električno polje, koje postoji u osiromašenom području, odvađa nastali elektron-šupljinu, elektron se giba prema N-strani, a šupljina prema P-strani. Takvo skupljanje elektrona i šupljina na odgovarajućim stranama PN-spoja uzrokuje elektromotornu silu na krajevima ćelija. [1]

Kada je sunčana ćelija spojena s vanjskim trošilom i osvijetljena, u ćeliji će zbog fotonapona nastajati struja  $I_s$  te će vanjskim trošilom teći struja  $I$  jednaka razlici struje diode  $I_d$  dane izrazom

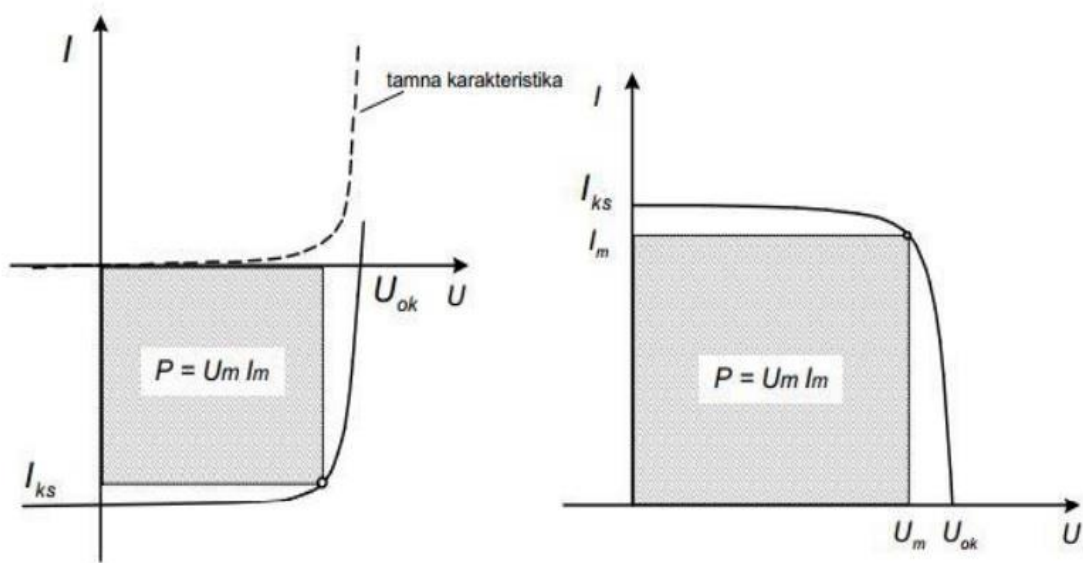
$$I = I_d - I_s = I_0 \left( \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right) - I_s \quad (4.1)$$

Osvijetljena sunčana ćelija se ponaša kao izvor struje. Njezin ekvivalentni sklop je prikazan na slici 11. Izvor stalne struje paralelno je spojen s diodom. Serijski otpor  $R_s$ , ovisi o materijalu i izradi sunčane ćelije i poželjno je da bude što manji. Paralelni otpor (shunt)  $R_p$  ovisi o osobinama ćelije i većinom je dovoljno velik da ga možemo zanemariti.



**Slika 11. Ekvivalentni sklop sunčane ćelije [1]**

Slika 12. prikazuje  $U/I$  karakteristiku osvijetljene i neosvijetljene sunčane ćelije. Prva je tamna karakteristika, zapravo karakteristika obične poluvodičke diode. Zatamnjena površina pravokutnika,  $U_m I_m$ , odgovara maksimalnoj snazi koju ćelija može dati. Zbog toga je najvažniji dio karakteristike u četvrtom kvadrantu, jer je to radno područje ćelije kada se iz nje dobiva električna snaga i energija. To se područje obično i crta u 1. a ne u 4. kvadrantu, uzimajući vrijednosti struje pozitivnima.



Slika 12. U-I karakteristika sunčane ćelije [6]

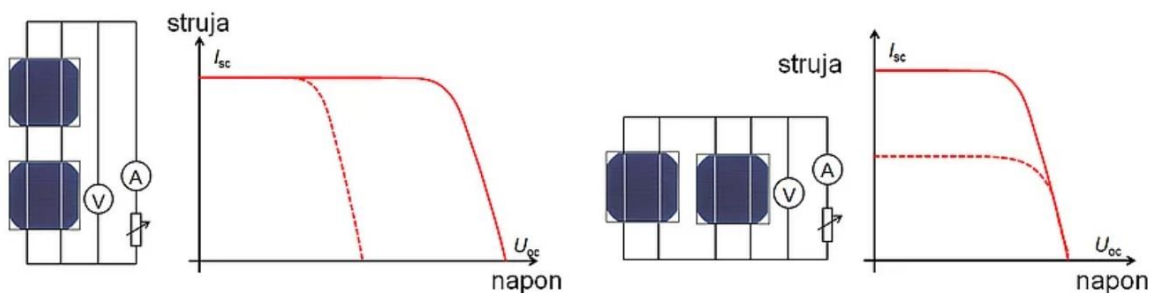
Ako se U-I karakteristika crta u prvom kvadrantu umjesto u četvrtom, struja osvjetljene sunčane ćelije  $I_s$  je pozitivna, te je struja  $I$  kroz vanjski strujni krug:

$$I = I_s - I_d = I_s - I_0 \left( \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right) \quad (4.2)$$

gdje je  $I_s$  struja koju uzrokuje upadna svjetlost a  $I_d$  struja diode koja teče kroz spoj.

Pri mjerenju U-I karakteristike sunčane ćelije, ćelija se spoji u seriju s promjenjivim izvorom napona i radnim otporom. Ozrači se Sunčevim zračenjem ili simulatorom Sunčeva zračenja. Napon promjenjivog izvora se mijenja i te se mjeri napon  $U$  na ćeliji i struja kroz ćeliju  $I$ , tako je dobivena U-I karakteristika.

