

Utjecaj zasjenjenja na fotonaponske sustave ***Influence of shading on the photovoltaic systems***

D. Topić*, G. Knežević, D. Šljivac, M. Žnidarec

Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Sveučilište J.J.
Strossmayera u Osijeku, Hrvatska

*Autor za korespondenciju. E-mail: danijel.topic@ferit.hr

Sažetak

Ovaj rad istražuje utjecaj zasjenjenja na fotonaponske sustave. Napravljen je pregled literature koja proučava utjecaj zasjenjenja i nataložene prljavštine na proizvodnju električne energije fotonaponskih sustava. Proučiti će se utjecaj zasjenjenja na karakteristike polikristalnih fotonaponskih modula temeljen na mjerenjima i analizi rezultata. Na temelju mjerenja, modelirati i izračunati će se utjecaj zasjenjenja na proizvodnju električne energije fotonaponskih sustava s polikristalnim fotonaponskim modulima.

Abstract

This paper deals with influence of shading on photovoltaic systems. Review of scientific papers dealing with influence of shading and influence of dust deposition on electricity generation of the photovoltaic systems will be shown. Influence of shading on characteristic of the multicrystalline PV module will be measured and investigated. Based on measurement results, influence of shading on electricity generation of the PV system with multicrystalline PV modules will be modelled and expected electricity generation will be calculated.

Ključne riječi: zasjenjenje, polikristalni fotonaponski moduli, fotonaponski sustav, gubici električne energije, proizvodnja električne energije.

1. Uvod

Tranzicija gospodarstava razvijenih zemalja svijeta u nisko-ugljično gospodarstvo rezultiralo je masovnom integracijom elektrana na obnovljive izvore energije u elektroenergetski sustav. Razne potpore i pozitivna klima vezana uz obnovljive izvore energije rezultirale su procijenjenim udjelom u ukupno proizvedenoj električnoj energiji u 2016. godini od 24,5%, od kojih je 16,6% proizvedeno u konvencionalnim hidroelektranama. Najveću godišnju stopu rasta instalirane snage imaju fotonaponski (FN) sustavi s oko 75 GW novoinstaliranih kapaciteta, što čini rast od oko 33% u odnosu na 2015. godinu. Prema [1], procijenjena ukupna instalirana snaga FN sustava u 2016. godini je iznosila 303 GW [1].

