



UNIVERZITET U NIŠU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



Ivana S. Radonjić Mitić

**ISPITIVANJE ENERGETSKE EFIKASNOSTI
SOLARNIH MODULA U ZAVISNOSTI OD
NJIHOVE ZAPRLJANOSTI U REALNIM
KLIMATSKIM USLOVIMA U NIŠU**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Niš, 2018.



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF SCIENCES AND MATHEMATICS
DEPARTMENT OF PHYSICS



Ivana S. Radonjić Mitić

**INVESTIGATION OF ENERGY EFFICIENCY
OF PV SOLAR MODULES DEPENDING ON
THEIR SOILING IN REAL CLIMATE
CONDITIONS IN NIŠ**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2018.

Подаци о докторској дисертацији

Ментор:	Академик Томислав М. Павловић, редовни професор Природно-математичког факултета Универзитета у Нишу
Наслов:	Испитивање енергетске ефикасности соларних модула у зависности од њихове задржаности у реалним климатским условима у Нишу
Резиме:	<p>У докторској дисертацији су дати основни подаци о Сунчевом зрачењу, фотонапонској конверзији Сунчевог зрачења, соларним ћелијама и соларним модулима, и њиховим излазним параметрима, и литературни преглед досадашњих истраживања у свету о прашини и задржаности соларних модула. Поред овога дати су резултати мерења електричних параметара чистих и соларних модула задржаних угљеником, калцијум-карбонатом и земљом. Затим је дат упоредни преглед резултата испитивања енергетске ефикасности чистих и соларних модула задржаних угљеником, калцијум-карбонатом и земљом. На крају су дати резултати мерења електричних параметара чистих и соларних модула задржаних наталоженом чађи из димњака котларнице која се налази у подруму Природно-математичког факултета у Нишу.</p>
Научна област:	Физика
Научна дисциплина:	Експериментална и примењена физика
Кључне речи:	Соларна енергетика, фотонапонска конверзија Сунчевог зрачења, енергетска ефикасност соларних модула, задржаност соларних модула
УДК:	620.9:621.383.51]:504.5:551.583(497.11Niš)
CERIF класификација:	P 002
Тип лиценце Креативне заједнице:	3. Ауторство-некомерцијално-без прерада CC BY-NC-ND

Data on Doctoral Dissertation

Doctoral Supervisor:	Academician Tomislav M. Pavlović, Full professor, Faculty of Sciences and Mathematics, University of Niš
Title:	Investigation of energy efficiency of PV solar modules depending on their soiling in real climate conditions in Nis
Abstract:	<p>The doctoral dissertation provides basic information on solar radiation, photovoltaic conversion of solar radiation, solar cells and solar modules and their output parameters, and a literature review of the current research in the world about dust and solar modules soiling. In addition, the results of the measurement of electrical parameters of clean and solar modules soiled with carbon, calcium carbonate and soil are given. Furthermore, a comparative overview of the results of the energy efficiency tests of the clean and solar modules soiled with carbon, calcium carbonate and soil is given. In the end, the results of the measurement of the electrical parameters of the clean and solar modules soiled with accumulated soot from the chimney of the boiler room, located in the basement of the Faculty of Sciences and Mathematics in Niš, are presented.</p>
Scientific Field:	Physics
Scientific Discipline:	Experimental and Applied Physics
Key Words:	Solar energy, photovoltaic conversion of solar radiation, energy efficiency of solar modules, soiling of solar modules
UDC:	620.9:621.383.51]:504.5:551.583(497.11Niš)
CERIF Classification:	P 002
Creative Commons License Type:	3. CC BY-NC-ND



**ПРИРОДНО - МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ
НИШ**

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:	
Идентификациони број, ИБР:	
Тип документације, ТД:	монографска
Тип записа, ТЗ:	текстуални / графички
Врста рада, ВР:	докторска дисертација
Аутор, АУ:	Ивана С. Радоњић Митић
Ментор, МН:	Томислав М. Павловић
Наслов рада, НР:	ИСПИТИВАЊЕ ЕНЕРГЕТСКЕ ЕФИКАСНОСТИ СОЛАРНИХ МОДУЛА У ЗАВИСНОСТИ ОД ЊИХОВЕ ЗАПРЉАНОСТИ У РЕАЛНИМ КЛИМАТСКИМ УСЛОВИМА У НИШУ
Језик публикације, ЈП:	српски
Језик извода, ЈИ:	енглески
Земља публиковања, ЗП:	Србија
Уже географско подручје, УГП:	Србија
Година, ГО:	2018.
Издавач, ИЗ:	ауторски репринт
Место и адреса, МА:	Ниш, Вишеградска 33.
Физички опис рада, ФО: <small>(поглавља/страница/ цитата/табела/слика/графика/прилога)</small>	219 стр., граф. прикази
Научна област, НО:	физика
Научна дисциплина, НД:	експериментална и примењена физика
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	Соларна енергетика, фотонапонска конверзија Сунчевог зрачења, енергетска ефикасност соларних модула, запрљаност соларних модула
УДК	620.9:621.383.51]:504.5:551.583(497.11Niš)
Чува се, ЧУ:	библиотека
Важна напомена, ВН:	Мерења су извршена у Лабораторији за соларну енергетику ПМФ-а у Нишу

Извод, ИЗ:	<p>У докторској дисертацији су дати основни подаци о Сунчевом зрачењу, фотонапонској конверзији Сунчевог зрачења, соларним ћелијама и соларним модулима, и њиховим излазним параметрима, и литературни преглед досадашњих истраживања у свету о прабини и запрљаности соларних модула. Поред овога дати су резултати мерења електричних параметара чистих и соларних модула запрљаних угљеником, калцијум-карбонатом и земљом. Затим је дат упоредни преглед резултата испитивања енергетске ефикасности чистих и соларних модула запрљаних угљеником, калцијум-карбонатом и земљом. На крају су дати резултати мерења електричних параметара чистих и соларних модула запрљаних наталоженом чађи из димњака котларнице која се налази у подруму Природно-математичког факултета у Нишу.</p>
Датум прихватања теме, ДП:	28.11.2016.
Датум одбране, ДО:	
Чланови комисије, КО:	Председник: Члан: Члан: Члан, ментор:

Образац Q4.09.13 - Издање 1



**ПРИРОДНО - МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ
НИШ**

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	monograph
Type of record, TR :	textual / graphic
Contents code, CC :	doctoral dissertation
Author, AU :	Ivana S. Radonjić Mitić
Mentor, MN :	Tomislav M. Pavlović
Title, TI :	INVESTIGATION OF ENERGY EFFICIENCY OF PV SOLAR MODULES DEPENDING ON THEIR SOILING IN REAL CLIMATE CONDITIONS IN NIS
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	English
Country of publication, CP :	Serbia
Locality of publication, LP :	Serbia
Publication year, PY :	2018
Publisher, PB :	author's reprint
Publication place, PP :	Niš, Višegradska 33.
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	219 p. ; graphic representations
Scientific field, SF :	physics
Scientific discipline, SD :	experimental and applied physics
Subject/Key words, S/KW :	Solar energy, photovoltaic conversion of solar radiation, energy efficiency of solar modules, soiling of solar modules
UC	620.9:621.383.51]:504.5:551.583(497.11Niš)
Holding data, HD :	library
Note, N :	Measurements were performed at Solar Energy Laboratory at the Faculty of Sciences and Mathematics in Niš

Abstract, AB :	<p>The doctoral dissertation provides basic information on solar radiation, photovoltaic conversion of solar radiation, solar cells and solar modules and their output parameters, and a literature review of the current research in the world about dust and solar modules soiling. In addition, the results of the measurement of electrical parameters of clean and solar modules soiled with carbon, calcium carbonate and soil are given. Furthermore, a comparative overview of the results of the energy efficiency tests of the clean and solar modules soiled with carbon, calcium carbonate and soil is given. In the end, the results of the measurement of the electrical parameters of the clean and solar modules soiled with accumulated soot from the chimney of the boiler room, located in the basement of the Faculty of Sciences and Mathematics in Niš, are presented.</p>								
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	28.11.2016.								
Defended on, DE :									
Defended Board, DB :	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="400 853 611 898">President:</td> <td data-bbox="611 853 1465 898"></td> </tr> <tr> <td data-bbox="400 898 611 943">Member:</td> <td data-bbox="611 898 1465 943"></td> </tr> <tr> <td data-bbox="400 943 611 987">Member:</td> <td data-bbox="611 943 1465 987"></td> </tr> <tr> <td data-bbox="400 987 611 1037">Member, Mentor:</td> <td data-bbox="611 987 1465 1037"></td> </tr> </table>	President:		Member:		Member:		Member, Mentor:	
President:									
Member:									
Member:									
Member, Mentor:									

Образац Q4.09.13 - Издање 1

Najlepše se zahvaljujem mentoru, akademiku Tomislavu M. Pavloviću na predlogu teme i nesebičnoj i svesrdnoj pomoći prilikom izrade doktorske disertacije.

Posebno se zahvaljujem akademiku Dragoljubu Mirjaniću, akademiku Jovanu Štrajčiću i prof. dr Miodragu Radoviću na nesebičnoj pomoći, korisnim predlozima i savetima prilikom izrade doktorske disertacije.

Toplo se zahvaljujem Slavici Jovanović, stručnom saradniku u Laboratoriji za solarnu energetiku PMF-a u Nišu, dr Lani Pantić Randelović i dr Dragani Todorović na podršci i svesrdnoj pomoći u toku izrade doktorske disertacije.

Zahvaljujem se profesorima i saradnicima na Departmanu za fiziku PMF-a u Nišu, na pažnji i pomoći koju su mi ukazivali u toku mojih studija i pri izradi doktorske disertacije.

Neizmernu zahvalnost dugujem svom suprugu Milošu i sinu Nikoli Mitiću na podršci, strpljenju, razumevanju i ljubavi.

Beskrajnu zahvalnost dugujem svojim roditeljima, Snežani i Siniši, kao i sestri Maji, na neizmernoj podršci, razumevanju i ljubavi koju mi pružaju u životu i radu.