Serijskim spajanjem ćelija rasti će napon niza ćelija uz zadržavanje struje ćelije. Paralelnim spajanjem struja ćelija se zbraja uz zadržavanje istog napona ćelija.



### Slika 13. Serijsko i paralelno spajanje ćelija [7]

#### 4.1. PARAMETRI SUNČANE ĆELIJE

Najinteresantniji parametar sunčane ćelije je stupanj korisnog djelovanja. On govori koliko će se zračenja pri STC uvjetima pretvoriti u električnu snagu, odnosno energiju. Za primjer polikristalni modul dimenzije 1,7m x 1m, površine 1,7m<sup>2</sup>, koji ima stupanj korisnog djelovanja 14,7% će iz 1000 W/m<sup>2</sup> (pri STC uvjetima) dati 250 W snage.[5]

Jedan od najvažnijih parametara sunčane ćelije je njezina elektromotorna sila tj. napon na stezaljkama u slučaju otvorenog strujnog kruga ( $I = 0$ ). Uvrštavajući  $I = 0$  u jednadžbu (4.2), dobiven je napon otvorenog strujnog kruga:

$$U_{ok} = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{I_s}{I_0} + 1\right) \quad (4.3)$$

Elektromotorna sila sunčane ćelije ovisi o fotostruji  $I_s$  (koja raste sa ozračenjem) i o struji zasićenja  $I_0$  za koju je poželjno da je što manja.

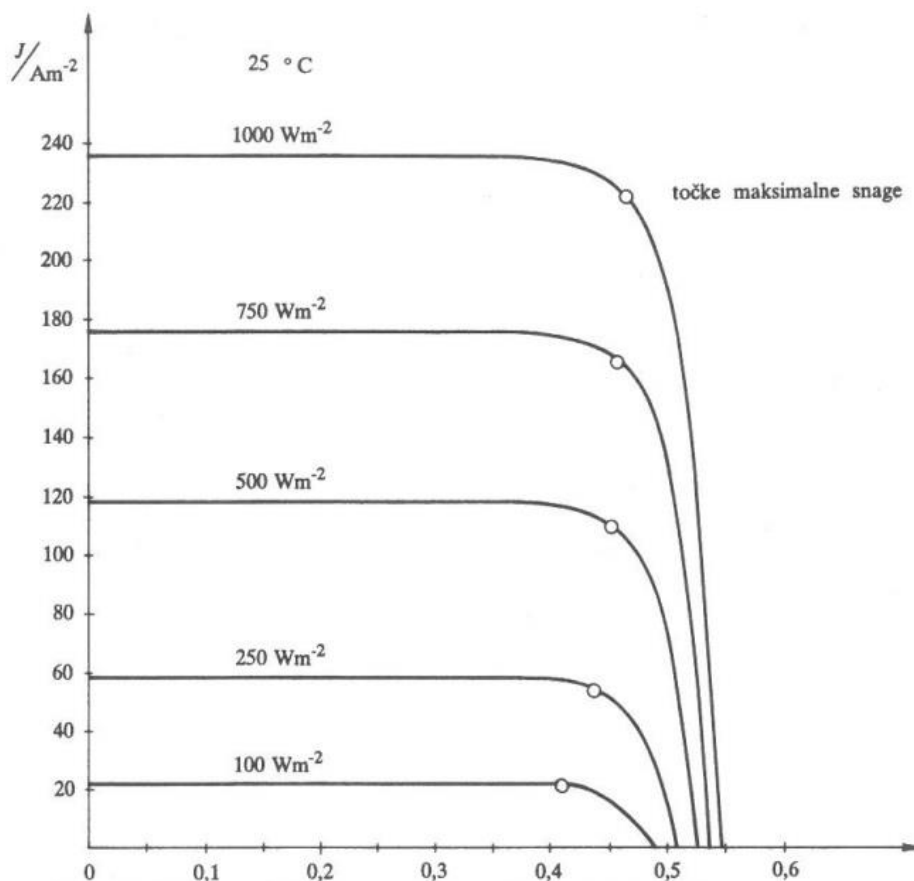
Važan podatak je i struja kratkog spoja, tj. jakost struje u slučaju kada je na stezaljkama napon nula. Uvrsti li se u formulu (4.2) da je  $U = 0$ , dobiva se da je struja kratkog spoja jednaka fotogeneriranoj struji  $I_s$ .

$$I_{ks} = I_s$$

Na U-I karakteristici sunčane ćelije (slika 12.) označeni su uz ostalo napon otvorenog kruga  $U_{ok}$  i struja kratkog spoja  $I_{ks}$ . Iz tih podataka se može dobiti i karakteristični otpor sunčane ćelije omjerom:

$$R_k = \frac{U_{ok}}{I_{ks}} \quad (4.4)$$

Promjena ozračenja (iradijancije)  $E$  bitno utječe na karakteristiku ćelije što je vidljivo na slici 14. Ako se ozračenje smanji dva puta (npr. od 1000 W/m<sup>2</sup> na 500 W/m<sup>2</sup>) struja kratkog spoja smanji se dva puta, a napon otvorenog kruga za 5%.



**Slika 14. Utjecaj Sunčeva ozračenja na U-I karakteristiku ćelije [1]**

Svaka ćelija ima određeni serijski i paralelni otpor (slika 11.) koji se često ne smije zanemariti. Serijski otpor ćelije  $R_s$  je omski otpor na koji nailazi struja koja teče kroz ćeliju te kroz površinu ćelije prema omskim kontaktima do spoja s priključkom na vnjski krug. Njemu pridonosi otpor materijala, otpor kontakata i sl. Produkt serijskog otpora i površine ćelije  $R_s$  a reda je veličine  $0,0025 \Omega m^2$  za tipične sunčane ćelije.[1]