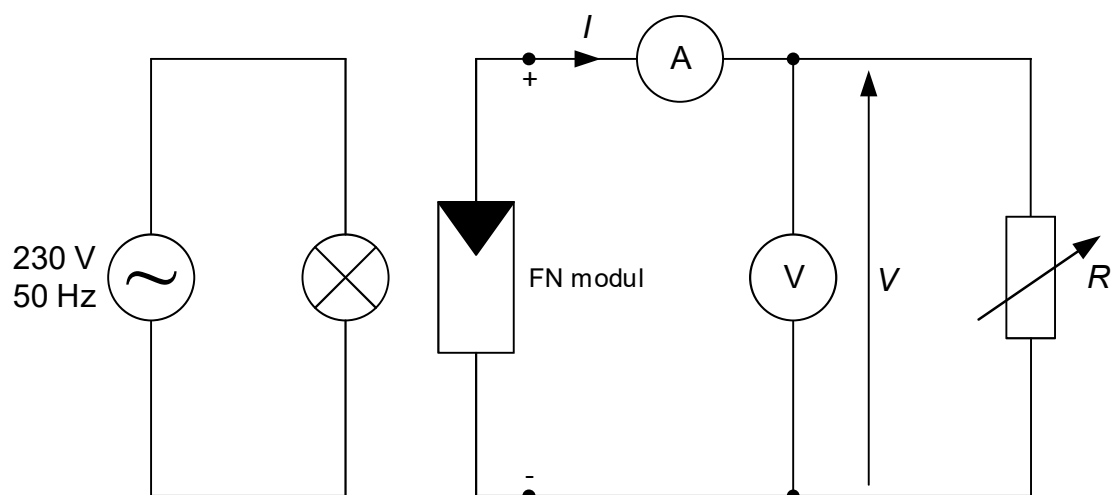
Kako je svaki sustav za proizvodnju električne energije ovisan o raznim čimbenicima koji utječu na njega tako su i FN sustavi ovisni o nekoliko ključnih čimbenika. Prvi i najvažniji čimbenik je intenzitet sunčevog zračenja koji je neophodan za proizvodnju električne energije. Dođe li do promjene u intenzitetu sunčevog zračenja, doći će i do promjene izlazne snage ovih sustava. Čimbenici kao što su temperatura, klimatski uvjeti i zasjenjenje dodatno unose gubitke u proizvodnji električne energije [2]. Utjecaj zasjenjenja na strujno-naponske karakteristike FN modula proučen je u [3], [4], [5], [6] i [7]. Rezultati istraživanja su pokazali da gubici snage uslijed zasjenjenja ovise o veličini i položaju zasjenjene površine FN modula te konfiguraciji FN ćelija i zaobilaznih dioda. Matematički model za određivanje optimalne konfiguracije FN sustava uzimajući u obzir među-redno zasjenjenje FN modula je obrađen u [8]. Utjecaj zasjenjenja na proizvodnju električne energije FN modula uzimajući u obzir orijentaciju, broj zaobilaznih dioda, konfiguraciju FN ćelija i među-redno zasjenjenje proučen je u [9]. Zasjenjenje površine FN modula može nastati i uslijed taloženja čestica tijekom vremena. Količina nataloženih čestica ovisi u geografskom položaju, uvjetima instalacije FN sustava te o klimatskim uvjetima. Prema [10], slučaju dugih razdoblja bez kiša, proizvodnja električne energije FN sustava se može smanjiti i za 15%. Utjecaj taloženja čestica na karakteristike proučeni su i u [11] i [12]. U 2. poglavlju rada opisana je metoda mjerenja I - U karakteristika, tehničke karakteristike FN modula na kojemu su mjerenja izvršena te su opisani scenariji zasjenjenja. Rezultati mjerenja su grafički prikazani u 3. poglavlju pomoću I - U i P - U karakteristika. U 4. poglavlju je izvršena analiza utjecaja zasjenjenja na izlaznu snagu modula i proizvodnju električne energije FN sustava snage 10 kW_p.

2. Metodologija mjerenja

Sva mjerenja na FN modulima su izvršena u Laboratoriju za obnovljive izvore energije na FERIT-u Osijek.

2.1. Mjerenje I - U karakteristika

Kao izvor svjetlosti, za mjerenja je korišten umjetni izvor svjetlosti sastavljen od halogenih žarulja. Valna duljina svjetlosti halogenih žarulja se najbolje podudara s valnom duljinom svjetlosti Sunca. Za mjerenje I - U karakteristika korišteni su izmjenični izvor električne energije za napajanje izvora svjetlosti, piranometar za mjerenje intenziteta svjetlosnog zračenja, digitalni vatmetar za mjerenje napona i struje, regulacijski otpornik i spojni vodiči. Električna shema korištena za mjerenje I - U karakteristike prikazana je na slici 1 dok je postupak mjerenja u laboratorijskim uvjetima prikazan na slici 2.



Slika 1. Shema strujnog kruga za mjerenje $I-U$ karakteristika



Slika 2. Mjerenje $I-U$ karakteristika u laboratoriju

Utjecaj zasjenjenja ispitivan je mjerenjima na polikristalnom FN modulu BISOL BMU-250. Tehničke karakteristike FN modula BISOL BMU-250 prikazane su u tablici 1 [13].

