

IZKORISTEK SILICIJEVIH SONČNIH MODULOV PRI RAZLIČNIH KLIMATSKIH POGOJIH

Sebastijan SEME, Gorazd ŠTUMBERGER

POVZETEK

Članek obravnava vpliv različnih klimatskih razmer na izkoristek silicijevih sončnih modulov. Primerjani so bili mono-kristalni, poli-kristalni in amorfni silicijevi sončni moduli. Na podlagi meritev IU karakteristik sončnega modula in sončnega sevanja, je bil določen izkoristek posameznih silicijevih sončnih modulov. Pokaže se, da je krivulja izkoristka v odvisnosti od različnih klimatskih razmer silicijevih sončnih modulov precej različna. Položna krivulja izkoristka v odvisnosti od jakosti sončnega sevanja se pokaže pri amorfni silicijevih sončnih moduli, medtem ko je pri poli-kristalnih in mono-kristalnih silicijevih sončnih moduli ta krivulja dokaj ravna.

ABSTRACT

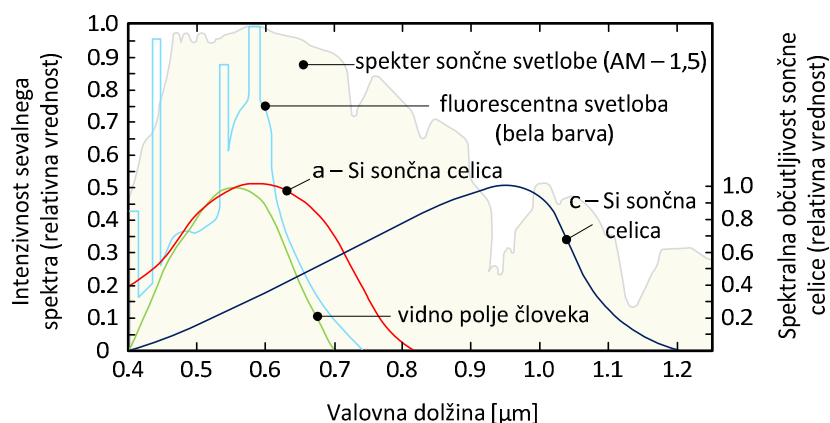
This paper deals with the impact of different climatic conditions on the efficiency of silicon solar modules. The mono-crystalline, the poly-crystalline and the amorphous silicon solar modules are compared. According to the measurements of IU characteristic of the solar module and solar radiation, the efficiency of individual silicon solar modules has been determined. It is shown that the efficiency as a function of different climatic conditions for a silicon solar modules varies considerably. Slowly increasing efficiency characteristic as a function of intensity of solar radiation is shown in amorphous silicon solar modules, while the poly-crystalline and mono-crystalline silicon solar modules, this characteristic is flat.

1. UVOD

Pretvorba sončnega sevanja v električno energijo je neposredna in se vrši v sončnih celicah. Sončne celice so narejene iz različnih materialov, med katerimi izstopajo sončne celice narejene iz silicija. Silicijeve sončne celice so najpogostejše uporabljene in se nadalje delijo še glede na strukturo uporabljenega silicija. Tako ločimo mono-kristalne, poli-kristalne in amorfne silicijeve sončne celice. Vsebina in struktura sončne celice, ki jo bomo izbrali pa je odvisna od razmerja med stroški in izkoristkom pretvorbe energije. V splošnem je mogoče sklepati, da boljši izkoristek sončnih celic doprinese k višjim stroškom proizvodnje. Da bi zmanjšali proizvodne stroške in povečali izkoristek sončnih celic pa je potrebno vpeljati nove materiale, ki se že testirajo in so podrobneje opisani v [1] – [3].

Osnovni in glavni parameter sončne celice je tako izkoristek. Izkoristek je definiran z razmerjem med oddano električno močjo sončne celice in prejeto gostoto moči sončnega