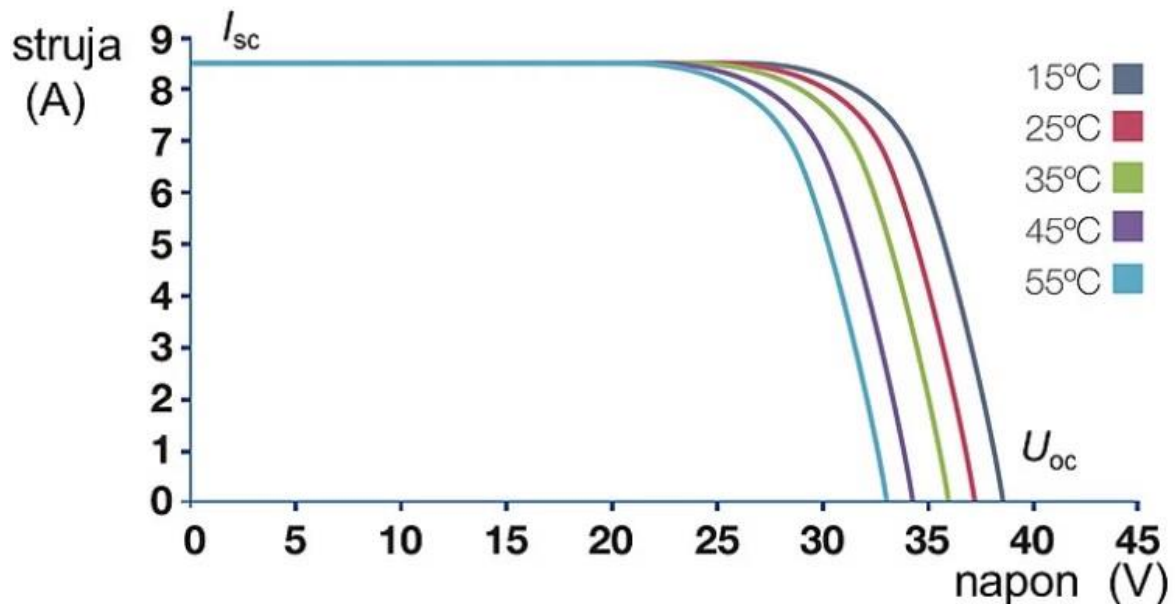
U modelu stvarne sunčane ćelije potrebno je uzeti u obzir serijski i paralelni otpor  $R_s$  i  $R_p$  da se dobije jednačina stvarne ćelije:

$$I = I_s - I_0 \left( \exp \left( \frac{e(U+IR_s)}{m k T} \right) - 1 \right) - \frac{U}{R_p} \quad (4.5)$$

Na slici 15. prikazane su karakteristike jednog fotonaponskog modula pri raznim temperaturama modula. Važno je uočiti da se pri zagrijavanju modula, napon praznog hoda modula ( $U_{ok}$ ) smanjuje, dok se struja kratkog spoja ( $I_{ks}$ ) praktički ne mijenja. Kada se



nekoliko modula spaja u niz, pri čemu raste napon niza, potrebno je proračunom provjeriti napon pri najhladnijem stanju osunčanog modula. Svaki uređaj na koji su spojeni fotonaponski moduli mora imati veći ulazni napon od osunčanih modula u najhladnijem stanju kako ne bi došlo do oštećenja uređaja.



Slika 15. Utjecaj temperature na U-I karakteristiku sunčane ćelije [7]

U tablici 4. prikazana je ovisnost karakteristika sunčane ćelije o temperaturi, napon opada za oko 0,41%/°C, struja kratkog spoja raste za oko 0,06%/°C, snaga opada za oko 0,44%/°C, djelotvornost opada za oko 0,08%/°C.

Tablica 4. Ovisnost karakteristika sunčane ćelije o temperaturi [1]

Temperatura $t/^{\circ}\text{C}$	Napon otvorenog kruga $U_{ok}/\text{V}$	Gustoća struje kratkog spoja $J_{ks}/(\text{mAcm}^{-2})$	Maksimalna snaga $P_m/(\text{mWcm}^{-2})$
0	0,598	23,28	10,4
25	0,543	23,64	9,4
60	0,465	24,1	7,9

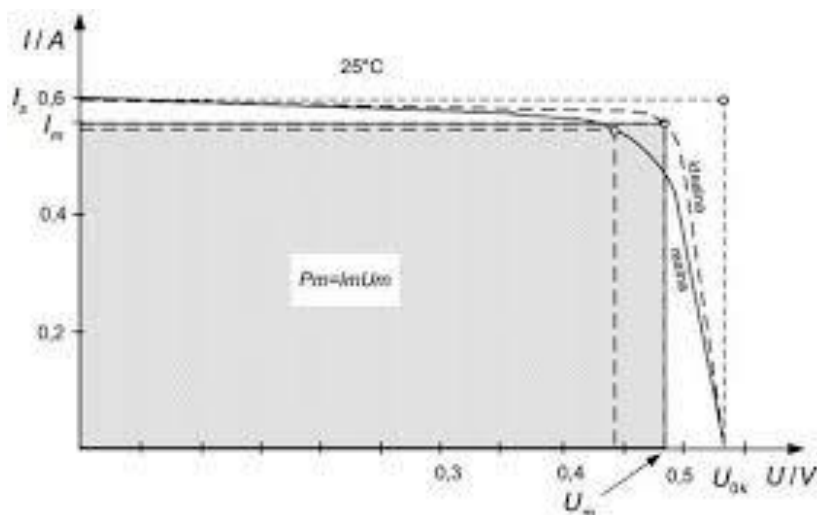
## 4.2. SNAGA I DJELOTVORNOST SUNČANE ČELIJE

### 4.2.1. SNAGA SUNČANE ČELIJE

Snaga koju sunčana ćelija može dati dobiva se množenjem napona i struje:

$$P = UI = U \left( I_s - I_0 \left( \frac{eU}{kT} \right) + I_0 \right) \quad (4.6)$$

Maksimalna snaga koju ćelija može dati  $P_m = U_m I_m$  prikazana je na slici 16. Odgovara površini zatamnjenog pravokutnika. Računski se može odrediti traženjem ekstrema funkcije (4.6) odnosno, pravokutnika na slici 16. koji ima maksimalnu površinu.