Tablica 1. Tehničke karakteristike FN modula BISOL BMU-250

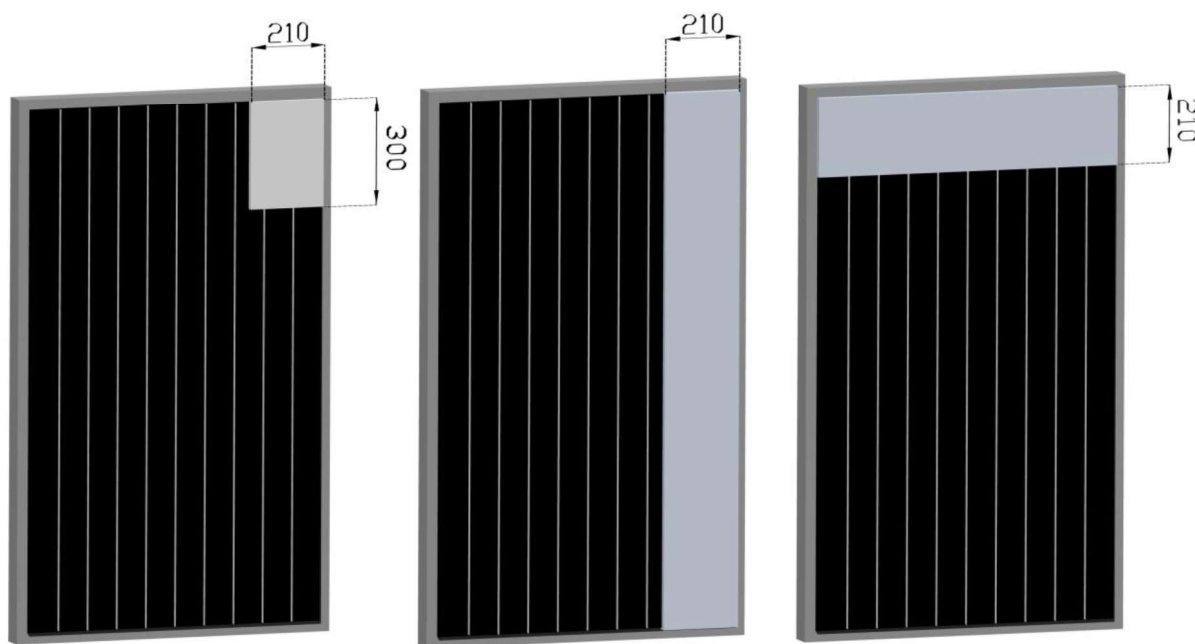
Nazivna snaga P_{mpp} [W]	250
Napon u točki maksimalne snage U_{mpp} [V]	30,3
Struja u točki maksimalne snage I_{mpp} [A]	8,25
Struja kratkog spoja I_{sc} [A]	8,75
Napon praznog hoda U_{oc} [V]	38,4
Učinkovitost FN modula η_m [%]	15,3
Učinkovitost FN ćelije η_c [%]	17,1
NOCT [°C]	44
Temperaturni koeficijent struje α [mA/°C]	+4,9
Temperaturni koeficijent napona β [mV/°C]	-121
Temperaturni koeficijent snage γ [%/°C]	-0,35
Dimenzije (D x Š x V) [mm x mm x mm]	1649 x 991 x 40

2.2. Simulacija zasjenjenja

U ovom radu je izvršeno snimanje I - U karakteristika za sljedeće scenarije zasjenjenja:

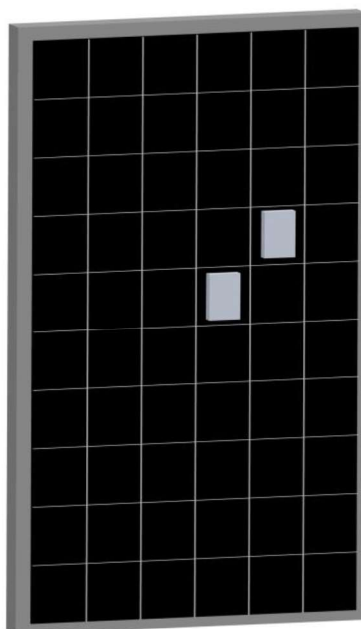
- Zasjenjen gornji desni kut
- Zasjenjen desni stupac
- Zasjenjen prvi red
- Simulacija ptičjeg izmeta kao zasjenjenja

U prvom scenariju zasjenjenja, gornji desni kut, zasjenjena je površina dimenzija 210 x 300 mm u gornjem desnom kutu FN modula. Ova vrsta scenarija prekriva dvije FN ćelije prva dva reda u stupcu najbližem desnom rubu. Površina scenarija zasjenjenja desnog stupca prekriva stupac FN ćelija uz desni rub modula čija širina iznosi 210 mm, a dužina mu je jednaka dužini cijelog FN panela. Površina scenarija zasjenjenja prvog reda prekriva red FN ćelija uz gornji rub modula čija je širina jednaka širini cijelog modula. Modeli FN modula s prva tri scenarija zasjenjenja te dimenzijama zasjenjene površine prikazani su na slici 3.