SADRŽAJ

UVOD	1
LITERATURA	3
 PRVO POGLAVLJE	
 FOTONAPONSKA KONVERZIJA SUNČEVOG ZRAČENJA I PROLAZ SUNČEVOG ZRAČENJA KROZ ATMOSFERU	
1.1. Sunčevo zračenje	9
1.2. Zemljina atmosfera	10
1.2.1. Apsorpcija Sunčevog zračenja	11
1.2.2. Rasejanje Sunčevog zračenja	13
1.2.3. Prelamanje u atmosferi	15
1.2.4. Scintilacija u atmosferi	15
1.2.5. Slabljenje Sunčevog zračenja	16
1.3. Sunčevo zračenje koje pada na nagnutu površinu orijentisanu ka jugu	17
1.4. Fotonaponska konverzija Sunčevog zračenja	18
1.4.1. Strujno-naponska karakteristika solarne ćelije	18
1.4.2. Parametri solarne ćelije	22
1.4.3. Proizvodnja solarnih ćelija od monokristalnog silicijuma	28
1.4.4. Solarni moduli od monokristalnog silicijuma	30
LITERATURA	32

DRUGO POGLAVLJE

ZAPRLJANOST SOLARNIH MODULA	35
2.1. Prašina	37
2.1.1. Stvaranje prašine	39
2.1.2. Taloženje prašine	39
2.1.3. Adhezija	40
2.1.4. Uklanjanje prašine	42
2.2. Čišćenje i održavanje solarnih modula	43
2.3. Pregled istraživanja o uticaju prašine na performanse solarnih modula u svetu	48
LITERATURA	59

TREĆE POGLAVLJE

REZULTATI EKSPERIMENTALNOG ODREĐIVANJA ENERGETSKE EFIKASNOSTI SOLARNIH MODULA U ZAVISNOSTI OD NJIHOVE ZAPRLJANOSTI U REALNIM KLIMATSKIM USLOVIMA U NIŠU	67
3.1. Eksperiment	69
3.1.1. Eksperimentalni uređaji	69
3.1.1.1. Merna oprema	71
3.1.1.2. Metodologija merenja	75
3.2. Rezultati ispitivanja energetske efikasnosti solarnih modula u zavisnosti od njihove zaprljanosti ugljenikom	76
3.2.1. Rezultati SEM ispitivanja ugljenika	76

3.2.2.	Rezultati merenja struje kratkog spoja čistih i ugljenikom zaprljanih solarnih modula postavljanih pod različitim uglovima u Nišu	78
3.2.3.	Rezultati merenja napona otvorenog kola čistih i ugljenikom zaprljanih solarnih modula postavljanih pod različitim uglovima u Nišu	83
3.2.4.	Rezultati merenja maksimalne snage čistih i ugljenikom zaprljanih solarnih modula postavljanih pod različitim uglovima u Nišu	88
3.2.5.	Rezultati eksperimentalnog određivanja energetske efikasnosti čistih i ugljenikom zaprljanih solarnih modula postavljanih pod različitim uglovima u Nišu	93
3.2.6.	Rezultati eksperimentalnog određivanja strujno-naponskih karakteristika čistih i ugljenikom zaprljanih solarnih modula postavljanih pod različitim uglovima u Nišu	99
3.2.7.	Uporedni prikaz parametara solarnih modula zaprljanih ugljenikom	101
3.3.	Rezultati ispitivanja energetske efikasnosti solarnih modula u zavisnosti od njihove zaprljanosti kalcijum-karbonatom	103
3.3.1.	Rezultati SEM ispitivanja kalcijum-karbonata	104
3.3.2.	Rezultati merenja struje kratkog spoja čistih i kalcijum-karbonatom zaprljanih solarnih modula postavljanih pod različitim uglovima u Nišu	105
3.3.3.	Rezultati merenja napona otvorenog kola čistih i kalcijum-karbonatom zaprljanih solarnih modula postavljanih pod različitim uglovima u Nišu	110

3.3.4.	Rezultati merenja maksimalne snage čistih i kalcijum-karbonatom zaprljanih solarnih modula postavljenih pod različitim uglovima u Nišu	116
3.3.5.	Rezultati eksperimentalnog određivanja energetske efikasnosti čistih i kalcijum-karbonatom zaprljanih solarnih modula postavljenih pod različitim uglovima u Nišu	121
3.3.6.	Rezultati eksperimentalnog određivanja strujno-naponskih karakteristika čistih i kalcijum-karbonatom zaprljanih solarnih modula postavljenih pod različitim uglovima u Nišu	127
3.3.7.	Uporedni prikaz parametara solarnih modula zaprljanih kalcijum-karbonatom	129
3.4.	Rezultati ispitivanja energetske efikasnosti solarnih modula u zavisnosti od njihove zaprljanosti zemljom	131
3.4.1.	Rezultati SEM ispitivanja zemlje	132
3.4.2.	Rezultati merenja struje kratkog spoja čistih i zemljom zaprljanih solarnih modula postavljenih pod različitim uglovima u Nišu	133
3.4.3.	Rezultati merenja napona otvorenog kola čistih i zemljom zaprljanih solarnih modula postavljenih pod različitim uglovima u Nišu	138
3.4.4.	Rezultati merenja maksimalne snage čistih i zemljom zaprljanih solarnih modula postavljenih pod različitim uglovima u Nišu	144
3.4.5.	Rezultati eksperimentalnog određivanja energetske efikasnosti čistih i zemljom zaprljanih solarnih modula postavljenih pod različitim uglovima u Nišu	149

3.4.6.	Rezultati eksperimentalnog određivanja strujno-naponskih karakteristika čistih i zemljom zaprljanih solarnih modula postavljenih pod različitim uglovima u Nišu	155
3.4.7.	Uporedni prikaz parametara solarnih modula zaprljanih zemljom	157
3.5.	Uporedni prikaz rezultata ispitivanja energetske efikasnosti solarnih modula u zavisnosti od njihove zaprljanosti ugljenikom, kalcijum-karbonatom i zemljom	159
3.6.	Rezultati merenja klimatskih parametara u toku grejne sezone 2016/2017.	169
3.7.	Rezultati ispitivanja energetske efikasnosti solarnih modula u zavisnosti od njihove zaprljanosti nataloženom čađi	171
3.7.1.	Rezultati SEM ispitivanja nataložene čađi	173
3.7.2.	Rezultati merenja struje kratkog spoja čistih i solarnih modula zaprljanih nataloženom čađi postavljenih pod različitim uglovima u Nišu	174
3.7.3.	Rezultati merenja napona otvorenog kola čistih i solarnih modula zaprljanih nataloženom čađi postavljenih pod različitim uglovima u Nišu	180
3.7.4.	Rezultati merenja maksimalne snage čistih i solarnih modula zaprljanih nataloženom čađi postavljenih pod različitim uglovima u Nišu	186
3.7.5.	Rezultati eksperimentalnog određivanja energetske efikasnosti čistih i solarnih modula zaprljanih nataloženom čađi postavljenih pod različitim uglovima u Nišu	192
3.7.6.	Uporedni prikaz parametara solarnih modula zaprljanih nataloženom čađi	198
	LITERATURA	200

ZAKLJUČAK	201
PUBLIKOVANI RADOVI KANDIDATA	213
BIOGRAFIJA IVANE S. RADONJIĆ MITIĆ	217

UVOD

Broj stanovnika u svetu se stalno povećava, tako da potrebe za električnom energijom rastu. S obzirom na brzi ekonomski i tehnološki razvoj, životni komfor se poboljšava što iziskuje sve više električne energije. Danas se u svetu električna energija uglavnom dobija korišćenjem fosilnih goriva, nuklearne energije i energije vetra. Procenjuje se da se oko 80% električne energije u svetu dobija korišćenjem fosilnih goriva. Usled sagorevanja fosilnih goriva dolazi do emitovanja različitih polutanata u atmosferu, do pogoršanja kvaliteta vazduha, pojave efekta staklene bašte i pogoršanja uslova života na Zemlji. Pogodno rešenje za očuvanje životne sredine i povećanje energetske sigurnosti je korišćenje obnovljivih izvora energije, a među njima i sistema za fotonaponsku konverziju konverziju Sunčevog zračenja.

Počev od velike energetske krize 1973. godine pa nadalje, obnovljivi izvori energije (energija Sunca, vetra, geotermalna, itd.) se sve više koriste. U najznačajniji obnovljiv izvor energije spada Sunce koje već 4,5 milijardi godina pokreće i održava život na Zemlji. Za pretvaranje Sunčevog zračenja u električnu energiju koriste se solarne ćelije od monokristalnog, polikristalnog i amornog silicijuma i drugih materijala. Mnogo vremena i novca je utrošeno na unapređenje komponenti kako bi fotonaponski (PV) sistemi bili pouzdani u toku njihove eksploatacije. Solarni moduli se stalno usavršavaju kako bi se poboljšala njihova efikasnost i smanjili troškovi proizvodnje.

Sistemi za fotonaponsku konverziju Sunčevog zračenja se primenjuju u domaćinstvima, poljoprivredi, industriji, itd. Solarni moduli se često nalaze na krovovima stambenih i poslovnih objekata, a ponekad su integrisani kao krovni i fasadni elementi.

Na performanse solarnih modula utiču različiti faktori kao što su: materijal od koga je modul napravljen, ugao nagiba solarnog modula, intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na površinu modula, zaprljanost površine modula, njegova temperatura, itd. Životni vek solarnih modula je 25 godina. Usled starenja materijala solarnih modula njihova energetska efikasnost se smanjuje 0,5-1,0% godišnje. Metalni ramovi solarnih modula mogu vremenom da korodiraju pod dejstvom atmosferskih uticaja, zaprljanosti i ptičijeg izmeta.

U jedan od najznačajnijih problema prilikom korišćenja solarnih modula spada zaprljanost njihove površine koja dovodi do smanjenja njihove efikasnosti. Stepenn zaprljanosti solarnih modula zavisi od prirode sredine u kojoj se nalaze. Zaprljanost je termin koji se koristi

za opisivanje taloženja prašine na solarnim modulima koja smanjuje količinu Sunčevog zračenja koje dospeva do solarnih ćelija. Pod prašinom se podrazumeva mešavina različitih polutanata koji su karakteristični za određeno geografsko područje. Međutim, zaprljanost ne uključuje samo taloženje prašine, već i zaprljavanje biljnim produktima, ptičijim izmetom, rastom organskih vrsta, itd. U najčešće polutante solarnih modula spadaju krečnjak (kalcijum-karbonat), pesak, crvena zemlja, pepeo, čađ, itd. [1-14].

U Srbiji se tokom cele godine u vazduhu nalaze različiti polutanti karakteristični za naše područje. U toku grejne sezone se u vazduhu u Srbiji pored već prisutnih polutanata mogu naći i ostaci dima, odnosno čađ.

Imajući u vidu da su u Srbiji solarni moduli često postavljeni na krovovima građevinskih objekata i da se za grejanje uglavnom koriste fosilna goriva, u togu grejne sezone se na solarnim modulima taloži čađ koja smanjuje njihovu energetska efikasnost.

U literaturi nema podataka o eksperimentalnom ispitivanju energetske efikasnosti solarnih modula od monokristalnog silicijuma u zavisnosti od zaprljanosti njihove površine u realnim klimatskim uslovima u Srbiji.

Cilj doktorske disertacije je da se eksperimentalno odredi energetska efikasnost solarnih modula u zavisnosti od zaprljanosti njihove površine u realnim klimatskim uslovima u Nišu. Rezultati dobijeni u doktorskoj disertaciji su od značaja za planiranje i projektovanje fotonaponskih solarnih elektrana i fotonaponskih sistema u privatnim domaćinstvima i drugim objektima u Srbiji. Dobijeni rezultati mogu takođe da se koriste za planiranje čišćenja i održavanja solarnih modula u praksi, kako bi se na optimalan način vršila fotonaponska konverzija Sunčevog zračenja na postojećim i novim PV sistemima u Srbiji.

Doktorska disertacija se sastoji iz uvoda, tri poglavlja, zaključka, biografije kandidata i pregleda publikovanih radova.

U prvom poglavlju pod nazivom *Fotonaponska konverzija Sunčevog zračenja i prolaz Sunčevog zračenja kroz atmosferu* dati su osnovni podaci o ekstraterestričnom i terestričnom Sunčevom zračenju, Zemljinoj atmosferi i procesima interakcije Sunčevog zračenja sa aerosolima prilikom njegovog prolaska kroz atmosferu. Posebna pažnja je posvećena izračunavanju intenziteta Sunčevog zračenja koje pada na nagnutu površinu orijentisanu ka jugu, fotonaponskoj konverziji Sunčevog zračenja i parametrima solarne ćelije. U daljem tekstu se

govori o formiranju solarne ćelije i solarnog modula od monokristalnog silicijuma. Na kraju je data literatura koja se odnosi na ovo poglavlje.