Slika 16. Maksimalna snaga sunčane ćelije [8]

Za napone manje od  $U_m$  struja je jača od  $I_m$ , ali je produkt  $UI$ , zbog manjeg napona  $U$ , manji od  $U_m I_m$ . Za napone veće od  $U_m$  struja opada prema nuli i zbog toga snaga  $UI$  opada. Maksimalna snaga se može prikazati i pomoću elektromotorne sile i struje kratkog spoja.

$$P_m = U_m I_m = U_{ok} I_{ks} F \quad (4.7)$$

$$F = \frac{U_m I_m}{U_{ok} I_{ks}} \quad (4.8)$$

Gdje je  $F$  tzv. faktor punjena, to je omjer površine pravokutnika sa stranicama  $U_m$  i  $I_m$  i pravokutnika sa stranicama  $U_{ok}$  i  $I_{ks}$ . On pokazuje koliko se stvarna ćelija približuje

idealnoj, odnosno koliki je utjecaj serijskog otpora ćelije. Obično je  $0,7 < F < 0,9$ . Faktor punjenja  $F$  opada linearno s omjerom  $R_s/R_k$  i  $R_k/R_p$  gdje je  $R_p$  paralelni i  $R_k$  karakteristični otpor sunčane ćelije.

#### 4.2.2. DJELOTVORNOST SUNČANE ĆELIJE

Djelotvornost ćelije definira se omjerom između njezine maksimalne snage  $P_m$  i snage  $P_u$  Sunčeva zračenja koje upada na površinu  $A$  ćelije.

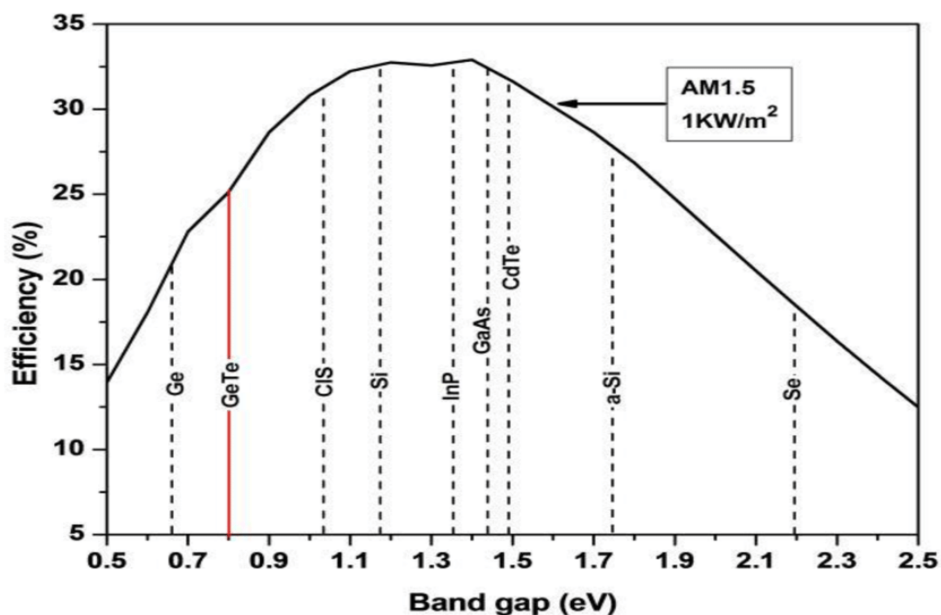
$$\eta = \frac{P_m}{P_u} = \frac{P_m}{EA} = \frac{U_m I_m}{EA} \quad (4.9)$$

$$\eta = F \frac{U_{ok} J_{ks}}{E} \quad (4.10)$$

Gdje je:            E-ozračenje  
                        $U_{ok}$ -napon otvorenog kruga  
                        $J_{ks}$ -gustoća struje kratkog spoja  
                       F-faktor punjenja

Da bi djelotvornost bila što veća, potrebno je da  $J_{ks}$  bude što veći, a factor punjenja što bliži jedinici.

Djelotvornost uvelike ovisi o širini zabranjene vrpce. Foton koji upadne u sunčanu ćeliju može se reflektirati, može proći kroz spoj bez interakcije, ako mu je energija manja od širine zabranjene vrpce može se apsorbirati stvarajući par electron šupljina. Na slici 17. prikazana je maksimalna teorijska djelotvornost sunčane ćelije kao funkcija širine zabranjene vrpce  $E_g$ , također su označeni neki od poluvodiča koji mogu poslužiti za izradu sunčanih ćelija.



Slika 17. Maksimalna teorijska djelotvornost ćelije u ovisnosti o širini zabranjene vrpce [10]

### 4.3. ANTIREFLEKSIJSKI SLOJEVI

Dva su načina da se smanji refleksija upadnog Sunčeva zračenja na površini sunčane ćelije: nanošenje posebnog antirefleksijskog sloja i obrada površine tako da joj se poveća hrapavost. Kada elektromagnetski val upada na granicu između dvaju optičkih sredstava jedan se di reflektira, a drugi prolazi. Faktor refleksije  $\rho$  (omjer reflektirane i upadne energije) i faktor transmisije  $\tau$  (omjer transmitirane i upadne energije) ovise o polarizaciji vala, kutu upada i indeksima loma tih dvaju sredstava.