Slika 3. Prikaz scenarija zasjenjivanja FN modula: gornji desni kut (lijevo), desni stupac (sredina), prvi red (desno)

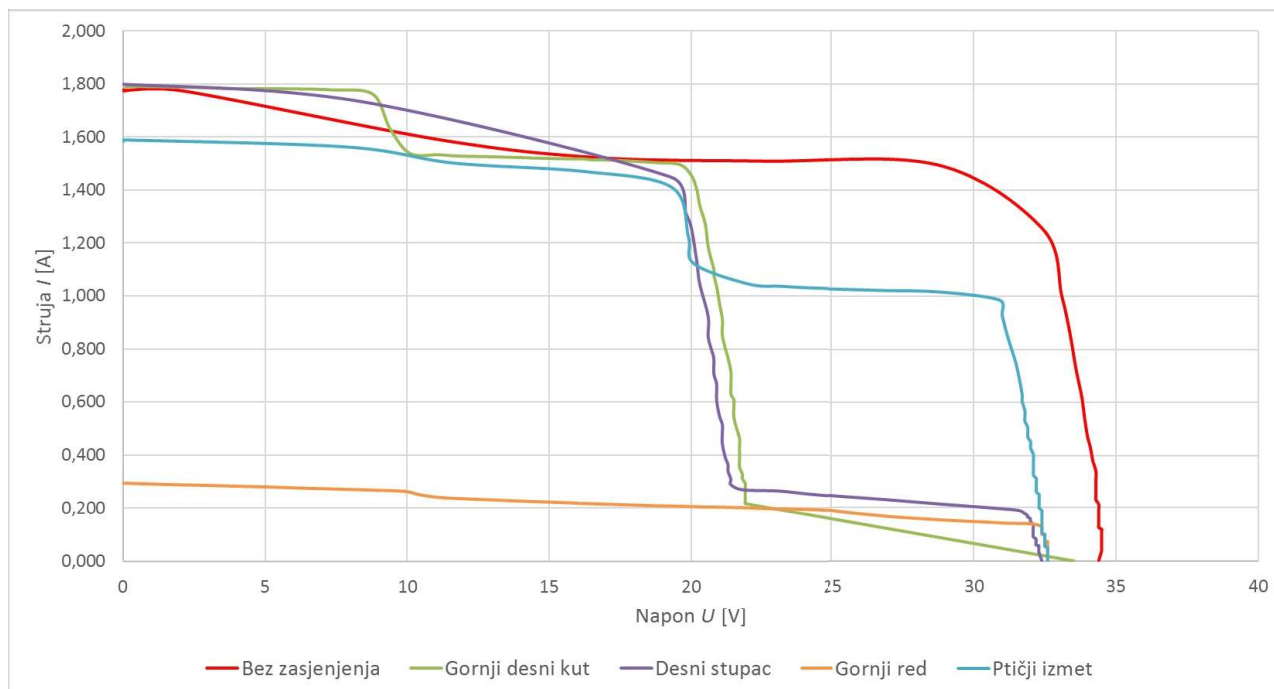
Zadnji scenarij zasjenjenja je simulacija ptičjeg izmeta. Zasjenjenje se sastoji od dvije površine dimenzija 70 x 60 mm koje simuliraju ptičji izmet. Prva površina je postavljena u 3. stupac, 5. red, a druga u 4. stupac, 4. red FN ćelija. Simulacija ptičjeg izmeta kao zasjenjenja na modelu FN modula prikazana je na slici 4.