sevanja. Glavni parametri, ki vplivajo na izkoristek sončne celice so vsekakor vrsta polprevodniških materialov, spekter občutljivosti fotoelementa in kontaktni spoji. Izkoristek pretvorbe pa lahko povečamo z zmanjšanjem antirefleksivne plasti, pravilna izbira polprevodniških materialov in z zmanjšanjem temperature površine pri absorpciji [4]. Izkoristek sončnih modulov je omejen tudi s številnimi dejavniki, kot so razpoložljiva gostota moči sončnega sevanja, kontaktne mreže, notranja upornost, refleksija,... Jakost gostote moči sončnega sevanja z večanjem valovne dolžine pada, kot prikazuje slika 1. Izkoristek pretvorbe različnih valovnih dolžin v električno energijo je odvisna od uporabljenih materialov in tehnologije sončne celice oziroma modula. Največja valovna dolžina, pri kateri ima svetloba še dovolj veliko energijo, da lahko zbija elektrone, je odvisna predvsem od uporabljenih materialov. Opisi oznak na sliki 1 so: a – Si pomeni amorfna silicijeva sončna celica, c – Si pomeni kristalne sončne celice (mono-kristalne ali poli-kristalne strukture). Na sliki 1 tako lahko primerjamo intenzivnost sevalnega spektra in spektralne občutljivosti kristalnih in amorfni sončnih celic glede na valovno dolžino. Spektralno občutljivost opisujejo valovne dolžine, v katerih sončna celica deluje z najboljšim izkoristkom. Sončna svetloba ima največjo energijo v vidne delu svetlobe v razponu od $0,4\ \mu\text{m}$ do $0,8\ \mu\text{m}$. Kot je razvidno iz slike 1 so kristalne sončne celice še posebej občutljive na dolge valovne dolžine sončnega sevanja, lahko amorfne silicijeve sončne celice optimalno absorbirajo kratke valovne dolžine svetlobe.



Slika1: Spekter občutljivosti posameznih vrst sončnih celic.

Tehnični podatki napisani na vsaki sončni celici so določeni pri standardnih testnih pogojih (STC) v skladu z IEC pravili [2] pri 1000W/m^2 jakosti sončnega sevanja, faktorju zračne mase $AM=1,5$ in temperaturi sončnega modula 25°C . Kljub temu, da je to zadovoljiv postopek, za primerjavo različnih vrst sončnih celic, vseeno ne podaje vrednosti pri dejanskih klimatskih razmerah pod katerimi sončne celice obratujejo bodisi na prostem ali integrirane v strehe. Tako je namen dela je ovrednotenje različnih vrst silicijevih sončnih modulov, pri čemer bo ocenjen izkoristek sončnih modulov pri različnih klimatskih razmerah za mono-kristalne, poli-kristalne in amorfne silicijeve sončne celice.

2. SILICIJEVE SONČNE CELICE

Namen dela je ovrednotiti električne lastnosti najbolj razširjenih sončnih celic ob direktnem in difuznem sončnem sevanju in pri različnih klimatskih razmerah, se pravi v realnih pogojih delovanja. Pri tem si bomo pomagala z že opravljenimi izsledki objavljenih v [5] in [6]. V tem delu se bomo podrobneje dotaknili predvsem lastnostim treh najbolj razširjenih sončnih celic in njihovih karakteristikam. Glavni namen je predstaviti model, ki omogoča izračun izkoristka sončnih celic in sončnih modulov pri različnih klimatskih pogojih.

Meritve in izračuni so bili izvedeni za tri komercialne silicijeve sončne module ob realnih meteoroloških podatkih. Zanesljive informacije o različnih klimatskih pogojih, ki vplivajo na izkoristek sončnih celic so nujno potrebne za izračun dnevne, tedenske, mesečne in letne proizvodnje električne energije. Prav tako so pridobljeni podatki potrebni za izračun pričakovanih stroškov proizvodnje električne energije za različne sončne module, kar nam omogoča izbiro sončnega modula z najboljšim razmerjem med izkoristkom in ceno za določeno lokacijo. Pri tem je uporabljen model izkoristka η [5] podan kot funkcija treh spremenljivk, in sicer sončnega obsevanja G , faktorja zračne mase AM in temperature sončne celice T (1).

$$\eta = f(G, AM, T) \quad (1)$$

Parametri modela izbranega sončnega modula so pridobljeni iz IU karakteristike, izmerjene, na prostem, pri realnih klimatskih pogojih delovanja. Tako lahko ustreznost modela izkoristka eksperimentalno in simulacijsko ovrednotimo za različne tipe sončnih modulov pri dejanskih pogojih delovanja. V kombinaciji s specifičnimi meteorološkimi podatki je mogoče predvideti tedenske, mesečne in letne izkoristke. Ti podatki omogočajo izbiro tistega tipa modula, ki ima najboljšo razmerje med izkoristkom in stroški sončne elektrarne za določeno lokacijo namestitve.