Ako je kut upada blizak nuli (okomiti upad) i val prelazi iz sredstva indeksa loma  $n_1$  u sredstvo indeksa loma  $n_2$ , faktor refleksije za energiju vala je:

$$\rho = \left( \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \quad (4.11)$$

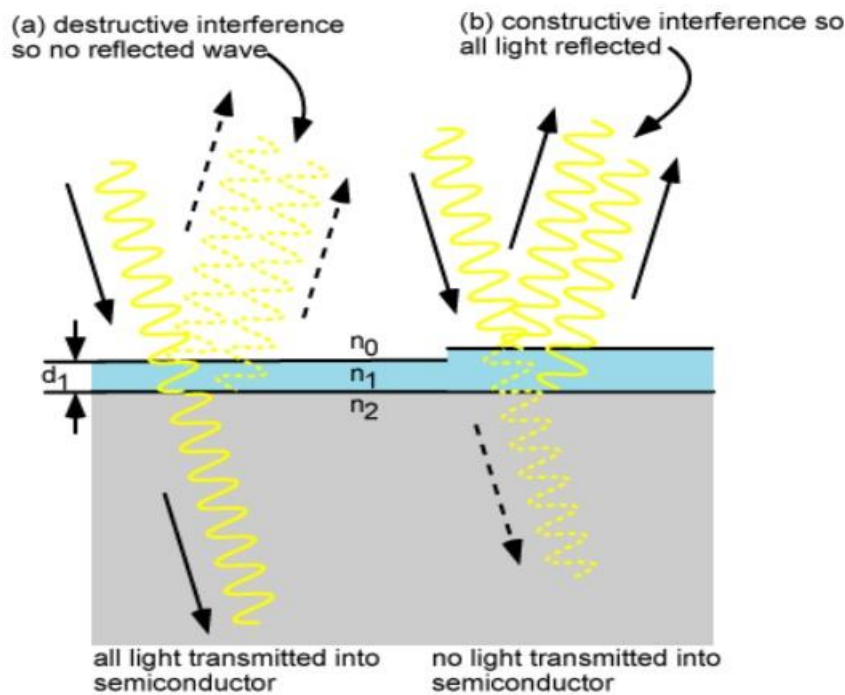
Smanjenje refleksije na površini ćelije može se postići nanošenjem antirefleksijskog sloja na površinu silicija od jednog ili više prozirnih dielektričnih materijala različitog indeksa loma. Najjednostavniji oblik antirefleksijskog sloja jest sloj debljine  $d$  materijala indeksa loma  $n_2$ . Svjetlo upada iz sredstva indeksa loma  $n_1$ , dolazi u antirefleksijski sloj indeksa loma  $n_2$  i ulazi u silicij indeksa loma  $n_3$  ( $n_1 < n_2 < n_3$ ). Prvo

sredstvo je ili zrak, ili staklo, ili neki plastični material kojim je ćelije prekrivena radi zaštite.

Zraka (snop svjetlosti valne duljine  $\lambda$ ) reflektirat će se na površini prvog sloja i na površini drugog sloja. Sa  $r_1$  i  $r_2$  označeni su odgovarajući faktori refleksije amplitude upadnog ili elektromagnetskog vala.

$$r_1 = \frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \quad r_2 = \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \quad (4.12)$$

Budući da je energija vala proporcionalna kvadratu amplitude, factor refleksije za energiju vala je  $\rho = r^2$ .



Slika 18. Antirefleksijski sloj [11]

Obično se koristi titan ili titan-oksidi kao antirefleksijski sloj ( $n=2,1$ ). Refleksija se može smanjiti obradom površine. Površina silicijeve ćelije se obradi tako da se na njoj formiraju mikroskopski male izbočine u obliku piramida visine oko 10  $\mu\text{m}$ . Svjetlost reflektirana sa takvih piramida se vraća prema ćeliji i tako se povećava jakost svjetlosti koja ulazi u ćeliju i povećava njenu djelotvornost.

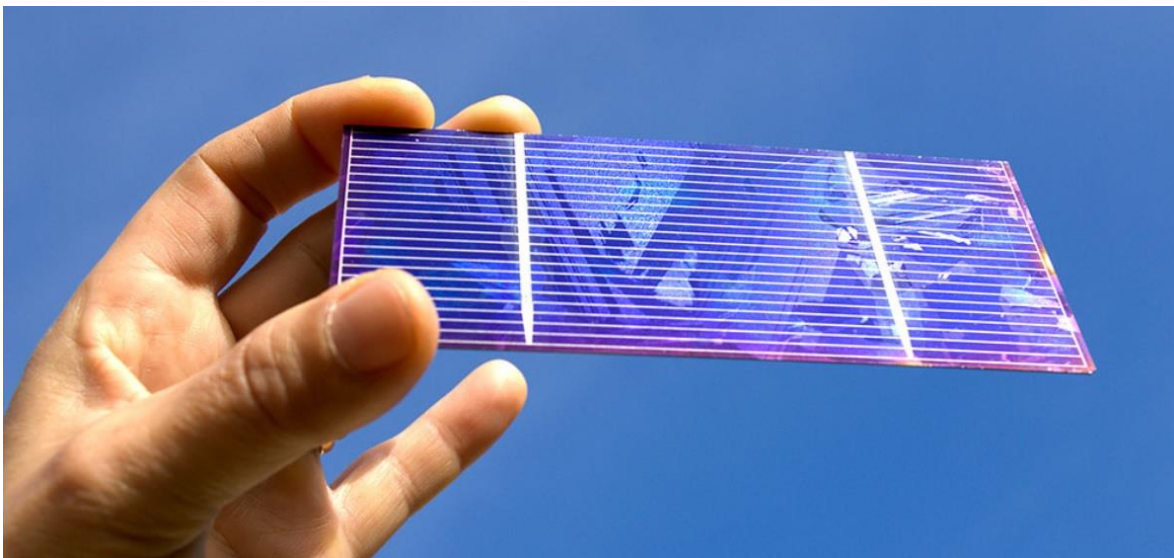
## 4.4. VRSTE SUNČANIH ČELIJA

### 4.4.1. ČELIJE OD MONOKRISTALIČNOG I POLIKRISTALIČNOG SILICIJA

Iako su u laboratorijima napravljene i ispitane sunčane ćelije od raznih poluvodičkih materijala, zasad se jedino silicijske ćelije mogu komercijalno nabavljati.

Pri izradi ćelija od monokristaličnog i polikristaličnog silicija režu se kriške u obliku kvadrata ili kruga, površine 10 x 10 cm, odnosno polumjera 10 cm. Debljina kriški je od 250  $\mu\text{m}$  do 450  $\mu\text{m}$ . Obično se koristi P-tip silicija, dopiran bromom.