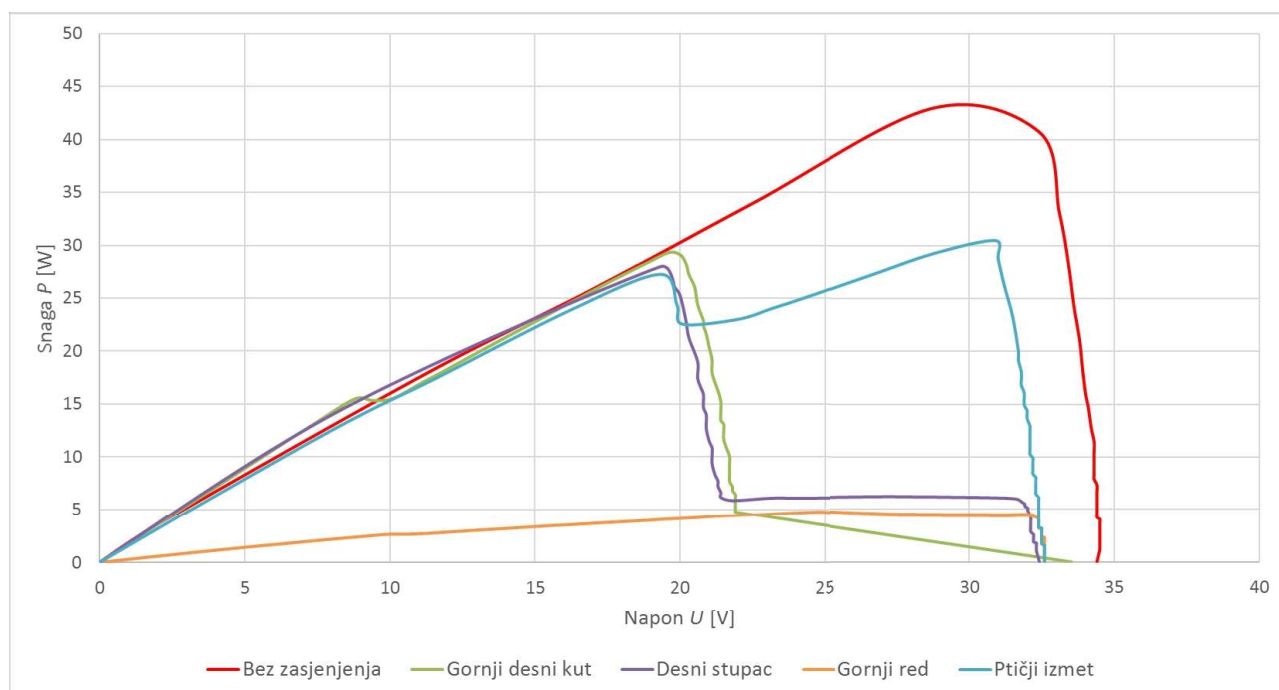
Slika 4. Simulacija ptičjeg izmeta kao zasjenjenja

3. Rezultati mjerenja

Na temelju mjerenja formirane su I - U i P - U karakteristike prikazane na slici 5 i slici 6 za različite scenarije zasjenjenja.