U drugom poglavlju pod nazivom *Zaprljanost solarnih modula* dati su osnovni podaci o prašini, njenim karakteristikama i „životnom ciklusu”. U daljem tekstu se govori o taloženju prašine na solarnim modulima i njihovom čišćenju i održavanju. Zatim je pažnja posvećena radovima koji se navode u literaturi o uticaju prašine na performanse solarnih modula. Na kraju je navedena literatura koja se odnosi na ovo poglavlje.

U trećem poglavlju pod nazivom *Rezultati eksperimentalnog određivanja energetske efikasnosti solarnih modula u zavisnosti od njihove zaprljanosti u realnim klimatskim uslovima u Nišu* dat je opis eksperimentalnog sistema sa šest solarnih modula od monokristalnog silicijuma sa različitim uglovima nagiba, merne opreme za merenje klimatskih parametara, ispitivanje uticaja različitih polutanata na parametre solarnih modula i njihovu efikasnost. Zatim je opisana metodologija merenja. U daljem su dati rezultati eksperimentalnog određivanja energetske efikasnosti solarnih modula u zavisnosti od njihove zaprljanosti ugljenikom, kalcijum-karbonatom i zemljom. Zatim je dat uporedni prikaz rezultata ispitivanja energetske efikasnosti solarnih modula u zavisnosti od njihove zaprljanosti ugljenikom, kalcijum-karbonatom i zemljom. Potom su dati rezultati merenja klimatskih parametara (intenziteta Sunčevog zračenja, temperature ambijenta, količine padavina i relativne vlažnosti vazduha) tokom grejne sezone 2016/2017. Posebna pažnja posvećena je rezultatima ispitivanja energetske efikasnosti solarnih modula u zavisnosti od njihove zaprljanosti nataloženom čađi.

U delu *Zaključak* dati su zaključci do kojih se došlo u ovoj doktorskoj disertaciji.

U delu *Publikovani radovi* dat je spisak radova koje je objavila Ivana Radonjić Mitić sa tematikom iz oblasti doktorske disertacije.

Na kraju doktorske disertacije data je biografija Ivane Radonjić Mitić.

LITERATURA

- [1] I. S. Radonjić et al., *Investigation of the impact of atmospheric pollutants on solar module energy efficiency*, *Thermal Science*, Volume 21, No. 5, 2017, pp. 2021-2030, <http://thermalscience.vinca.rs/pdfs/papers-2016/TSCI160408176R.pdf>
- [2] T. Pavlović, I. Radonjić, D. Milosavljević, L. Pantić, *A review of concentrating solar*

- power plants in the world and their potential use in Serbia*, **Renewable and Sustainable energy Review**, Vol. 16 (2012), Issue 6, pp. 3891-3902, doi:10.1016/j.rser.2012.03.042
- [3] Z. A. Darwish et al., *Effect of dust pollutant type on photovoltaic performance*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41 (2015), pp. 735-744.
- [4] T. Sarver, A. Al-Qaraghuli, L. L. Kazmerski, *A comprehensive review of the impact of the dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22 (2013), pp. 698-733.
- [5] J. K. Kaldellis, P. Fragos, M. Kapsali, *Systematic experimental study of the pollution deposition impact on the energy yield of photovoltaic installations*, *Renewable Energy* 36 (2011), pp. 2717-2724.
- [6] J. Cano, *Photovoltaic Modules: Effect of Tilt Angle on Soiling*, A Thesis Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science in Technology, Arizona State University, 2011.
- [7] **I. Radonjić et al., *Influence of Different Types of Dust on PV Modules Energy Efficiency*, *Proceedings of 1st Virtual International Conference on Science, Technology and Management in Energy “eNergetics 2015”*, Research and Development Center “ALFATEC”, Niš, Serbia, pp. 94-99, 2015.**
- [8] T. M. Pavlović et al., *SOLAR ENERGY in Serbia, Greece and the Republic of Srpska*, Monographs Vol. XXVI, Department of Natural-mathematical and Technical Sciences Vol. 26, Academy of Sciences and Arts of the Republic of Srpska, 694 p., Banja Luka, 2015., ISBN:978-99938-21-70-0, <http://thermalscience.vinca.rs/pdfs/papers-2015/2016-sup-2-new-book.pdf>
- [9] T. Pavlović, I. Radonjić, D. Milosavljević, L. Pantić, D. Piršl, *Assesment and potential use of concentrating solar power plants in Serbia and Republic of Srpska*, *Thermal Science*, 16 (2012), 3, pp. 931-945
- [10] T. Pavlović et al., *Possibility of electricity generation using PV solar plants in Serbia*, **Renewable and Sustainable energy Review**, Vol. 20 (2013), pp. 201-218, doi: 10.1016/j.rser.2012.11.070
- [11] L. S. Pantić et al., *The assessment of different models to predict solar module temperature, output power and efficiency for Nis, Serbia*, *Energy*, 109 (2016), pp. 38-48, DOI:10.1016/j.energy.2016.04.090

- [12] **L. S. Pantić et al., *Electrical energy generation with differently oriented PV modules as façade elements*, Thermal Science, Volume 20, No. 4, 2016, pp. 1377-1386, DOI:10.2298/TSCI150123157P**
- [13] **T. M. Pavlović et al., *Assessment and perspectives of PV solar power engineering in the Republic of Srpska (Bosnia and Herzegovina)*, Renewable and Sustainable energy Reviews, Volume 18, 2013, pp.119-133.**
- [14] **T. Pavlović, D. Milosavljević, I. Radonjić, D. Piršl, *Savremene mogućnosti korišćenja Sunčevog zračenja*, Monografija Energetika i životna sredina, Srpska akademija nauka i umetnosti, Naučni skupovi, Knjiga CXLIII, Odeljenje hemijskih i bioloških nauka, Knjiga 4, Beograd, 2013, str. 259-299, ISBN 978-86-7025-607-1**

PRVO POGLAVLJE

FOTONAPONSKA KONVERZIJA SUNČEVOG ZRAČENJA I PROLAZ SUNČEVOG ZRAČENJA KROZ ATMOSFERU

1.1. Sunčevo zračenje

Mlečni put je galaksija u kojoj se nalazi oko 400 milijardi zvezda, a jedna od njih je Sunce. Sunce je plazmena usijana lopta koja zrači sopstvenu energiju. Vrednost Sunčeve energije koja u jedinici vremena padne na jediničnu površinu postavljenu normalno na pravac prostiranja Sunčevog zračenja, kada se Zemlja nalazi na srednjem rastojanju od Sunca u njegovoj mirnoj fazi aktivnosti, naziva se solarna konstanta. S obzirom na to da Sunce predstavlja dinamičan sistem, energija koju ono izrači u međuplanetarni prostor zavisi od brzine formiranja energije u jezgru Sunca, od nivoa aktivnosti u njegovim spoljašnjim slojevima, itd, tako da se iz tog razloga navodi srednja vrednost solarne konstante 1367 W/m^2 .

Poreklo Sunčeve energije otkrio je i objasnio Hans Bethe 1938. godine. On je pokazao da se na Suncu energija stvara u termonuklearnom procesu fuzije vodonika u helijum. Termonuklearne reakcije se odvijaju u jezgru Sunca gde se u fuzionim reakcijama lakših jezgara dobijaju teža atomska jezgra. Tom prilikom nukleoni prelaze iz stanja sa manjom u stanja sa većom energijom veze, što je praćeno emisijom dela energije veze. Energija stvorena u jezgru Sunca dospeva na Zemlju u vidu elektromagnetnih talasa [1-2].

Ekstraterestrično Sunčevo zračenje

Ekstraterestrično Sunčevo zračenje je Sunčevo zračenje na ulazu u Zemljinu atmosferu. Intenzitet ekstraterestričnog Sunčevog zračenja se usled promene rastojanja Zemlje od Sunca i usled promene aktivnosti Sunca menja u granicama od 1307 W/m^2 do 1393 W/m^2 . Spektar Sunčevog zračenja se pre ulaska u Zemljinu atmosferu nalazi u oblasti talasnih dužina $0,015\text{-}1000 \mu\text{m}$ [1-2].

Terestrično Sunčevo zračenje

Kada Sunčevo zračenje uđe u Zemljinu atmosferu jedan njegov deo se apsorbuje i rasejava na kapljicama vode i česticama koje se nalaze u atmosferi, dok se ostatak prenosi do Zemljine površine.

Terestrično Sunčevo zračenje je Sunčevo zračenje koje posle prolaska kroz Zemljinu atmosferu dospeva na Zemlju. Na Zemlju dospeva oko 97% Sunčevog zračenja u oblasti talasnih dužina 0,29-2,5 μm i oko 3% sa talasnim dužinama većim od 2,5 μm . Od Sunčevog zračenja koje dospeva na Zemlju oko 3% se nalazi u ultraljubičastoj (UV), oko 42% u vidljivoj i oko 55% u infracrvenoj oblasti spektra elektromagnetnog zračenja [1-3].

1.2. Zemljina atmosfera

Zemljina atmosfera je vazdušni omotač Zemlje koji se prostire do visine od 3000 km od površine Zemlje i predstavlja smešu gasova (78% azota, 21% kiseonika, 0,9% argona, 0,037% ugljen-dioksida, itd.) i različitih primesa. U atmosferskom vazduhu od primesa ima najviše vodene pare koja isparava sa vodenih površina na Zemlji, biljnog pokrivača, itd., ali i drugih primesa u vidu aerosola prečnika 10^{-8} - 10^{-5} cm. Aerosoli su čestice ili male kapi tečnosti koje mogu da se nađu u atmosferskom vazduhu. Vodena para, od svih gasova u atmosferi, najviše utiče na klimu na Zemlji jer intenzivno apsorbuje infracrveno zračenje sa Sunca i Zemlje.

Zemljina atmosfera se na osnovu fizičkih karakteristika i hemijskog sastva vazduha može podeliti na homosferu, koja se nalazi do visine od 94 km, i heterosferu, koja se nalazi od 94 km do 3000 km visine.

U pogledu temperature, Zemljina atmosfera se može podeliti na pet osnovnih slojeva i četiri prelazna sloja (pauze). Osnovni slojevi atmosfere su: troposfera (do 11 km visine), stratosfera (11-51 km visine), mezosfera (51-86 km visine), termosfera ili jonosfera (86-800 km visine) i egzosfera (800-3000 km visine). U prelazne slojeve atmosfere spadaju tropopauza, stratopauza, mezopauza i termopauza.

Navedene visine nisu fiksne, već zavise od geografske širine, godišnjeg doba, doba dana, itd.

U troposferi se nalazi najveći broj činilaca koji određuju prostiranje zračenja kroz atmosferu, kao što su molekuli na kojima se vrši apsorpcija Sunčevog zračenja, čestice prašine, magla, kapljice kiše, sneg, oblaci, itd.

Do visine od 70 km relativni odnosi gasova u atmosferi su skoro konstantni, dok je iznos vodene pare promenljiv.

Hemijski sastav Zemljine atmosfere dat je u tabeli 1.1.