Prednja površina ćelije prekrivena je metalnom rešetkom (vidljivo na slici 19.) radi električnog kontakta, a kao drugi kontakt služi donja metalna zaštitna podloga. Tanki sloj titana upotrebljava se kao donji sloj a kao gornji srebro. U sredini se nalazi sloj paladija da bi se izbjegla neželjena reakcija između titana i srebra zbog vlage.



**Slika 19. Prednja površina sunčane ćelije [12]**

Debljina vidljivih traka mrežice je oko 0,2 mm a razmak među njima oko 5 mm. Što su kontaktne trake bliže gubitak snage na otporu ćelije je manji, ali i manje svjetla upada na ćeliju te je potrebno naći određeni kompromis.

Na površini ćelije pri skupljanju naboja na kontaktnoj mrežici nastaju struje paralelne površini ćelije i one su određene otpornošću materijala dana izrazom

$$\rho = \frac{1}{e\mu_e n_D} \quad (4.13)$$

Gdje je: e-naboj elektrona

$\mu_e$ -pokretljivost elektrona u materijalu

$n_D$ -koncentracija donorskih primjesa

Površine monokristaličnih silicijskih ćelija ovise o površini monokristala koji se koristi. Iznose od 5 do 10 cm<sup>2</sup>, a debljina im je oko 0,2 do 0,3 mm. Elektromotorna sila kreće se od 0,55 do 0,7 V, struja kratkog spoja je oko 15 0mA, a djelotvornost od 10% do 15,5%.

Zahtjevan tehnološki process proizvodnje glavni je uzrok visoke cijene monokristaličnih sunčanih ćelija. Iz kupke rastaljenog čistog silicija (cijena oko 65 USD/kg), nakon ubacivanja malog monokristala koji služi kao klica kristalizacije polaganim se izvlačenjem dobiva monokristal silicija promjera oko 8 cm i duljine oko 50 cm. Iz tog komada monokristala režu se dijamantnom cirkularnom pilom tanke okrugle pločice silicija (debljine 0,2 do 0,4 mm). Pri tome postupku propadne oko 70% kristala, što bitno povećava troškove izrade. Nakon uklanjanja oštećenja nastalih rezanjem pristupa se dodavanju N-primjesa (obično se koristi fosfor). Nakon otprilike 20 minuta nečistoće fosfora dominirat će u području blizu površine pločice te će nastati područje N-tipa vodljivosti. Konačno se izrađuju kontakti sa jedne i druge strane ćelije.

Ćelije od polikristaliničnog silicija izrađuju se u obliku tankog filma kaotično poredanih kristalića silicija na jeftinoj podlozi, pa se tako uštedi material i izbjegava skupa tehnologija izrade pločica od monokristaličnog silicija.

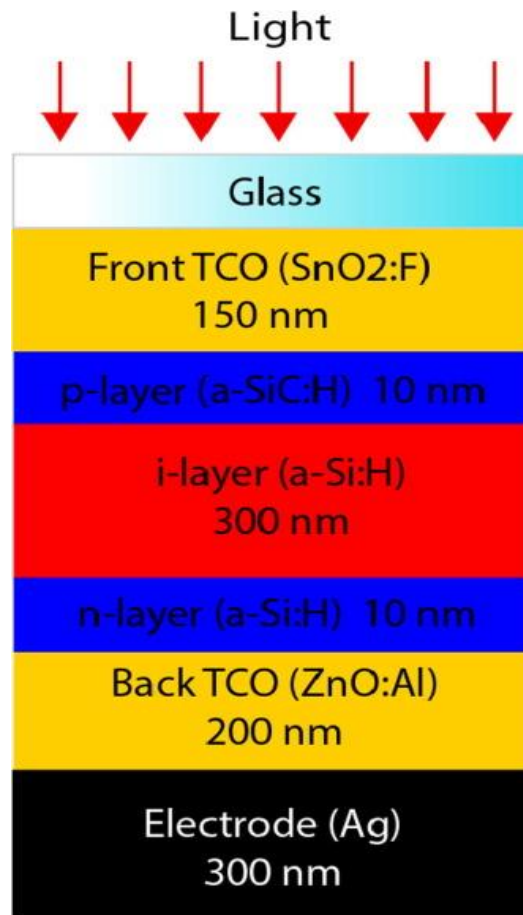
#### 4.4.2. ĆELIJE OD AMORFNOG SILICIJA

U novije vrijeme posebnu pažnju privlači tehnologija proizvodnje ćelija od amorfno silicija. Proizvodnja amorfni ćelija relativno je jednostavan i jeftin postupak u kome se na podlogu nanosi tanki film (debljine svega nekoliko mikrometara) silicija u amorfno stanju čime je trošak materijala znatno manji nego kod proizvodnje sa kristaliničnim silicijem.

Prva ćelija od amorfno silicija proizvedena je 1974. (D.E. Carlson i C.R. Wronski), imala je  $U_{ok} = 0,8V$ ,  $I_{ks} = 12mA/cm^2$ , površinu  $A = 0,02 cm^2$  i djelotvornost  $\eta = 5,5\%$ .

Amorfni silicij ima izuzetnu sposobnost apsorpcije svjetlosti u opsegu od 350 do 710 nm (što odgovara energiji fotona od 3,6 do 1,7 eV). Njegov apsorpcijski faktor u vidljivom dijelu Sunčeva spektra veći je nego kod kristaliničnog. Za valnu duljinu 550 nm

(maksimum Sunčeva spektra) faktor apsorpcije za amorfni silicij je gotovo 10 puta veći nego za kristalinični. Za sve fotone energije manje od 1,7 eV amorfni je silicij providan i ne apsorbira ih za razliku od kristaliničnog kod kojeg je u tom području apsorpcija velika. Za fotonaponsku konverziju dovoljni su vrlo tanki slojevi amornog silicija. Veća apsorpcija postiže se debljim slojem materijala, no ona raste i s unutrašnjim električnim poljem koje je obrnuto proporcijonalno s debljinom. [1]



**Slika 20. Struktura sunčane ćelije od amornog silicija [13]**

Za proizvodnju sunčanih ćelija snage 1 MW potrebno je oko stotinjak kilograma amornog silicija, a mnogo više kristaliničnog. Energija potrebna pri proizvodnji amornih ćelija manja je nego za monokristalinične i vrati se već nakono godinu dana upotrebe, dok za monokristalinične za 3 do 5 puta dulje.