Kot smo omenili je izkoristek, in posledično tudi IU karakteristika sončnega modula, odvisen od jakosti gostote moči sončnega sevanja G , faktorja zračne mase AM in temperature T . V ta namen smo sestavili eksperimentalni sistem za merjenje IU karakteristik pri zunanjih klimatskih pogojih, ki vključuje različne temperature okolice T_0 , posledično različne temperature sončnih celic T in tudi jakosti gostote moči sončnega sevanja G na ravnino opazovanega sončnega modula. Prav tako smo opazovali čas dneva v letu in hitrost vetra. Z izmerjenimi IU karakteristikami lahko ocenimo izkoristek obravnavanega sončnega modula pri različnih klimatskih pogojih. Meritve smo izvedli za tri serijsko izdelane silicijeve sončne module različnih struktur (mono-kristalne, poli-kristalne in amorfne). Tako smo dobili izkoristek sončnih modulov pri različnih jakostih gostote moči sončnega sevanja, faktorju zračne mase, različnih temperaturah in njihovih kombinacijah.

Na podlagi omenjenih rezultatov, ki so podani v naslednjih podpoglavjih, je bilo preizkušenih več modelov za izračun izkoristka. Pokazalo se je, da je najprimernejši model (2):

$$\eta = p \left[\frac{qG}{G_o} + \left(\frac{G}{G_o} \right)^m \right] \cdot \left[1 + \frac{rT}{T_o} + \frac{sAM}{AM_o} + \left(\frac{AM}{AM_o} \right)^u \right] \quad (2)$$

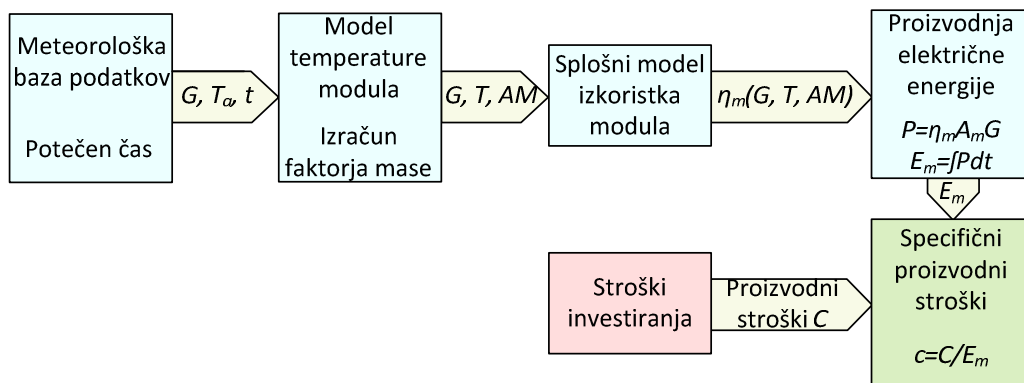
kjer je $G_o = 1000 \text{ W/m}^2$, $T_o = 25^\circ\text{C}$ in $AM_o = 1,5$. Parametre p , q , m , r , s in u je potrebno določiti za vsak tip sončnega modula posebej. Parametri se določijo na podlagi predhodnih meritev, ki smo jih opravili na silicijevih sončnih moduli. Na podlagi meritev in izračunov se poišče srednji kvadratični pogrešek in tako določijo potrebni parametri. Vrednosti parametrov so podane v tabelah I, II in III.

Kot je razvidno iz opravljenih meritev je izkoristek linearna funkcija temperature sončne celice pri konstantnem obsevanju in konstantni zračni masi. Model zapisan z (2) prav tako upošteva nelinearni izkoristek zračne mase. Pri izračunu izkoristka so podatki zračne mase AM pridobljeni glede na datum in čas dneva in tudi glede na geografske koordinate mesta Maribor, kjer so bile opravljene meritve sončnih modulov.

Izkoristek sončnega modula η izračunamo iz meritev IU karakteristike pri dejanskih klimatskih pogojih ob meritvi temperature okolice in modulov ter jakosti sončnega sevanja. Moč modula nato izračunamo kot (3):

$$P(t) = \eta(t) AG(t) \quad (3)$$

kjer A pomeni aktivno površino sončne celice oziroma modula, $G(t)$ jakost gostote moči sončnega sevanja in $\eta(t)$ izkoristek v danem trenutku. Če integriramo moč po času za obdobje enega leta, dobimo letni izkoristek energije E_m . Za lažjo predstavbo je na sliki 2 prikazan diagram poteka izračuna izkoristka sončnega modula v poenostavljeni obliki. Simboli, uporabljeni na sliki 2 so: jakost gostote moči sončnega sevanja na modul G (W/m^2), temperatura okolice T_a ($^\circ\text{C}$), izkoristek modula η (%), površina modula A_m (m^2), izhodna moč modula P (W), letna proizvedena energija modula E_m (kWh), stroški letne proizvodnje C (€) in specifični stroški električne energije c (€/kWh).