Tabela 1.1. Hemijski sastav Zemljine atmosfere

Sastojak	Hemijska formula	Procenat zapremine
Azot	N ₂	78,084
Kiseonik	O ₂	20,946
Argon	Ar	0,934
Ugljen-dioksid	CO ₂	0,0038
Neon	Ne	1,818·10 ⁻³
Helijum	He	5,24·10 ⁻⁴
Metan	CH ₄	2,0·10 ⁻⁴
Kripton	Kr	1,14·10 ⁻⁴
Azot-monoksid	NO	5,0·10 ⁻⁵
Vodonik	H ₂	5,0·10 ⁻⁵
Ksenon	Xe	9,0·10 ⁻⁶
Vodena para	H ₂ O	promenljivo
Ozon	O ₃	promenljivo

Prilikom prostiranja Sunčevog zračenja kroz Zemljinu atmosferu dolazi do njegove apsorpcije, rasejanja, prelamanja, scintilacije, itd. [4-6].

1.2.1. Apsorpcija Sunčevog zračenja

Najvažniji uticaj na slabljenje Sunčevog zračenja u atmosferi imaju voda i vodena para koje ulaze u sastav Zemljine atmosfere. Kapljice vode se javljaju u vidu stabilnih mešavina-aerosola (sumaglica) ili nestabilnih mešavina-hidrometeori (magla, oblaci, rosa, sneg). Na vodenoj pari u atmosferi se vrši apsorpcija, a na kapljicama vode rasejanje upadnog Sunčevog zračenja.

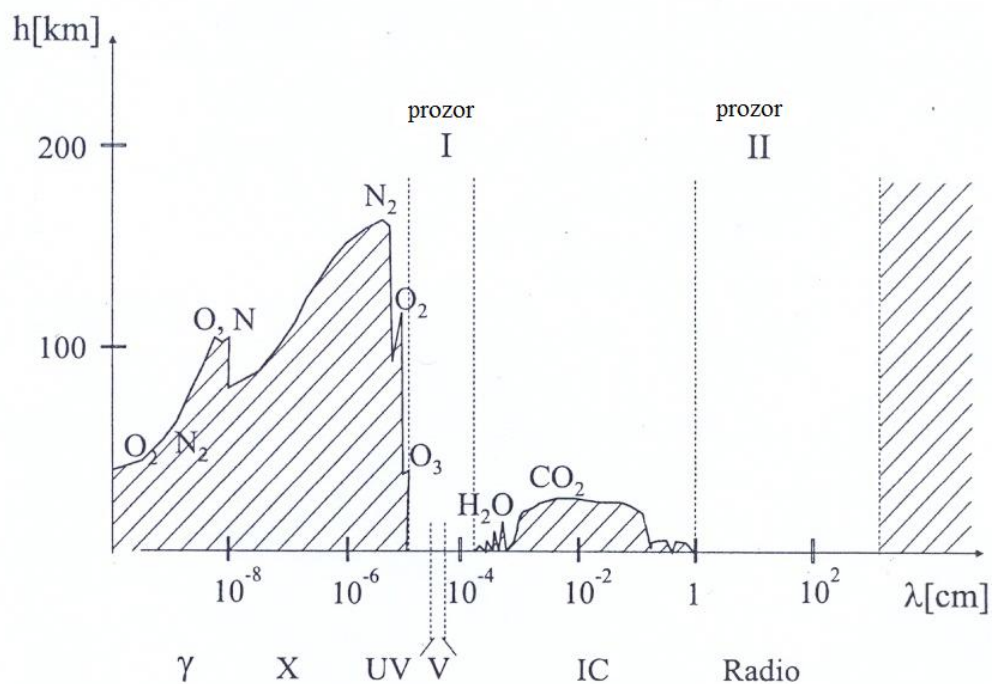
Visoke vrednosti relativne vlažnosti vazduha uzrokuju povećanu apsorpciju Sunčevog zračenja zbog povećane koncentracije vodene pare u atmosferi, što uzrokuje smanjenje intenziteta Sunčevog zračenja. U oblastima koje se nalaze pored velikih vodenih površina (reka, jezera, mora, okeana) često se rano ujutru javljaju guste magle koje znatno smanjuju intenzitet Sunčevog zračenja.

Atmosfera apsorbuje samo deo ukupne energije Sunčevog zračenja. Ostatak energije Sunčevog zračenja se reflektuje, prelama ili rasejava.

Atmosfera apsorbuje najveći deo ultraljubičastog i X zračenja. Imajući u vidu da je vodena para dobar apsorber infracrvenog zračenja, većina infracrvenog zračenja koje emituje Zemlja ne prolazi kroz oblake, već se reflektuje ka Zemlji što dovodi do njenog dodatnog zagrevanja (efekat staklene bašte).

Atmosfera se zagreva apsorpcijom zračenja sa Sunca i infracrvenog zračenja sa Zemlje na molekulima vodene pare, CO_2 , N_2O , fluora i drugih gasova i jedinjenja koja se nalaze u atmosferi. Na ovaj način atmosfera sprečava odlazak toplote sa Zemlje u svemir i prirodno rashlađivanje Zemlje.

S obzirom na to da se sastoji od više vrsta gasova i čestica, Zemljina atmosfera različito apsorbuje i propušta različite talasne dužine Sunčevog zračenja. Oblast talasnih dužina u kojoj Sunčevo zračenje prolazi kroz atmosferu bez apsorpcije naziva se atmosferski prozor.



Slika 1.1. Prozračnost Zemljine atmosfere

Uticaj gasova iz Zemljine atmosfere na apsorpciju u vidljivoj oblasti Sunčevog zračenja dat je u tabeli 1.2.

Tabela 1.2. Uticaj gasova iz Zemljine atmosfere na apsorpciju u vidljivoj oblasti Sunčevog zračenja

Sastojak	Apsorpcija u oblasti		
	UV, Vidljivo	Blisko IC	Srednje IC
Azot	Ne	Ne	Ne
Kiseonik	Ne	Da	Ne
Argon	Ne	Ne	Ne
Ugljen-dioksid	Ne	Ne	Da
Neon	Ne	Ne	Ne
Helijum	Ne	Ne	Ne
Metan	Ne	Ne	Da
Kripton	Ne	Ne	Ne
Azot-monoksid	Ne	Ne	Da
Vodonik	Ne	Ne	Ne
Ksenon	Ne	Ne	Ne
Vodena para	Ne	Da	Da
Ozon	Da	Ne	Da

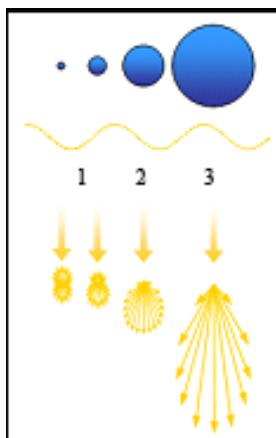
Apsorpcija i rasejanje Sunčevog zračenja zavise od hemijskog sastava aerosola i njihove raspodele po veličini. Na primer, sulfati, katjoni NH_4^+ i nitrati rasejavaju Sunčeve zrake, a mineralna prašina i čađ i rasejavaju i apsorbuju Sunčeve zrake [4, 5, 7, 8].

1.2.2. Rasejanje Sunčevog zračenja

Rasejanje Sunčevog zračenja na malim česticama (aerosolima) ima veliki uticaj na prostiranje Sunčevog zračenja kroz atmosferu. Zbog optičke nehomogenosti Zemljine atmosfere dolazi do rasejanja, tj. skretanja Sunčevih zraka u odnosu na njihov pravac prostiranja.

Rasejanje Sunčevog zračenja u Zemljinoj atmosferi je proces u kome se deo upadnog Sunčevog zračenja difuzno rasejava na malim česticama (aerosolima) sa različitim indeksom prelamanja u svim pravcima. Može se desiti da pri rasejanju upadno Sunčevo zračenje vrlo malo promeni svoju talasnu dužinu odnosno frekvenciju.

Slabljenje Sunčevog zračenja usled rasejanja zavisi od poluprečnika čestica aerosola, njihove koncentracije u atmosferi i talasne dužine upadnog Sunčevog zračenja.



Slika 1.2. Veličina čestica aerosola i vrsta rasejanja upadnog Sunčevog zračenja (1-Rejlijevo, 2-Mieovo i 3-neselektivno rasejanje)

Rasejanje Sunčevog zračenja u Zemljinoj atmosferi može biti Rejlijevo, Mieovo, neselektivno i Tompsonovo [4].

Rejlijevo rasejanje Sunčevog zračenja

Rejlijevo rasejanje je rasejanje Sunčevog zračenja na atomima i molekulima atmosfere, i česticama aerosola čije su dimenzije manje od talasne dužine upadnog Sunčevog zračenja ($r < 0,1 \mu m$).

Rejlijevo rasejanje je obrnuto proporcionalno talasnoj dužini Sunčevog zračenja, odnosno što je talasna dužina manja, to je Rejlijevo rasejanje veće. Rejlijevo rasejanje je zanemarljivo na talasnim dužinama većim od $1 \mu m$.

Rejlijevo rasejanje se javlja u višim slojevima atmosfere, najčešće na sitnim česticama prašine. Intenzivno rasejanje Sunčevog zračenja u vazduhu na kraćim talasnim dužinama je uzrok plave boje neba i crvene boje zalazećeg Sunca [4, 6].

Mieovo rasejanje Sunčevog zračenja

Mieovo rasejanje je rasejanje Sunčevog zračenja na česticama aerosola čije su dimenzije reda veličine talasne dužine upadnog Sunčevog zračenja (čestice polena, prašine, dima, itd. u donjim slojevima atmosfere) [4].

Neselektivno rasejanje Sunčevog zračenja

Neselektivno rasejanje je rasejanje Sunčevog zračenja na česticama aerosola čije su dimenzije mnogo veće od talasne dužine Sunčevog zračenja (kapljicama vode i velikim česticama prašine). Neselektivno rasejanje Sunčevog zračenja je posledica:

- refleksije sa površine čestice (ogledalska ili difuzna),
- prolaska zračenja kroz česticu sa ili bez unutrašnje refleksije,
- difrakcije na ivicama čestica, itd. [4].

Tompsonovo rasejanje Sunčevog zračenja

Tompsonovo rasejanje je rasejanje Sunčevog zračenja na slobodnim elektronima u atmosferi i ne zavisi od talasne dužine upadnog Sunčevog zračenja [4].

1.2.3. Prelamanje u atmosferi

Sunčevi zraci koji padaju na granicu dva sloja atmosfere sa različitim gustinama se prelamaju, odnosno prividno savijaju naviše u odnosu na horizont.

S obzirom na to da Sunčev zrak na putu ka Zemlji prolazi kroz sve gušću sredinu, sledi da prelamanje u atmosferi prividno izdiže Sunce iznad horizonta. Prelamanje u atmosferi se povećava sa približavanjem Sunca horizontu. Zbog prelamanja u atmosferi dolazi do produžetka obdanice (iako je Sunce ispod horizonta) i diskovi Sunca i Meseca u blizini horizonta izgledaju spljošteno (deformisano po vertikali) jer Sunčevi zraci u donjim tačkama diska bliže horizontu trpe veće prelamanje [4].