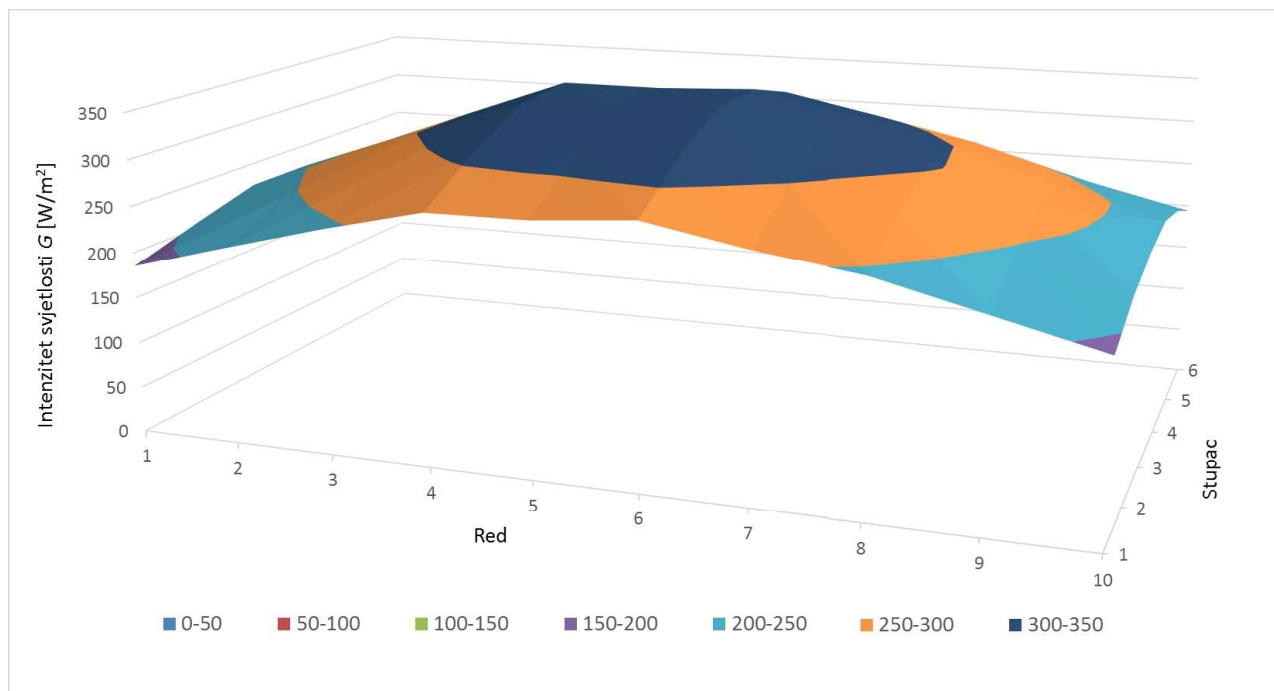


Slika 5. I - U karakteristike za različite scenarije zasjenjenja



Slika 6. P - U karakteristike za različite scenarije zasjenjenja

Srednja vrijednost intenziteta zračenja umjetnog izvora svjetlosti prilikom mjerenja svih *I-U* karakteristika iznosi 270,51 W/m². Distribucija intenziteta svjetlosti po površini FN modula BISOL BMU-250 prilikom mjerenja *I-U* karakteristika prikazana je na slici 7.



Slika 7. Distribucija intenziteta svjetlosti po površini FN modula

4. Analiza rezultata mjerenja

Izlazna snaga nezasjenjenog FN modula u točki maksimalne snage iznosi 42,93 W. Na osnovu mjerenja izračunati su postotni gubici snage uslijed zasjenjenja FN modula po pojedinim scenarijima u odnosu na izlaznu snagu nezasjenjenog modula prema relaciji

$$P_{g\%} = \frac{P_n - P_s}{P_n} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

gdje su:

$P_{g\%}$ – postotni gubitak snage

P_s – snaga u točki maksimalne snage za pojedini scenarij zasjenjenja

P_n – snaga u točki maksimalne snage nezasjenjenog FN modula.

Izlazna snaga u točki maksimalne snage za slučaj zasjenjenja prvog reda FN modula iznosi 4,74 W. Postotni gubitak snage za scenarij zasjenjenja prvog reda stoga iznosi:

$$P_{g\%} = \frac{P_n - P_s}{P_n} \cdot 100 = \frac{42,93 - 4,74}{42,93} \cdot 100 = 88,96 \%$$



Postotni gubici snage za sve scenarije zasjenjenja prikazani su u tablici 2.

Tablica 2. Postotni gubici snage za pojedini slučaj zasjenjenja

Scenarij zasjenjenja	Postotni gubitak snage [%]
Gornji desni kut	31,75
Desni stupac	34,91
Prvi red	88,96
Ptičji izmet	29,11

Utjecaj zasjenjenja na proizvodnju električne energije iz FN sustava izrađenog od polikristalnih FN modula izračunat je pomoću mjerenja o dozačenoj energiji Sunca preuzetih iz PVGIS sustava. Tablica 3 prikazuje prosječnu dnevnu i mjesečnu proizvedenu električnu energiju iz FN sustava snage 1 kW_p postavljenog na lokaciju zgrade FERIT-a Osijek za pojedine mjesece u godini [14]. FN sustav je načinjen od FN modula izrađenih od kristalnog silicija postavljenih pod kutom od 33°, koliko iznosi i optimalni kut za ovu lokaciju. FN moduli su orijentirani prema jugu, a pretpostavljeni gubici snage FN sustava iznose 14%.