Slika 2: Model za napovedovanje dnevnih, mesečnih in letnih izkoristkov modulov in stroškov proizvodnje električne energije.

Ob uporabi (2) in parametrov p , q , m , r , s in u za različne module lahko pri standardnih testnih pogojih (STC: $T_0 = 25\text{ °C}$, $AM_0 = 1,5$, $G_0 = 1000\text{ W/m}^2$) izračunamo izkoristek η_{STC} , moč P_{STC} , in temperaturni koeficient α_{STC} s (4) [5].

$$\begin{aligned}\eta_{STC} &= p(q+1)(2+r+s) \\ P_{STC} &= \eta_{STC} G_{no} A_a \\ \alpha_{STC} &= \left(\frac{\partial \eta}{\partial T} \right)_{STC} = p \frac{(q+1)r}{T_0}\end{aligned}\quad (4)$$

V nadaljevanju bomo predstavili mono-kristalni silicijev sončni modul z najvišjim izkoristkom η_{STC} , poli-kristalni sončni modul, ki ima v določenih pogojih višji izkoristek kot mono-kristalni sončni modul in amorfni silicijev sončni modul z najnižjim izkoristkom η_{STC} . Prav tako ne smemo zanemariti temperaturnega koeficienta α_{STC} , ki vpliva na končni rezultat izkoristka η , kot se to opazi pri mono-kristalnem in poli-kristalnem sončnem modulu. Nizka vrednost temperaturnega koeficienta α_{STC} amorfnega silicijevega sončnega modula navaja le majhno zmanjšanje izkoristka η zaradi segrevanja modula. Pri mono-kristalnem silicijevem sončnem modulu pa zaradi naraščanja temperature beležimo veliko zmanjšanje izkoristka η , kar je zelo pomemben podatek za načrtovalce sončnih elektrarn v vročih podnebnih pogojih.

2.1 Mono-kristalni silicijevi sončni moduli

Mono-kristalni silicijevi sončni moduli so prva generacija sončnih modulov in večina fotonapetostne tehnologije je bila razvita prav na tej vrsti sončnih celic. Kristalni silicij je najobširnejše raziskovan polprevodniški material v primerjavi z drugimi materiali sončnih celic. Najvišji laboratorijski potrjen izkoristek η pri mono-kristalnih sončnih celicah je 24 % [8]. Proizvodnja in prodaja mono-kristalnih modulov je dominirala do leta 2000, od takrat naprej pa se je njihov tržni delež zmanjšal za okrog 40 % zaradi konkurence predvsem poli-kristalnih celic [8], ki bodo opisane v naslednjem podpoglavju. Za mono-kristalne silicijeve sončne celice velja, da so grajene iz enega kristala silicija. Njihova debelina znaša manj kot 200 μm in imajo največji izkoristek, in sicer od 16 pa do 18 %. Ravno zaradi njenega izkoristka se uporabljajo tam, kjer zahtevamo večje razmerje moči na površino. Njihova življenjska doba je preko 30 let. Vse omenjene lastnosti so podane v tabeli I, ki nam služi za lažji pregled lastnosti omenjenih sončnih celic.

Tabela I: Lastnosti mono-kristalnih silicijevih sončnih modulov.

Izkoristek	16 % do 18 % (metoda Czochralskega)
Oblika	Odvisna od mono-kristalnih rezin, okrogle, polokrogle ali kvadratne celice. Okrogle celice so cenejše od polokroglih ali kvadratnih, ker porabijo manj materiala za uporabo le-teh. Kljub temu se okrogle celice v standardnih moduli uporabljajo le redko, zaradi neučinkovitosti zapolnjenega prostora.
Običajna velikost	$10\text{ cm}^2 \times 10\text{ cm}^2$; $12,5\text{ cm}^2 \times 12,5\text{ cm}^2$ ali $15\text{ cm}^2 \times 15\text{ cm}^2$; Ø: 12,5 cm ali 15 cm
Debelina	0,2 mm do 0,3 mm
Videz	kvadratne oblike ali kvadratne s prisekanimi (zaobljenimi) vogali