1.2.4. Scintilacija u atmosferi

Pod scintilacijom, tj. treperenjem svetlosti podrazumeva se haotična promena njenog intenziteta prilikom prostiranja svetlosti kroz optički nehomogenu i nestacionarnu (turbulentnu) Zemljinu atmosferu. U Zemljinoj atmosferi postoji mnogo nehomogenosti različitih dimenzija

koje menjaju svoj oblik, veličinu i položaj u prostoru. Pritom se svaka nehomogenost u odnosu na upadno Sunčevo zračenje ponaša kao sočivo. Pod dejstvom temperature u nehomogenoj sredini dolazi do promene gustine, indeksa prelamanja i deformacije upadnog elektromagnetnog talasa. Promene amplitude svetlosnog talasa se manifestuju promenama sjaja pri čemu se stvara utisak treperenja svetlosnog izvora [4].

1.2.5. Slabljenje Sunčevog zračenja

Prilikom prolaska Sunčevog zračenja kroz Zemljinu atmosferu dolazi do njegovog slabljenja usled apsorpcije i rasejanja na molekulima gasova koji ulaze u sastav atmosfere, na oblacima, a najviše na suspendovanim aerosolima. Koncentracija aerosoli zavisi od lokacije, atmosferskih uslova, godišnjih (sezonskih) i dnevnih ciklusa, prisustva lokalnih izvora, itd. Pretpostavlja se da se optičke osobine aerosoli neznatno menjaju u toku kratkih vremenskih intervala. Kiša i vetar mogu da smanje koncentraciju aerosoli u atmosferi.

Slabljenje zračenja prilikom prolaska kroz neku sredinu može se opisati koeficijentom slabljenja odnosno koeficijentom ekstinkcije.

Prozračnost atmosfere zavisi od talasne dužine upadnog zračenja. Atmosfera propušta zračenje kroz dva atmosferska prozora i to:

- I prozor koji propušta zračenje u intervalu talasnih dužina od 300-1200 nm, manji deo UV zračenja (300-390 nm), vidljivu svetlost (390-750 nm) i deo infracrvenog zračenja (760-1200 nm) i
- II prozor (radio prozor) koji propušta zračenje od 1 cm do oko 15-20 m.

U vidljivoj oblasti prozračnost atmosfere je oko 80%. Atmosfera je skoro potpuno neprozračna za X i UV zračenje. Zračenje sa talasnim dužinama manjim od 300 nm skoro potpuno je apsorbovano ozonom i molekulima i atomima kiseonika i azota. U IR oblasti najviše zračenja je apsorbovano vodenom parom i ugljen dioksidom i to u donjim delovima atmosfere.

Radio talasi duži od 15-20 m se reflektuju na jonosferi [4, 9-15].

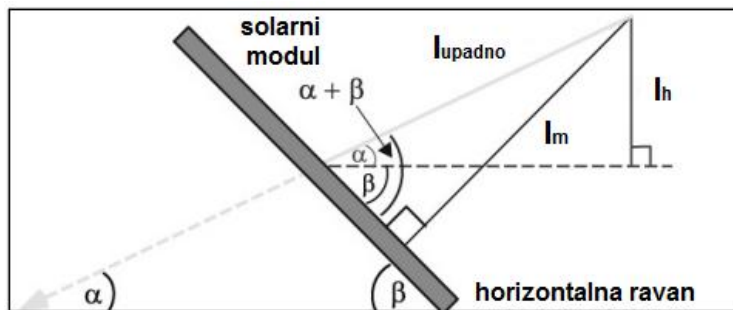
1.3. Sunčevo zračenje koje pada na nagnutu površinu orijentisanu ka jugu

Na solarni modul pored direktnog i difuznog zračenja, pada i zračenje koje je reflektovano sa Zemlje i okolnih objekata na Zemlji.

Kada su poznate vrednosti intenziteta Sunčevog zračenja koje dospeva na horizontalnu površinu (I_h), onda se intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na površinu orijentisanu ka jugu i postavljenu pod nekim uglom u odnosu na horizontalnu ravan (I_m) mogu izračunati pomoću sledećeg izraza:

$$I_m = [I_h \cdot \sin(\alpha + \beta)] / \sin \alpha \quad (1.1)$$

gde je α -elevacioni ugao Sunca (visina Sunca), a β -ugao nagiba solarnog modula u odnosu na horizontalnu površinu.



Slika 1.3. Sunčevo zračenje koje pada na površinu koja je postavljena pod određenim uglom u odnosu na horizontalnu ravan i orijentisana ka jugu

Elevacioni ugao α se izračunava pomoću relacije:

$$\alpha = 90^\circ - \varphi + \delta \quad (1.2)$$

pri čemu je φ -geografska širina, a δ -deklinacioni ugao Sunca dat relacijom:

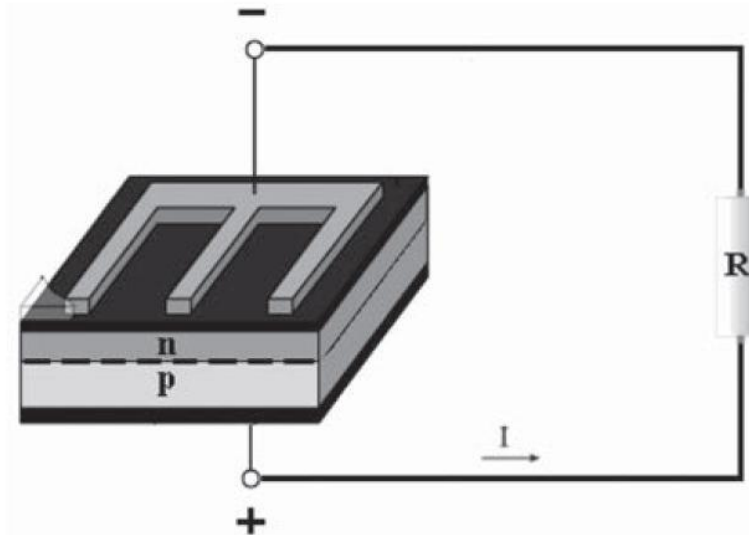
$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin[360 \cdot (284 + d) / 365] \quad (1.3)$$

gde je d -redni broj dana u godini [4, 16-19].

1.4. Fotonaponska konverzija Sunčevog zračenja

Pod fotonaponskom konverzijom Sunčevog zračenja podrazumeva se pretvaranje energije Sunčevog zračenja u električnu energiju. Fotonaponska konverzija Sunčevog zračenja se vrši na solarnim ćelijama koje se izrađuju od poluprovodničkih materijala.

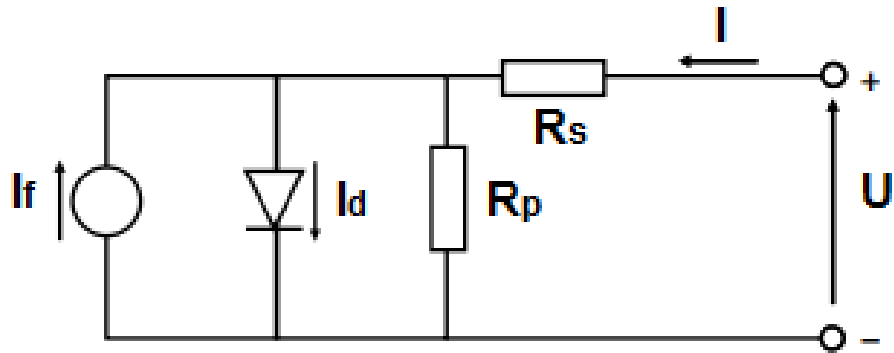
Solarna ćelija predstavlja poluprovodnik kod koga se usled apsorpcije Sunčevog zračenja u $p-n$ spoju formiraju parovi elektron-šupljina. Ukoliko se par elektron-šupljina formira daleko od $p-n$ spoja, vrlo brzo se rekombinuje. Prilikom apsorpcije Sunčevog zračenja unutar ili u blizini $p-n$ spoja, unutrašnje električno polje razdvaja elektrone i šupljine, pri čemu se elektroni kreću prema n strani, a šupljine prema p strani. Kao posledica ovakvog kretanja elektrona i šupljina, na krajevima solarne ćelije se javlja razlika potencijala, odnosno napon. Kada se solarna ćelija poveže u električno kolo sa potrošačem, kroz električno kolo će poteći električna struja [1].



Slika 1.4. Solarna ćelija u strujnom kolu [2]

1.4.1. Strujno-naponska karakteristika solarne ćelije

Osvetljena solarna ćelija u električnom kolu predstavlja izvor jednosmerne električne struje. Ekvivalentna šema solarne ćelije u strujnom kolu data je na slici 1.5.



Slika 1.5. Ekvivalentna šema osvetljene solarne ćelije u strujnom kolu

Solarna ćelija, kao izvor jednosmerne struje, ima serijsku otpornost R_s koja potiče od otpornosti njenih slojeva i od otpornosti površinskih slojeva-elektroda. Postojanje mikrodefekata unutar solarne ćelije uslovljava postojanje njene paralelne otpornosti R_p . Vrednosti za R_s i R_p solarnih ćelija od silicijuma obično iznose $R_s < 0,5 \Omega$ i $R_p > 500 \Omega$. Fotostruja I_f je direktno proporcionalna intenzitetu Sunčevog zračenja.

Kada se solarna ćelija poveže u strujno kolo i osvetli, kroz spoljašnji potrošač (R) poteći će struja I :

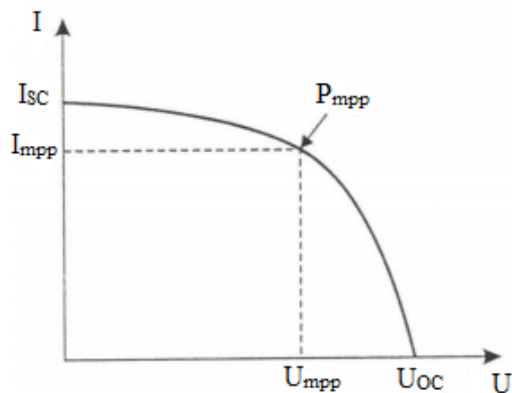
$$I = I_d - I_f = I_0 \{ \exp[(eU)/(kT)] - 1 \} - I_f$$

gde je I_d -struja povratne difuzije, I_f -fotostruja, I_0 -struja zasićenja, e -naelektrisanje elektrona, k -Bolcmanova konstanta, T -temperatura solarne ćelije, U -napon solarne ćelije.

Kada serijski otpor nije zanemarljiv, prethodni izraz dobija oblik:

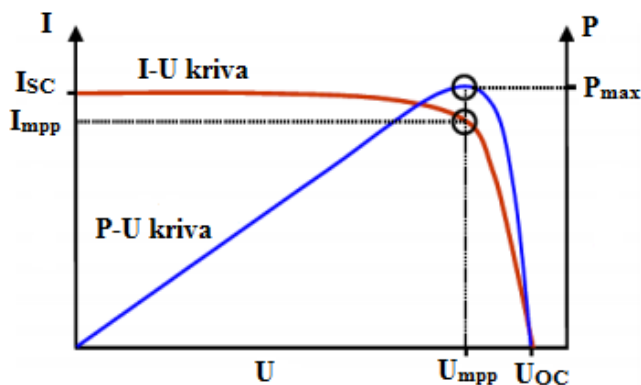
$$I = I_0 \{ \exp[(e(U + R_s I))/(kT)] - 1 \} - I_f$$

Strujno-naponska karakteristika solarne ćelije obično se prikazuje u prvom kvadrantu, kao što je dato na slici 1.6.