Tablica 3. Dnevna i mjesečna prosječna proizvodnja električne energije iz FN sustava snage 1 kW_p za lokaciju zgrade FERIT-a Osijek

Mjesec	E_d [kWh]	E_m [kWh]
siječanj	1,36	42,1
veljača	2,12	59,5
ožujak	3,42	106
travanj	4,10	123
svibanj	4,32	134
lipanj	4,32	133
srpanj	4,6	143
kolovoz	4,44	138
rujan	3,55	10
listopad	2,96	91,9
studen	1,78	53,4
prosinac	1,09	33,8
Ukupno godišnje [kWh]		1164,7

Gdje su:

E_d – prosječna dnevna proizvedena električna energija iz FN sustava snage 1 kW_p

E_m – prosječna mjesečna proizvedena električna energija iz FN sustava snage 1 kW_p

Na osnovu mjerenja od mjesečnoj proizvodnji električne energije iz FN sustava snage 1 kW_p preuzetih iz PVGIS sustava za lokaciju zgrade FERIT-a Osijek, prikazanih u tablici

3, izračunati će se godišnja proizvedena električna energija za FN sustav snage 10 kW_p za nezasjenjenje FN module i za scenarij zasjenjenja ptičjim izmetom. Prema tablici 2, gubici izlazne snage FN modula za scenarij zasjenjenja ptičjim izmetom iznose 29,11%. Tablica 4 prikazuje prosječnu mjesečnu i godišnju proizvedenu električnu energiju iz FN sustava snage 10 kW_p za scenarij zasjenjenja ptičjim izmetom te za scenarij nezasjenjenih FN modula.

Tablica 4. Mjesečna i godišnja prosječna proizvodnja električne energije iz FN sustava snage 10 kW_p za scenarij zasjenjenja ptičjim izmetom i za nezasjenjene FN module

Mjesec	Zasjenjeni FN moduli (ptičji izmet) [kWh]	Nezasjenjeni FN moduli [kWh]	Gubici [kWh]
siječanj	298,45	421	122,55
veljača	421,8	595	173,2
ožujak	751,43	1060	308,57
travanj	871,95	1230	358,05
svibanj	949,93	1340	390,07
lipanj	942,84	1330	387,16
srpanj	1013,73	1430	416,27
kolovoz	978,28	1380	401,72
rujan	758,52	1070	311,48
listopad	651,48	919	267,52
studen	378,55	534	155,45
prosinac	239,61	338	98,39
Ukupno godišnje [kWh]	8256,56	11647	3390,44

5. Zaključak

Zasjenjenje ima ogroman utjecaj na izlazne karakteristike fotonaponskih modula. Prema mjerenjima se može zaključiti da zasjenjenje značajno deformira *I-U* i *P-U* karakteristike fotonaponskih modula. Stupanj deformacije ovisi o položaju i veličini zasjenjenje površine te o broju i spoju zaobilaznih dioda ugrađenih u fotonaponski modul. Analizom rezultata mjerenja najveći gubici snage se pojavljuju u slučaju zasjenjenja prvog reda fotonaponskog modula te iznose 88,96%. Razlog ovolikog iznosa gubitka snage je način spajanja zaobilaznih dioda jer se ovim scenarijem zasjenjenja propusno polariziraju sve zaobilazne diode te se premošćuju svi serijski spojeni stupci fotonaponskih ćelija. Iz rezultata mjerenja se vidi i vrlo mala razlika u postotnim gubicima između scenarija zasjenjenja gornjeg desnog kuta i cijelog desnog, iako je razlika u zasjenjenoj površini velika. Razlog maloj razlici postotnih gubitaka snage je također premoštenje stupaca fotonaponskih ćelija pomoću zaobilaznih dioda.