Barva	temno modra ali črna (z AR plastjo); siva (brez AR plasti)						
Slabosti	Dolgotrajni proizvodni postopki, potrebno žaganje rezin						
Prednosti	Najbolj raziskan material. Tudi v prihodnjih letih bo prevladoval na tržišču, posebej tam, kjer potrebno ugodno razmerje moč/površina.						
Modul	<i>p</i>	<i>q</i>	<i>m</i>	<i>r</i>	<i>s</i>	<i>u</i>	<i>h</i>
mono-Si	23,26	-0,2983	0,1912	-0,09307	-0,9795	0,9865	0,028

2.2 Poli-kristalni silicijevi sončni moduli

Poli-kristalni silicijevi sončni moduli so najbolj razširjeni in so primerni za večje strešne površine in postavitve na prostem. Zmotno je mišljenje, da je mono-kristalna tehnologija tista, ki zagotavlja višji energijski izplen in posledično boljši izkoristek. Številni testi, ki jih opravljajo mednarodne inštitucije v laboratorijih, in praksa, so pokazali, da je poli-kristalna tehnologija tista, ki zagotavlja višje izkoristke in donosnost fotonapetostnih sistemov. Zaradi dobre in preverjene zanesljivosti delovanja in splošne stroškovne učinkovitosti, bo ta tehnologija imela vodilno mesto na trgu še vsaj naslednjih dvajset let. Lastnosti poli-kristalnih silicijevih sončnih modulov so podane v tabeli II.

Tabela II: Lastnosti poli-kristalnih silicijevih sončnih modulov.

Izkoristek	13 % do 16 % (z AR)						
Oblika	Kocka, pravokotnik						
Običajna velikost	10 cm ² × 10 cm ² ; 12,5 cm ² × 12,5 cm ² ; 15 cm ² × 15 cm ² ; 15,6 cm ² × 15,6 cm ² ; in 21 cm ² × 21 cm ²						
Debelina	0,24 mm do 0,3 mm						
Videz	Kvadratne oblike. Metoda vlivanja blokov formira kristale z različno usmerjenostjo. Ker se svetloba odbija različno, se na površini jasno vidijo posamezni kristali (vzorec zmrzali).						
Barva	modra (z AR plastjo); srebrno siva (brez AR plasti)						
Slabosti	V primerjavi s tankoplastnimi tehnologijami daljši proizvodni postopki, potrebno žaganje rezin.						
Prednosti	Najpomembnejši material v naslednjih letih.						
Modul	<i>p</i>	<i>q</i>	<i>m</i>	<i>r</i>	<i>s</i>	<i>u</i>	<i>h</i>
poli-Si	15,39	-0,1770	0,0794	-0,09736	-0,8998	0,9324	0,026

2.3 Amorfn silicijevi sončni moduli

Za razliko od mono-kristalnih in poli-kristalnih sončnih modulov, ki imajo urejeno kristalno strukturo, so amorfn sončni moduli zgrajeni iz silicija, ki ima neurejeno kristalno strukturo. Zaradi neurejeno razporejenih atomov imajo amorfn silicijevi sončni moduli občutno slabši izkoristek od kristalnih sončnih modulov.

Amorfn silicij pridobivamo v visokofrekvenčnih pečeh v delnem vakuumu, skozi katere se ob prisotnosti električnega polja visokih frekvenc prepihujejo plini silan (SiH₄) in diboran (B₂H₆) ali fosfin (PH₃), s pomočjo katerih se v siliciju dodaja bor (B) ali fosfor (P). Na očiščen steklen substrat se nanese spodnja kontaktna plast. Površina se nato z noži ali z laserjem strukturira – razdeli v trakove, v vakuumu pa se pod vplivom električnega polja visokih frekvenc nanaša plast amorfnega silicija. Ponovno sledi delitev v trakove, zadnji

korak pa je nanašanje kovinskih elektrod. V tabeli III so poleg izkoristka in drugih lastnosti podane tudi prednosti in slabosti amorfnih tankoplastnih sončnih modulov.

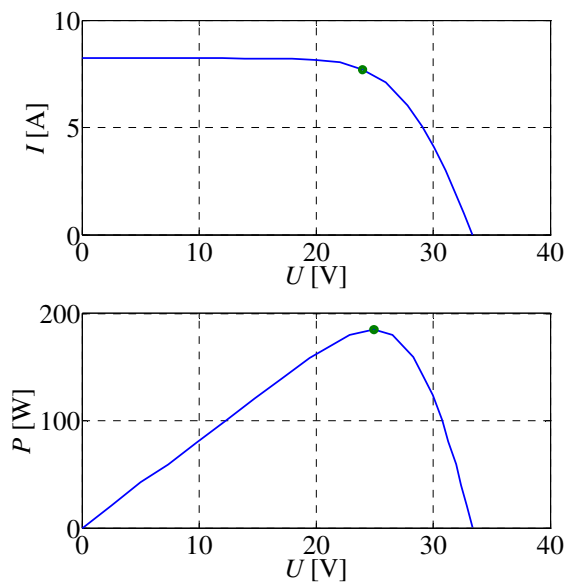
Tabela III: Lastnosti amorfnih silicijevih sončnih celic.