Slika 1.6. Strujno-naponska karakteristika solarne ćelije

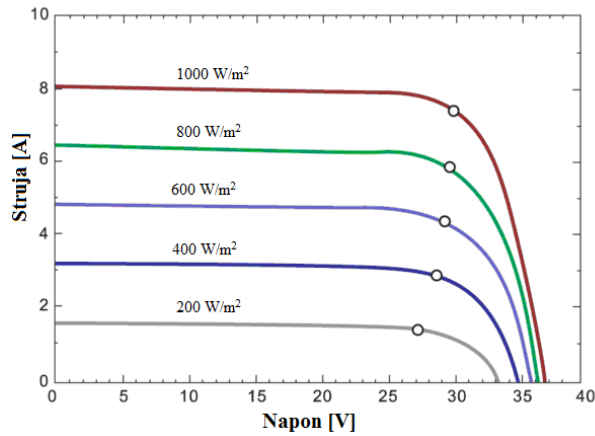
Na slici 1.7. su prikazane strujno-naponska (I-U) karakteristika i zavisnost snage od napona (P-U karakteristika) solarne ćelije, i ključne tačke na ovim krivama. Sa slika 1.6. i 1.7. se može zaključiti da struji kratkog spoja (I_{sc}) odgovara napon od nula volti i da naponu otvorenog kola (U_{oc}) odgovara nulta struja. U „kolenu” strujno-naponske karakteristike se nalazi maksimalna radna tačka (I_{mpp} , U_{mpp}) (maximum power point (MPP)) u kojoj proizvod struje i napona ima maksimalnu vrednost, odnosno u kojoj solarna ćelija proizvodi najviše energije. Proizvod napona i struje (koji inače predstavlja električnu snagu) u nekoj tački strujno-naponske karakteristike solarne ćelije uvek je manji od proizvoda $U_{oc} \cdot I_{sc}$.



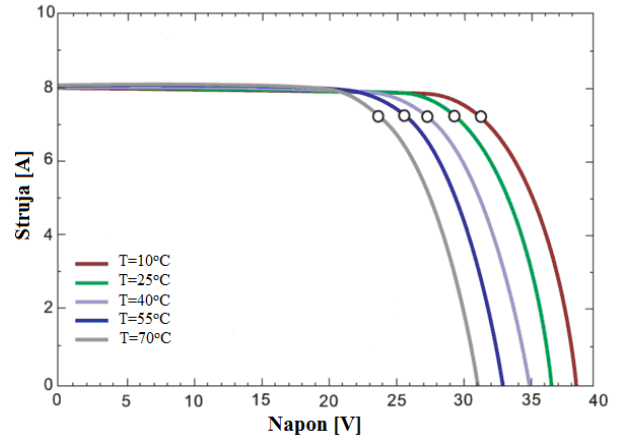
Slika 1.7. I-U i P-U karakteristika solarne ćelije

Maksimalna radna tačka solarne ćelije se menja sa promenom intenziteta Sunčevog zračenja i sa promenom temperature solarne ćelije. Na slici 1.8. je prikazan uticaj intenziteta

Sunčevog zračenja na strujno-naponsku karakteristiku solarne ćelije, a na slici 1.9. uticaj temperature solarne ćelije na njenu strujno-naponsku karakteristiku.

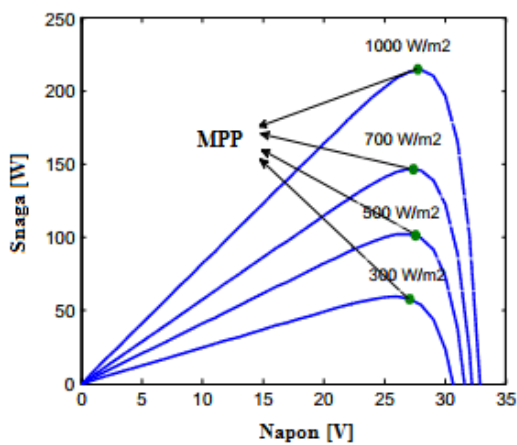


Slika 1.8. Uticaj intenziteta Sunčevog zračenja na strujno-naponsku karakteristiku solarne ćelije

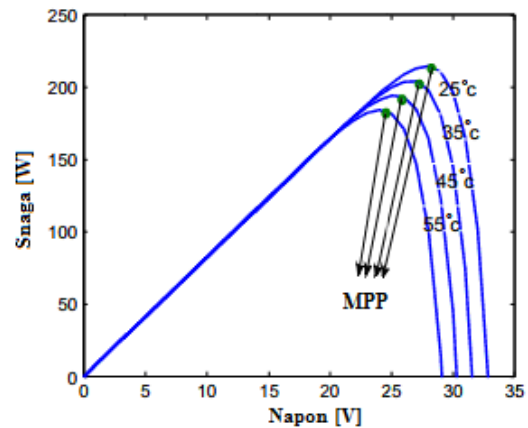


Slika 1.9. Uticaj temperature solarne ćelije na njenu strujno-naponsku karakteristiku

Na slici 1.10. je prikazana P-U karakteristika solarne ćelije za različite vrednosti intenziteta Sunčevog zračenja i temperatura solarne ćelije.



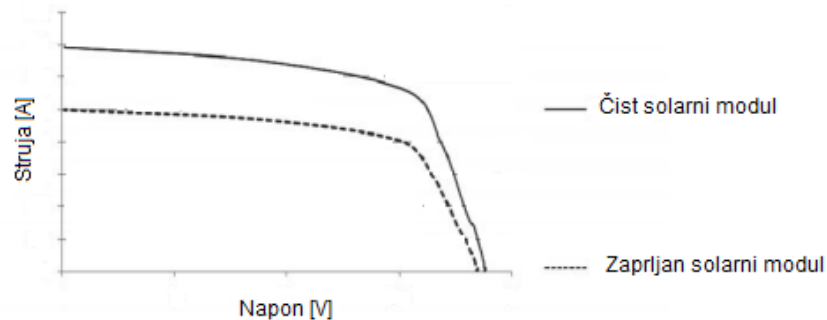
(a)



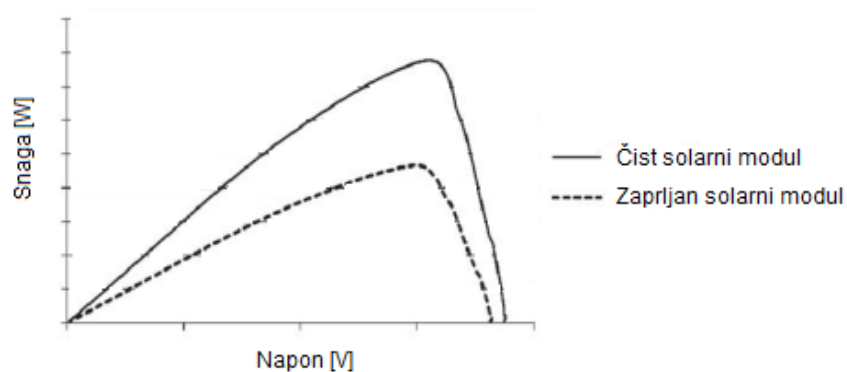
(b)

Slika 1.10. Uticaj intenziteta Sunčevog zračenja (a) i temperature solarne ćelije na P-U karakteristiku solarne ćelije

Uticaj prašine nataložene na solarnoj ćeliji na njenu strujno-naponsku karakteristiku dat je na slici 1.11, a uticaj prašine nataložene na solarnoj ćeliji na njenu P-U karakteristiku dat je na slici 1.12.



Slika 1.11. Strujno-naponska karakteristika čistog i zaprljanog solarnog modula



Slika 1.12. P-U karakteristika čistog i zaprljanog solarnog modula

Usled taloženja prašine na površinama solarnih modula dolazi do deformacije njihovih I-U i P-U karakteristika. Prašina se na solarnim modulima uglavnom neravnomerno taloži, tako da sve solarne ćelije solarnog modula nisu osvetljene istim intenzitetom Sunčevog zračenja zbog čega se I-U i P-U karakteristike solarnih modula menjaju [1, 2, 18, 20-25].

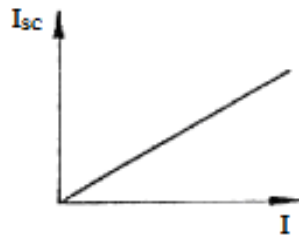
1.4.2. Parametri solarne ćelije

Osnovni parametri solarnih ćelija su: struja kratkog spoja (I_{sc}), napon otvorenog kola (U_{oc}), maksimalna snaga (P_{mpp}), fil faktor (FF) i efikasnost (η) [18, 20].

Struja kratkog spoja (I_{sc})

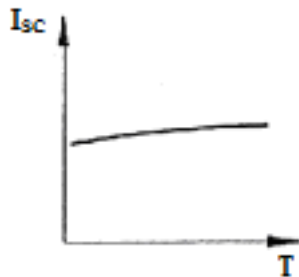
Struja kratkog spoja (I_{sc}) je struja koja teče kroz spoljašnje strujno kolo kada su elektrode solarne ćelije kratko spojene. Ona predstavlja maksimalnu struju solarne ćelije pri nultom naponu i srazmerna je intenzitetu upadnog Sunčevog zračenja. Struja kratkog spoja zavisi od površine solarne ćelije. Sa porastom temperature solarne ćelije, koja je u praksi uvek povezana sa povećanjem intenziteta upadnog Sunčevog zračenja, povećava se struja kratkog spoja.

Struja kratkog spoja solarne ćelije linearno zavisi od intenziteta Sunčevog zračenja (slika 1.13).



Slika 1.13. Zavisnost struje kratkog spoja solarne ćelije od intenziteta Sunčevog zračenja

Sa porastom temperature solarne ćelije, struja kratkog spoja blago raste (slika 1.14).

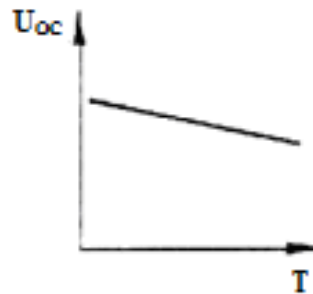


Slika 1.14. Zavisnost struje kratkog spoja solarne ćelije od njene temperature

Prašina nataložena na solarnim ćelijama značajno smanjuje struju kratkog spoja. Struja kratkog spoja je proporcionalna intenzitetu Sunčevog zračenja, tako da se usled taloženja prašine na solarnim ćelijama smanjuje vrednost intenziteta Sunčevog zračenja koje dospeva do njih, a samim tim se smanjuje i struja kratkog spoja [1, 18, 20, 21, 25-28].

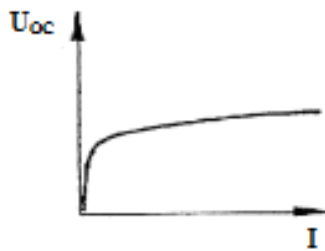
Napon otvorenog kola (U_{oc})

Napon otvorenog kola (U_{oc}) je maksimalni napon na krajevima solarne ćelije u otvorenom električnom kolu (kolu u kome nema proticanja struje). Napon otvorenog kola se smanjuje sa porastom temperature solarne ćelije (slika 1.15).



Slika 1.15. Zavisnost napona otvorenog kola od temperature solarne ćelije

Napon otvorenog kola je logaritamska funkcija intenziteta Sunčevog zračenja (slika 1.16).