Postoji više metoda proizvodnje amornog silicija. Jedna od njih je razlaganje plina silana SiH<sub>4</sub> (sa ili bez dodatka kisika) visokofrekvencijskim električnim poljem. Električnim izbojem u tom plinu pri niskom tlaku taloži se amorfni silicij. Amorfni silicij dobiven tom metodom sadrži određeni postotak vezanih vodikovih atoma, porastom



koncentracije vodikovih atoma raste i energijski procjep materijala. Tako dobiveni materijal označava se u literaturi znakom a-Si:H.

Amorfni silicij može se nanositi kao tanki film na bilo koju podlogu: staklo, metal, plastika, folija itd. Staklo se npr. može upotrebiti i kao pokrov i kao podloga. Sve to čini proizvodnju modula jeftinijom i omogućava ekonomski opravdanu primjenu ćelija i s manjom djelotvornošću. Amorfni silicij lakše se nanosi i na tanke savitljive površine tako da se može savijati kao folija, lako prenositi i instalirati na zakrivljenim podlogama.

Amorfne ćelije imaju i niz mana. Najnepogodnija je manja djelotvornost u usporedbi sa monokristaliničnim (reda veličine oko 7%). Pouzdanost amornih ćelija je također manja od monokristaliničnih. Opaženo je da tijekom prvih mjeseci izlaganja Sunčevoj svjetlosti snaga opadne za 15% do 30% od vrijednosti početne snage da bi se kasnije ćelije stabilizirale. Najveće pogoršanje svojstava ćelije je u prvim satima upotrebe. Struja kratkog spoja smanjuje se za oko 5% a toliko i napon otvorenog kruga, faktor punjenja smanji se oko 15%, djelotvornost i snaga od 15% do 30%, serijski otpor se smanji a paralelni poveća za oko 50%. Daljnjim usavršavanjem proizvodnje ta su se pogoršanja smanjila i danas su svedena na 10 do 15%.

**Tablica 5. Usporedba monokristaliničnih i amornih sunčanih ćelija [1]**

	<b>Monokristalinične</b>	<b>Amorfne</b>
Energijski procjep	1,12 eV	1,6 do 1,8 eV
Faktor apsorpcije ( $0,4\mu\text{m} < \lambda < 0,7\mu\text{m}$ )	malen	Velik
Faktor apsorpcije ( $\lambda > 0,7\mu\text{m}$ )	velik	Malen
Pokretljivost elektrona	Oko $1000 \text{ V}^{-1}\text{cm}^2\text{s}^{-1}$	Oko $1 \text{ V}^{-1}\text{cm}^2\text{s}^{-1}$
Debljina sloja	Oko $200 \mu\text{m}$	Oko $1 \mu\text{m}$
Napon otvorenog kruga	0,65 V	0,85 V
Gustoća struje kratkog spoja	$30 \text{ mAcm}^{-2}$	$15 \text{ mAcm}^{-2}$
Faktor punjenja	Oko 0,75	Oko 0,65
djelotvornost	0,10 – 0,18	0,05 – 0,1

#### 4.5. OSTALI MATERIJALI ZA IZRADU ČELIJA

Da bi se cijena solarnih ćelija bitno smanjila, potrebno je pojednostavniti izradu i upotrijebiti druge, jeftinije materijale. Već su postignuti određeni rezultati i može se očekivati da će se cijene sunčanih ćelija i u budućnosti smanjivati.

Uz silicijeve najviše su istražene sunčane ćelije od kadmij-sulfida. CuS/CdS sunčana ćelija sastoji se od tankog sloja CdS (oko 20  $\mu\text{m}$ ) kao N-područja na koji je nanesen P-sloj bakar-sulfida Cu<sub>2</sub>S debljine oko 0,2  $\mu\text{m}$ . Djelotvornost im je oko 5-9%, uvijek trajanja kraćinego kod silicijevih ćelija.

Ćelije od galij-arsenida prave se u obliku tankog filma od jedne (GaAs) ili dvije komponente (GaAs+Cu<sub>2</sub>S) na nekoj podlozi. Takva bi ćelija trebala imati veliku djelotvornost (prema teorijskim predviđanjima) od oko 25%. Međutim to je rijedak, skup, otrovni materijal što mu omogućava široku primjenu.

Najnoviji način proizvodnje sunčanih ćelija je pomoću nanotehnologije. Nanotehnologija može pomoći u prevladavanju trenutnih prepreka kod učinkovitosti i značajno poboljšati pretvorbu sunčeve energije u električnu. Istraživači su uspjeli postići solarnu ćeliju sa nizom žica s 95% apsorpcijom svjetla, 9% učinkovitosti i 80% faktorom punjenja. Glavni uspjeh je bio u postizanju toga rezultata korištenjem samo 1% količine silicija koji se inače koristi u izradi silicijskih ćelija. [14]

## 5. ZAKLJUČAK

Solarna energija je jedan od glavnih i najpristupačnijih obnovljivih izvora energije, budući da na Zemlju svaki dan pristiže oko 200 000 puta više od ukupnog svjetskog dnevnog kapaciteta za proizvodnju električne energije u obliku sunčeva zračenja, stoga je interes za solarnu energiju u sve većem porastu diljem svijeta. Solarna energija je čisto gorivo koje se može koristiti za proizvodnju električne energije kao i topline, te korištenjem te energije neće dovesti do onečišćenja zraka i okoliša.