(i) Izkoristek	(ii) 5 % do 8 % (v ustaljenih razmerah)							
(iii) Običajna velikost	(iv) standardni moduli, maksimalno $0,79 \text{ m}^2 \times 2,44 \text{ m}^2$; (v) specialni moduli, maksimalno $2 \text{ m}^2 \times 3 \text{ m}^2$;							
(vi) Debelina	(vii) 1 mm do 3 mm podloge (nekaljeno steklo, kovina, občasno 0,005 mm plastike), s približno 1 μm premaza od katerega je približno 0,3 μm amorfnega silicija							
(viii) Videz	(ix) oblika po izbiri							
(x) Barva	(xi) Rdeče rjava do modra ali modra - vijolična							
(xii) Slabosti	(xiii) manjši izkoristek, krajša življenjska doba							
(xiv) Prednosti	(xv) Žaganje rezin ni potrebno, možnost znatnega znižanja proizvodnih stroškov. Ob odpravi pomanjkljivosti najbolj perspektiven material							
(xvi) Modul	(xvii) p	(xviii) q	(xix) m	(xx) r	(xxi) s	(xxii) u	(xxiii) h	
(xxiv) a-Si	(xxv) 36,02	(xxvi) 0,7576	(xxvii) - 01	(xxviii) 0,66	(xxix) - 0,02863	(xxx) - 1,1432	(xxxi) 22	(xxxii) 0,022

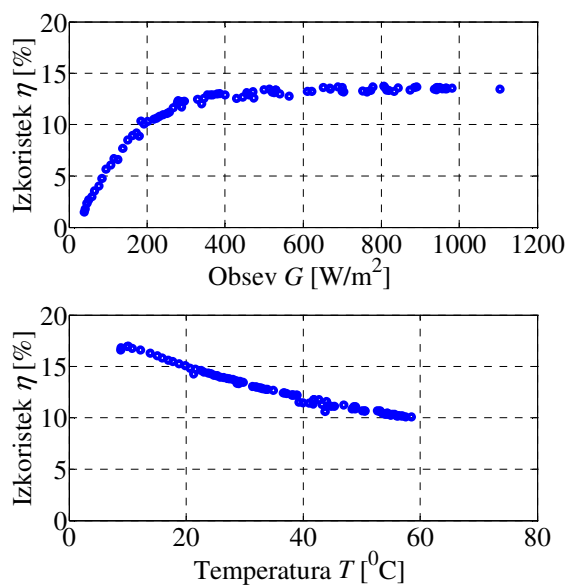
3. REZULTATI

Opravili smo vrsto meritev električnih lastnosti sončnih modulov pri različnih klimatskih pogojih. Rezultati meritev so prikazani v nadaljevanju. Tako smo za vsaki modul izmerili IU in PU karakteristike pri različnih klimatskih pogojih, ter iz njih določili točke maksimalne moči. Slika 3 kaže primer določitve točke maksimalne moči iz IU in PU karakteristik. Omenjena karakteristika je bila izmerjena pri jakosti sončnega sevanja $G=986 \text{ W/m}^2$, zračni masi $AM=1,45$ in temperaturi sončne celice $T=56,27^\circ\text{C}$. Temperatura okolice je bila $T_a=33,1^\circ\text{C}$ in hitrost vetra $10,9 \text{ m/s}$. Pri omenjenih pogojih smo izračunali izkoristek mono-kristalnega modula $13,82\%$. Iz množice točk maksimalne moči, določenih po opisanem postopku, smo določili izkoristek sončnega modula v odvisnosti od jakosti sončnega sevanja in temperature celice, kot kaže slika 4. Izkoristek v odvisnosti od jakosti sončnega sevanja $\eta=f(G)$, prikazan na sliki 4 levo, je določen pri temperaturi sončne celice $T=25^\circ\text{C}$ in faktorju zračne mase $AM=1,5$. Izkoristek v odvisnosti od temperature sončne celice $\eta=f(T)$, prikazan na sliki 4 desno, je določen pri jakosti sončnega sevanja $G=1000 \text{ W/m}^2$ in faktorju zračne mase $AM=1,5$. Izkoristek v odvisnosti od jakosti sončnega sevanja in temperature sončne celice $\eta=f(G,T)$, je predstavljen na sliki 5. Slika 5 levo kaže množico točk določenih iz meritev, medtem ko slika 5 desno kaže odvisnost izkoristka sončnega modula od jakosti sončnega sevanja in temperature okolice določene po (2). Iz slike 5 vidimo, da z višanjem jakosti sončnega sevanja izkoristek mono-kristalnega sončnega modula narašča, medtem ko z višanjem temperature sončnega modula pada. Omenjena odvisnost izkoristka od jakosti sončnega sevanja in temperature je od modulov do modulov različna. Največje razlike se kažejo predvsem pri različnih vrstah sončnih modulov, zato bomo v nadaljevanju pokazali