Slika 1.16. Zavisnost napona otvorenog kola solarne ćelije od intenziteta Sunčevog zračenja

Na primer, pri smanjenju intenziteta Sunčevog zračenja za dva puta, napon otvorenog kola se smanji za oko 5%. Može se reći da je napon otvorenog kola konstantan pri promeni intenziteta Sunčevog zračenja, osim u slučaju kada je vrednost intenziteta Sunčevog zračenja manja od 100 W/m^2 , pri čemu dolazi do znatnog smanjenja napona otvorenog kola.

Prašina nataložena na solarnim ćelijama neznatno smanjuje napon otvorenog kola [2, 18, 20, 21, 26-28].

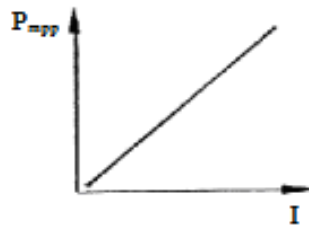
Maksimalna snaga (P_{mpp})

Proizvod napona i struje predstavlja električnu snagu u nekoj tački strujno-naponske karakteristike solarne ćelije i uvek je manji od proizvoda $U_{oc} \cdot I_{sc}$. U kolenu strujno-naponske karakteristike solarne ćelije nalazi se maksimalna radna tačka, tačka koja predstavlja tačku maksimalne snage, P_{mpp} , odnosno tačku u kojoj solarne ćelije ima maksimalnu snagu pri datim uslovima:

$$P_{mpp} = U_{mpp} \cdot I_{mpp}$$

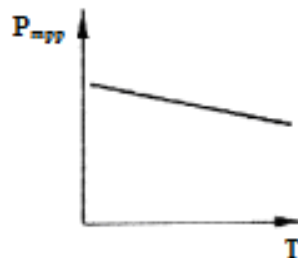
gde su U_{mpp} i I_{mpp} napon i struja koji odgovaraju maksimalnoj snazi solarne ćelije.

Maksimalna snaga solarne ćelije linearno zavisi od intenziteta Sunčevog zračenja (slika 1.17).



Slika 1.17. Zavisnost maksimalne snage solarne ćelije od intenziteta Sunčevog zračenja

Maksimalna snaga solarne ćelije se smanjuje sa porastom njene temperature (slika 1.18).



Slika 1.18. Zavisnost maksimalne snage solarne ćelije od njene temperature

S obzirom na to da snaga solarne ćelije predstavlja proizvod struje i napona, a taloženje prašine značajno smanjuje struju kratkog spoja, može se zaključiti da taloženje prašine značajno smanjuje (maksimalnu) snagu solarne ćelije [2, 18, 21, 25, 26].

Fil faktor (FF)

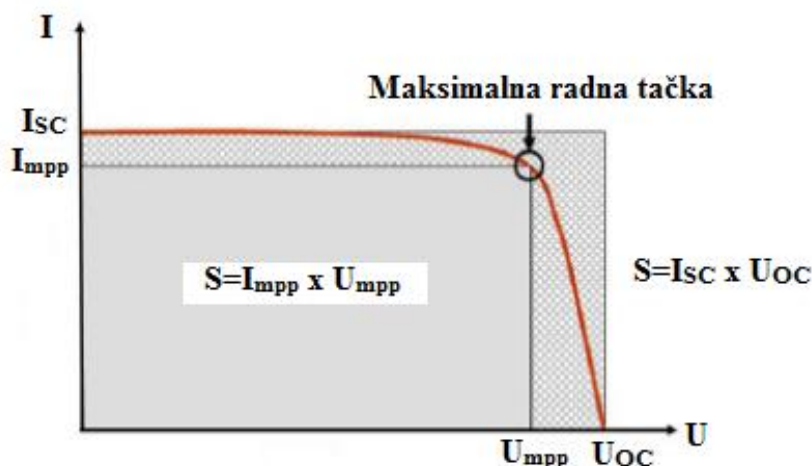
Za optimalnu radnu tačku, u kojoj je korisna snaga maksimalna i $P_{mpp} = U_{mpp} \cdot I_{mpp}$, odnos $(U_{mpp} \cdot I_{mpp}) / (U_{oc} \cdot I_{sc})$ je manji od jedinice. Taj odnos predstavlja fil faktor ili faktor ispunje solarne ćelije (FF):

$$P_{mpp} = U_{mpp} \cdot I_{mpp} = FF \cdot U_{oc} \cdot I_{sc}$$

$$FF = (U_{mpp} \cdot I_{mpp}) / (U_{oc} \cdot I_{sc})$$

Fil faktor solarne ćelije je važan pokazatelj njenih performansi i predstavlja meru kvaliteta $p-n$ spoja. Fil faktor pokazuje koliko je data solarna ćelija bliska idealnoj, odnosno koliki je uticaj serijskog otpora na efikasnost solarne ćelije. Fil faktor solarnih ćelija obično iznosi od 0,7 do 0,9.

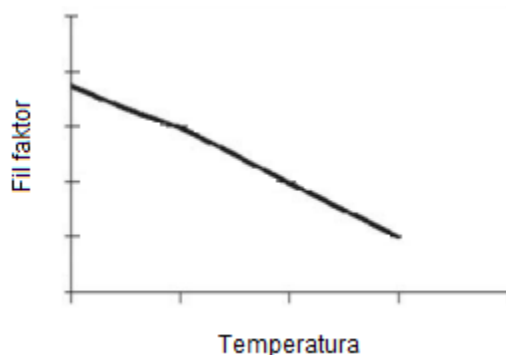
Fil faktor može da se predstavi kao odnos pravougaonika sa manjom površinom i pravougaonika sa većom površinom na slici 1.19. Ukoliko dve solarne ćelije od istog materijala imaju I-U krive koje se međusobno razlikuju, solarna ćelija sa većim fil faktorom će imati veću snagu i proizvođiće veći iznos električne energije u odnosu na solarnu ćeliju sa manjim fil faktorom.



Slika 1.19. Fil faktor solarne ćelije

Fil faktor se ne menja drastično sa promenom napona otvorenog kola. Inače, velike promene u naponu otvorenog kola solarnih ćelija nisu uobičajene.

Veće vrednosti fil faktora odgovaraju malim vrednostima serijskog otpora. S obzirom na to da serijski otpor zavisi od temperature, fil faktor se takođe menja sa promenom temperature. Sa porastom temperature solarne ćelije, njen fil faktor se smanjuje (slika 1.20).



Slika 1.20. Zavisnost fil faktora solarne ćelije od njene temperature

U literaturi se mogu naći kontradiktorni podaci o uticaju prašine na fil faktor solarne ćelije, odnosno da prašina nataložena na solarnim ćelijama smanjuje njihov fil faktor i da prašina nataložena na solarnim ćelijama neznatno utiče na smanjenje njihovog fil faktora [1, 2, 18, 20, 21, 25, 28].

Efikasnost solarne ćelije (η)

Efikasnost solarne ćelije (η) predstavlja odnos iskorišćene energije i ukupne energije Sunčevog zračenja koje pada na solarnu ćeliju. Efikasnost solarne ćelije se može izračunati na sledeći način:

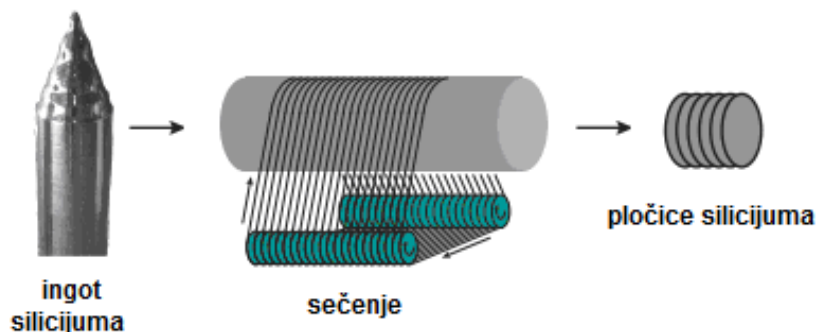
$$\eta = (U_{mpp} \cdot I_{mpp}) / (I_s \cdot S) = (FF \cdot U_{oc} \cdot I_{sc}) / (I_s \cdot S)$$

gde su U_{mpp} i I_{mpp} napon i struja maksimalne radne tačke, I_s -intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na solarnu ćeliju površine S . Da bi efikasnost solarne ćelije bila što veća, potrebno je da U_{oc} i I_{sc} budu što veći i da je FF približno jednak jedinici.

Efikasnost solarne ćelije zavisi od intenziteta Sunčevog zračenja i od temperature solarne ćelije. Efikasnost opada sa smanjenjem intenziteta Sunčevog zračenja. Efikasnost opada sa porastom temperature solarne ćelije [1, 2, 18, 20, 25].

1.4.3. Proizvodnja solarnih ćelija od monokristalnog silicijuma

Početna sirovina za proizvodnju solarnih ćelija od monokristalnog silicijuma je kvarcit. Kvarcit je stena koja se sastoji od skoro potpuno čistog silicijum-dioksida (SiO_2) od koga se u prvom koraku proizvodnje dobija silicijum najnižeg kvaliteta, takozvani metalurški silicijum. Od metalurškog silicijuma se kroz više različitih procesa dobijaju ingoti monokristalnog silicijuma, tj. veliki cilindri silicijuma koji se sastoje od samo jednog kristala. Usled poboljšanja procesa proizvodnje danas se mogu dobiti ingoti silicijuma prečnika 200-300 mm i dužine do dva metra. Dobijeni ingoti se seku na pločice debljine od 150-200 μm .



Slika 1.21. Sečenje ingota silicijuma na pločice

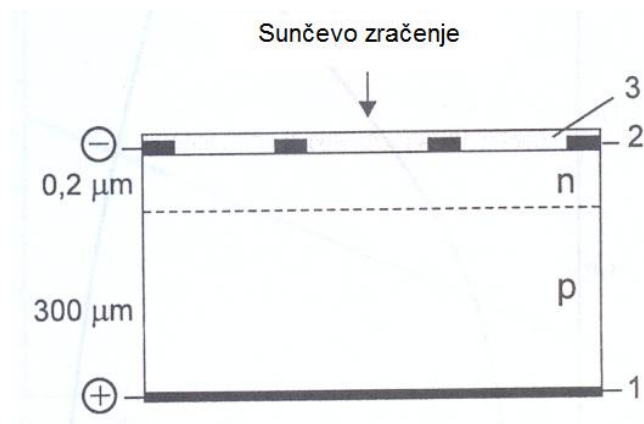
Pločice se nakon sečenja poliraju i čiste u razblaženom rastvoru hlorovodonične i azotne kiseline. Pločice silicijuma predstavljaju poluprovodnike *p*-tipa jer se prilikom formiranja monokristala silicijuma rastopu silicijuma dodaje bor. Površinski slojevi silicijumskih pločica se dopiraju fosforom, tako da se na njihovim površinama formira poluprovodnik *n*-tipa. Kako bi se dobio *p-n* spoj, sa zadnje i sa bočnih strana pločica se hemijskim i mehaničkim putem uklanja površinski sloj *n*-tipa. Zadnja strana pločice silicijuma je udaljena od *p-n* spoja, a samim tim i od uticaja unutrašnjeg električnog polja, tako da se javlja problem prikupljanja naelektrisanja na

njoj. Zbog toga se zadnja strana pločice silicijuma, ukoliko je osnovni materijal p -tipa, dodatno dopira primesama p -tipa, tako da se dobija ćelija n^+pp^+ tipa, poznata pod nazivom BSF (Back Surface Field) ćelija, odnosno ćelija sa poljem uz zadnju stranu.