Pored solarne energije moraju se spomeniti i fotonaponski sustavi koji su vrlo korisni i jednostavni za upotrebu. Razlog njihove jednostavnosti je što nemaju pomičnih dijelova koji se mogu istrošiti što uvelike smanjuje trošak u održavanju, nema tekućina ili plinova koje mogu iscuriti i dovesti do zagađenja i za rad im nije potrebno neko od fosilnih goriva. Ako su pravilno proizvedene i montirane solarne ćelije zahtijevaju minimalno održavanje. Stalni napredak u tehnologiji materijala i nanotehnologiji će u budućnosti uvelike utjecati na proizvodnju i pristupačnost solarnih ćelija u nadi da će smanjiti trošak prilikom proizvodnje istih te povećati njihovu učinkovitost.

Solarna energija je budućnost nadolazećih generacija, sigurnija je, zelenija i ekonomičnija alternativa za dosadašnje izvore energije, stoga je potrebno stalno osvježavati i nadopunjavati znanje i spoznaje o solarnoj energiji i solarnim ćelijama.

## LITERATURA

- [1] Kulišić, P.; Vuletin, J.; Zulim, I.: Sunčane ćelije, Školska knjiga, Zagreb, 1994.
- [2] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Obnovljivi\\_izvori\\_energije](https://hr.wikipedia.org/wiki/Obnovljivi_izvori_energije)(pristupljeno 16.siječnja 2023.)
- [3] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Sun%C4%8Devo\\_zra%C4%8Denje](https://hr.wikipedia.org/wiki/Sun%C4%8Devo_zra%C4%8Denje) (pristupljeno 16.siječnja 2023.)
- [4] [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/) (pristupljeno 20.siječnja 2023.)
- [5] <http://flamtron.hr/solar/index.php/hr/fotonaponski-sustavi/autonomni-ili-samostalni-fotonaponski-sustavi>
- [6] [https://aolab.fer.hr/download/repository/Tehnologije\\_solarnih\\_celija\\_20170127\\_ATS.pdf](https://aolab.fer.hr/download/repository/Tehnologije_solarnih_celija_20170127_ATS.pdf) (pristupljeno 31.siječnja 2023.)
- [7] <https://www.schrack.hr/know-how/fotonapon-pohrana-energije/osnove-o-fn-celiji-i-modulu> (pristupljeno 31.siječnja 2023.)
- [8] [https://aolab.fer.hr/download/repository/Tehnologije\\_solarnih\\_celija\\_20170127\\_ATS.pdf](https://aolab.fer.hr/download/repository/Tehnologije_solarnih_celija_20170127_ATS.pdf) (pristupljeno 2.veljače 2023)
- [9] Šljivac, D.; Topić, D.: Obnovljivi izvori energije, Elektrotehnička škola Osijek, Osijek, 2013.
- [10] [https://www.researchgate.net/figure/The-Shockley-Queisser-limit-defines-the-maximum-theoretical-efficiency-of-a-solar-cell\\_fig1\\_324819847](https://www.researchgate.net/figure/The-Shockley-Queisser-limit-defines-the-maximum-theoretical-efficiency-of-a-solar-cell_fig1_324819847) (pristupljeno 2.veljače 2023.)
- [11] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/design-of-silicon-cells/anti-reflection-coatings> (pristupljeno 3.veljače 2023.)
- [12] <https://www.science.org/content/article/marrying-two-types-solar-cells-draws-more-power-sun> (pristupljeno 3.veljače 2023.)
- [13] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211379717312123> (pristupljeno 3.veljače 2023.)
- [14] [https://www.nano.gov/sites/default/files/pub\\_resource/nsi\\_status\\_report\\_solar\\_12\\_20\\_15.pdf](https://www.nano.gov/sites/default/files/pub_resource/nsi_status_report_solar_12_20_15.pdf)

## POPIS SLIKA

Slika 1. Hidroelektrana [2] .....	6
Slika 2. Vjetroelektrana Trtat-Krtolin [2] .....	7
Slika 3. Elektrana na plimu i oseku [2] .....	7
Slika 4. Spektar Sunca [3] .....	9
Slika 5. Godišnji hod deklinacije Sunca [1] .....	10
Slika 6. Ozračenost za Split 2020. Godine [4] .....	12
Slika 7. Heliograf [3] .....	14
Slika 8. Piranometar [3] .....	15
Slika 9. Određivanje satnih ozračenosti iz dnevnih [1] .....	16
Slika 10. Silicijska sunčana ćelija [1] .....	18
Slika 11. Fotonaponski sustav [5] .....	19
Slika 11. Ekvivalentni sklop sunčane ćelije [1] .....	20
Slika 12. U-I karakteristika sunčane ćelije [6] .....	21
Slika 13. Serijsko i paralelno spajanje ćelija [7] .....	22
Slika 14. Utjecaj Sunčeva ozračenja na U-I karakteristiku ćelije [1] .....	23
Slika 15. Utjecaj temperature na U-I karakteristiku sunčane ćelije [7] .....	24
Slika 16. Maksimalna snaga sunčane ćelije [8] .....	25
Slika 17. Maksimalna teorijska djelotvornost ćelije u ovisnosti o širini zabranjene vrpce [10] .....	27
Slika 18. Antirefleksijski sloj [11] .....	28
Slika 19. Prednja površina sunčane ćelije [12] .....	29
Slika 20. Struktura sunčane ćelije od amornog silicija [13] .....	31

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Mjesečne srednje dnevne vrijednosti ozračenosti ekstraterestičkog zračenja horizontalne plohe <b><math>H_{oh}/M_{Jm} - 2</math></b> [1].....	13
Tablica 2. Prosječna insolacija za Hvar, Split i Zagreb [1].....	14
Tablica 3. Udio ozračenosti raspršenim zračenjem <b><math>H_d/H</math></b> [1] .....	17
Tablica 4. Ovisnost karakteristika sunčane ćelije o temperaturi [1].....	24
Tablica 5. Usporedba monokristaliničnih i amorfnih sunčanih ćelija [1].....	32