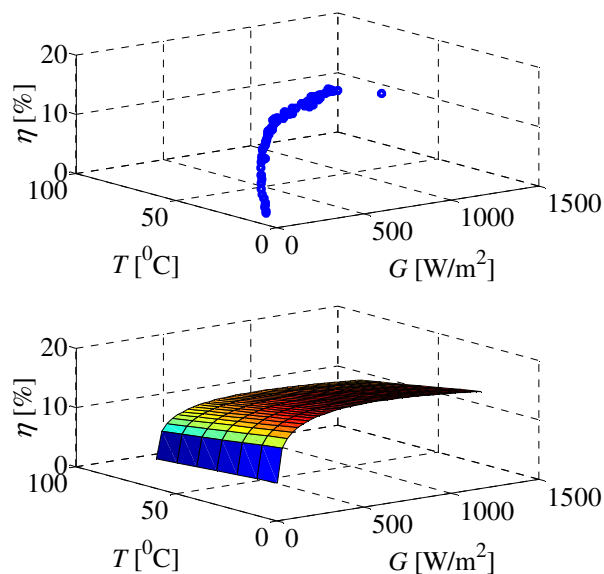
odvisnost izkoristka od jakosti sončnega sevanja in temperature za poli-kristalni sončni modul in amorfni sončni modul.



Slika 3: IU in PU karakteristika mono-kristalnega sončnega modula pri vrednostih sončnega obseva $G=986 \text{ W/m}^2$, zračni masi $AM=1,45$ in temperaturi sončne celice $T=56,27 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

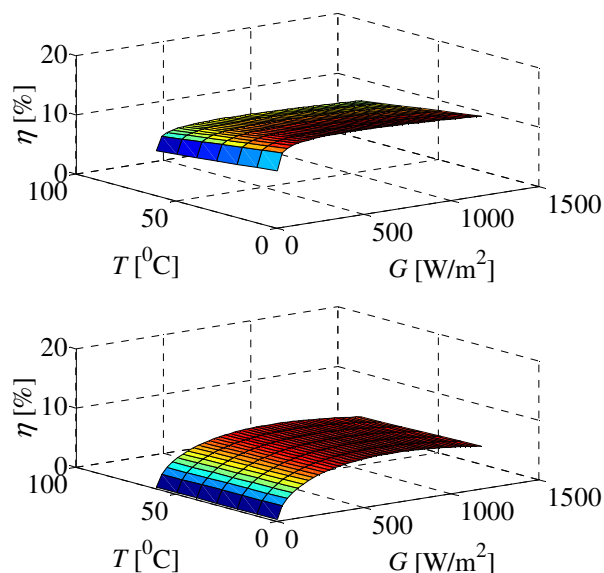


Slika 4: Izkoristek mono-kristalnega sončnega modula v odvisnosti od jakosti sončnega sevanja G in temperature sončne celice T .



Slika 5: 3D predstavitev odvisnosti izkoristka mono-kristalnega sončnega modula $\eta=f(G,T)$ od jakosti sončnega sevanja G in temperature sončne celice T .

Slika 6 kaže 3D predstavitev odvisnosti izkoristka poli-kristalnega (slika 6, levo) in amorfne (slika 6, desno) sončnega modula $\eta=f(G,T)$ od jakosti sončnega sevanja G in temperature sončne celice T .



Slika 6: 3D predstavitev odvisnosti izkoristka poli-kristalnega in amorfne sončnega modula $\eta=f(G,T)$ od jakosti sončnega sevanja G in temperature sončne celice T .

Z modeli izkoristka, ki so prikazani na slikah 5 in 6, za različne tipe sončnih modulov in z dosegljivimi meteorološkimi podatki za različna mesta lahko izračunamo letni izkoristek. Tako lahko primerjamo izkoristek različnih vrst sončnih modulov na različnih mestih in pod različnimi klimatskimi pogoji. Najboljši sončni modul glede na razmerje letnega izkoristka proizvodnje električne energije in z njim povezanih stroškov lahko izberemo že v fazi načrtovanja gradnje sončne elektrarne, kot je podrobneje pokazano v [9].