Promatran je i utjecaj zasjenjenja površine fotonaponskog modula ptičjim izmetom na godišnju proizvodnju električne energije fotonaponskog sustava snage 10 kW_p. Utjecaj je izračunat pomoću izmjerenih *I-U* karakteristika i podataka o dnevnoj i mjesečnoj prosječnoj proizvodnji električne energije iz 1 kW_p fotonaponskog sustava za pojedine

mjeseci u godini, preuzetih iz PVGIS sustava. Zasjenjenje je smanjilo godišnju proizvedenu električnu energiju iz promatranog fotonaponskog sustava za 3390,44 kWh. Ovim smanjenjem se vidi velik utjecaj zasjenjenja na proizvodnju električne energije, a samim time i utjecaj na vrijeme povrata investicije.

6. Literatura

- [1] REN21 2017. Renewables 2017 Global Status Report // *REN21 Secretariat*, Paris, 2017.
- [2] Masters, Gilbert M. Renewable and Efficient Electric Power Systems. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004.
- [3] Seme, Sebastijan; Štumberger, Gorazd. Shading effects in the IU characteristic of a mono-crystalline PV module // *Proceedings of XII INTERNATIONAL PHD WORKSHOP OWD 2010 / Kłapyta, Grzegorz* (ISBN 83-922242-7-2). Wisła, Poljska, 23.10.-26.10.2010.
- [4] Zulu, Andrew; Kashweka. The Influence of Artificial Light and Shading on Photovoltaic Solar Panels // *International Journal of Energy Engineering*, 3(2013), 1; 15-20. (ISSN 2163-1891)
- [5] Sun, Yunli; Li, Xiangzhi; Hong, Ruijiang; Shen, Hui. Analysis on the Effect of Shading on the Characteristics of Large-scale on-grid PV System in China // *Energy and Power Engineering*, 5(2013), 4B; 215-218.
- [6] Dolara, Alberto; Lazariou, George Cristian; Leva, Sonia; Manzolini, Giampaolo. Experimental investigation of partial shading scenarios on PV(photovoltaic) modules // *Energy*, 55(2013); 466-475.
- [7] Žnidarec, Matej; Topić, Danijel; Bušić, Josip. Influence of Shading on I-V Characteristics of Thin Film PV Modules // *Journal of Energy Technology*, 10(2017), 1; 47-58.
- [8] Topić, Danijel; Knežević, Goran; Fekete, Krešimir. The mathematical model for finding an optimal PV system configuration for the given installation area providing a maximal lifetime profit // *Solar Energy*, 144(2017); 750-757.
- [9] Knežević, Goran; Topić, Danijel; Žnidarec, Matej; Štumberger, Bojan; Hadžiselimović, Miralem; Seme, Sebastijan. Comparison of the Shading Influence on PV Modules of Different Technologies // *Proceeding of 10th International Conference on Sustainable Energy and Environmental Protection / Krobe, Jurij; Olabi, Abdul Ghani; Goričanec, Darko; Božičnik, Stanislav* (ISBN 978-961-286-061-5). Bled, Slovenija, 27.6.-30.6.2017.
- [10] Weber, Bernd; Quiñones, Angélica; Almanza, Rafael; Duran, M. Dolores. Performance Reduction of PV Systems by Dust Deposition // *Energy Procedia*, 57(2014); 99-108.
- [11] Rao, Abhishek; Pillai, Rohit; Mani, Montro; Ramamurthy, Praveen. Influence of Dust Deposition on Photovoltaic Panel Performance // *Energy Procedia*, 54(2014); 690-700.

- [12] Saidan, Motasem; Albaali, Abdul Ghani; Alasis, Emil; Kaldellis, John K. Experimental study on the effect of dust deposition on solar photovoltaic panels in desert environment // *Renewable Energy*, 92(2016); 499-505.
- [13] Bisol BMU-250. http://www.bisol.com/images/Datasheets/CRO/BISOL_Premium_BMU_HR.pdf pristupljeno 7.7.2017.
- [14] Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/> pristupljeno 17.7.2017.