4. ZAKLJUČEK

Cilj ovrednotiti mono-kristalne, poli-kristalne in amorfne silicijeve sončne module pri različnih klimatskih pogojih. Rezultati so pokazali, da dosega testni mono-kristalni sončni modul najvišje izkoristke, ki je 16 %, pri 2/3 jakosti sončnega sevanja podanega pri standardnih testnih pogojih. Obravnavani poli-kristalni sončni modul je sestavljena iz večjega števila kristalov. Prednost pred mono-kristalnimi je v skoraj 10–20 % cenejši izdelavi in lažji razporeditvi v kvadratno obliko. Testni poli-kristalni sončni modul ima pri dobrih pogojih sončnega sevanja izkoristek do 14 %. Poli-kristalni sončni moduli so najbolj razširjene in so primerne za večje strešne površine in postavitve na prostem. Poli-kristalni sončni moduli so izredno primerne za naše podnebje, saj se odlično obnašajo v območju difuzne svetlobe. Obravnavani amorfni sončni modul ima neurejeno razporejene atome, kar se odraža v slabšem izkoristku, ki je do 7 %. Sončni moduli iz amornega silicija potrebujejo za postavitve dvakrat tolikšno površino kot moduli s kristalnimi celicami, da dosežejo enako izhodno moč. Primerni so za večje odprte površine, pročelja, kjer nismo omejeni s prostorom. So cenovno ugodnejši, izredno dobro delujejo pod slabšimi jakostmi gostote moči sončnega sevanja, imajo visoko absorpcijo sončnega sevanja in dobro izkoriščajo difuzno svetlobo.

Zmotno je mišljenje, da je mono-kristalna tehnologija tista, ki zagotavlja višji energijski izplen in posledično boljši izkoristek. Številni testi, ki jih opravljajo mednarodne institucije v laboratorijih, praksa in tudi naša analiza silicijevih sončnih modulov, so pokazali, da je poli-kristalna tehnologija tista, ki zagotavlja višje izkoristke in donosnost sončnih elektrarn. Zaradi dobro preizkušene zanesljivosti delovanja in splošne stroškovne učinkovitosti tehnologije kristalnih silicijevih sončnih modulov, bo ta imela vodilno mesto na trgu še vsaj naslednje desetletje.

5. LITERATURA

- [1] M. Lipiński, P. Panek, Z. Świątek, E. Bełtowska, R. Ciach: Double porous silicon layer on multi-crystalline Si for photovoltaic application, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 72 (2002) 271-276
- [2] A. Goetzberger, C. Hebling: Photovoltaic materials, past, present, future., *Solar Energy Materials and Solar Cells* 62 (2000) 1-19
- [3] A. Blakers, K. Weber, V. Everett, S. Deenapanray, E. Franklin: Sliver solar cells and moduls, Centre for Sustainable Energy, Systems Australian National University, (2004)

- [4] K. Nakajima, K. Ohdaira, K. Fujiwar, W. Pan: Solar cell system using a polished concave Si-crystal mirror, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 72 (2005) 323-329
- [5] W. Durisch, B. Bitnar, J.-C. Mayor, H. Kiess, K. Lam, J. Close: Efficiency model for photovoltaic modules and demonstration of its application to energy yield estimation, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91 (2007) 79-84
- [6] S. Seme: The impact of the solar radiation on silicon solar cells, XIII International PhD Workshop 2011
- [7] R. G. Ross: Interface design considerations for terrestrial solar cell modules, *Proceedings of the 12th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Baton Rouge, (1976), str. 801-806
- [8] P. Jayarama Reddy, *Science & Technology of Photovoltaics*, 2nd ed., BS Publications, Hyderabad, 2010
- [9] T. Veberic, *Vpliv direktnega in difuznega sončnega sevanja na silicijeve sončne celice*, diplomsko delo, FERi, Maribor 2011

NASLOV AVTORJEV

dr. Sebastijan Seme¹

red. prof. Gorazd Štumberger²

¹Univerza v Mariboru, Fakulteta za energetiko
Hočevarjev trg 1, 8270 Krško, Slovenija

²Univerza v Mariboru, Fakulteta, za elektrotehniko, računalništvo in informatiko
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija

Elektronska pošta: sebastijan.seme@uni-mb.si