Vakuumskim naparavanjem odgovarajućih metala na pločici silicijuma formiraju se metalni kontakti. Za ovu namenu se obično koristi Ti/Pd/Ag prevlaka pri čemu se na pločicu silicijuma prvo nanosi Ti sloj koji ima dobru adheziju sa silicijumom, zatim se preko njega nanosi Pd sloj, a iznad Pd sloja se nanosi Ag sloj. Kako bi se poboljšao kontakt između pločice silicijuma i Ti/Pd/Ag prevlake, pločica sa metalnim kontaktom se izvesno vreme izlaže temperaturi 500-600°C.

Indeks prelamanja silicijuma ima vrednosti 3-6, tako da solarne ćelije od monokristalnog silicijuma reflektuju 30-60% Sunčevog zračenja. Kako bi se smanjila refleksija, na solarne ćelije od monokristalnog silicijuma se nanosi antirefleksioni sloj od materijala kao što su SiO, SiO₂, TiO, TiO₂, Ta₂O₃, itd. koji imaju indeks prelamanja 1,5-2. U zavisnosti od materijala od koga je napravljen antirefleksioni sloj, mogu se dobiti solarne ćelije od monokristalnog silicijuma različitih boja.

Šematski prikaz poprečnog preseka solarne ćelije od monokristalnog silicijuma dat je na slici 1.22.



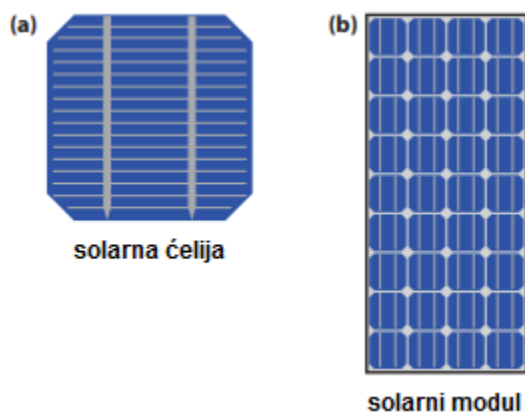
Slika 1.22. Šematski prikaz poprečnog preseka solarne ćelije od monokristalnog silicijuma: 1) zadnja elektroda, 2) prednja elektroda, 3) antirefleksioni sloj

Solarne ćelije od monokristalnog silicijuma su osetljive u oblasti talasnih dužina 0,4-1,1 μm, a maksimum njihove osetljivosti nalazi se na talasnim dužinama 0,8-0,9 μm. Efikasnost

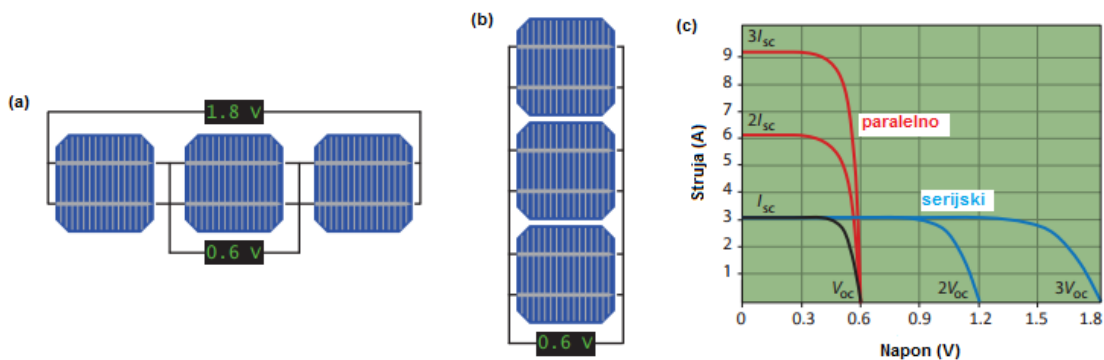
komercijalnih solarnih ćelija od monokristalnog silicijuma iznosi oko 15%, a laboratorijskih oko 24% [1, 20, 29].

1.4.4. Solarni moduli od monokristalnog silicijuma

Solarne ćelije se mogu povezati serijski, paralelno ili kombinovano, i tako formirati solarni modul (slika 1.23). Pri serijskom povezivanju solarnih ćelija pojačava se izlazni napon, a kod paralelnog povezivanja izlazna struja (slika 1.24).

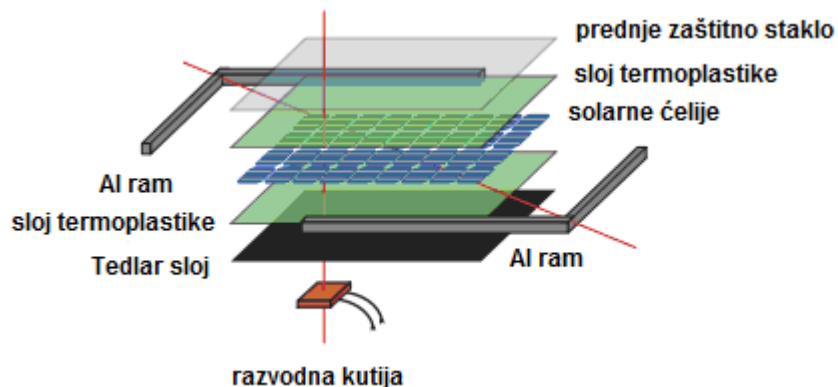


Slika 1.23. (a) Solarna ćelija i (b) solarni modul



Slika 1.24. (a) Serijska veza tri solarne ćelije, (b) paralelna veza tri solarne ćelije, (c) I-U karakteristike tri serijski povezane i tri paralelno povezane solarne ćelije

Solarni modul se sastoji od solarnih ćelija, sloja termoplastike, prednjeg zaštitnog stakla, Tedlar sloja, aluminijskog rama i razvodne kutije.



Slika 1.25. Komponente tipičnog solarnog modula od monokristalnog silicijuma

Solarne ćelije se postavljaju između dva sloja termoplastike, pri čemu se najčešće koristi etilen-vinil-acetat (EVA) debljine oko 0,5 mm. Sa prednje strane, preko sloja termoplastike, postavlja se zaštitno kaljeno staklo debljine 2-3 mm koje je istovremeno transparentno za upadno Sunčevo zračenje. Zaštitno staklo mora imati nizak procenat gvožđa kako bi transmisija bila visoka. Savremeni solarni moduli koriste stakla sa cerijumom koji apsorbuje UV zračenje. Sa zadnje strane, preko sloja termoplastike najčešće se nalazi Tedlar sloj, a ponekad sloj stakla ili sloj kompozitnog polimera, koji štiti solarne ćelije od vlage i korozije. U cilju povećanja mehaničke stabilnosti, oko celog solarnog modula se postavlja aluminijski ram. Razvodna kutija se obično postavlja na zadnjoj strani solarnog modula. U njoj se nalaze električni priključci solarnih ćelija i žice koje služe za povezivanje solarnog modula sa drugim komponentama PV sistema.

Parametri koji karakterišu solarne module su, kao i kod solarnih ćelija, struja kratkog spoja, napon otvorenog kola, izlazna snaga, fil faktor i efikasnost.

Na tržištu se mogu naći solarni moduli različite snage, a najčešće od 50 W, 100 W, 150 W i 200 W.

Na performanse solarnih modula utiču različiti faktori kao što su: materijal od koga je modul napravljen, ugao nagiba solarnog modula, orijentacija modula, zaprljanost površine

modula, njegova temperatura, lokalni klimatski i meteorološki uslovi (intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na površinu modula, temperatura vazduha, brzina i pravac vetra, količina padavina, vlažnost vazduha), itd.

Vetar različito utiče na performanse solarnih modula. Vetar hladi solarne module i na taj način povećava njihovu efikasnost. Vetar podiže prašinu u vazduh, prenosi je i taloži na solarnim modulima. Međutim, pod dejstvom vetra se čestice prašine mogu i ukloniti sa solarnih modula [1, 2, 19, 20, 27, 29-35].

LITERATURA

- [1] T. Pavlović, B. Čabrić, *Fizika i tehnika solarne energetike*, Građevinska knjiga, Beograd, drugo izmenjeno i dopunjeno izdanje 2007, ISBN 86-395-0505-5.
- [2] T. Pavlović, D. Milosavljević, D. Mirjanić, *Obnovljivi izvori energije*, Akademija nauka i umjetnosti Republike Srpske, Monografije-Knjiga XVII, Odjeljenje prirodno-matematičkih i tehničkih nauka-Knjiga 18, Banja Luka, 2013, ISBN 978-99938-21-41-0.
- [3] H. Qasem, *Effect of accumulated dust on the performance of photovoltaic modules*, Doctoral Thesis, Loughborough University, 2013.
- [4] T. Pavlović et al., *Solar energy and lighting*, book in press
- [5] D. Vasiljević, *Optički uređaji i optoelektronika*, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, 2004.
- [6] Đ. Koruga, D. Vasiljević, J. Šakota, *Prostiranje zračenja kroz atmosferu*, Osnove optike, optičkih pomagala i uređaja, Handout 7-2012/2013.
- [7] A. Sayyah, M. N. Horenstein, M. K. Mazumder, *Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels*, Solar Energy 107 (2014), 576-604.
- [8] N. Riemer et al., *Modeling aerosols on the mesoscale- γ : Treatment of soot aerosol and its radiative effects*, Journal of Geophysical Research, Volume 108, No. D19, 4601, 2003, AAC 4-1 – AAC 4-16.
- [9] F. M. Zaihidee et al., *Dust as an unalterable deteriorative factor affecting PV panel's efficiency: Why and how*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 65 (2016) 1267-1278.
- [10] Y. A. Eltbaakh et al., *Solar attenuation by aerosols: An overview*, Renewable and

- Sustainable Energy Reviews 16 (2012) 4264-4276.
- [11] <https://earthobservatory.nasa.gov/Features/Aerosols/>
- [12] S. A. Khalil and A. M. Shaffie, Attenuation of the solar energy by aerosol particles: A review and case study, *RaSER* 54 (2016) 363-375.
- [13] H. Zhao et al., Investigation of the Optical Properties of Aerosols over the Coastal Region at Dalian, Northeast China, *Atmosphere* 2016, 7, 103, www.mdpi.com/journal/atmosphere
- [14] Q. Wang et al., Validation and Accuracy Analysis of Global MODIS Aerosol Products over Land, *Atmosphere* 2017, 8, 155, www.mdpi.com/journal/atmosphere
- [15] http://cdiac.ess-dive.lbl.gov/aerosol_particle_types.html
- [16] <http://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-sunlight/solar-radiation-tilted-surface>
- [17] J. A. Duffie, W. A. Beckman, *Solar Engineering and Thermal Processes*, 2nd ed., John Willey and Sons, New York, USA, 1991.
- [18] **I. S. Radonjić, T. M. Pavlović, *Investigation of the energy efficiency of horizontally mounted solar module soiled with CaCO₃*, *Facta Universitatis: Series Physics, Chemistry and Technology*, Volume 15, No. 2, 2017, pp. 57-69.**
- [19] J. Cano, *Photovoltaic Modules: Effect of Tilt Angle on Soiling*, A Thesis Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science in Technology, Arizona State University, Tempe, Ariz., USA, 2011.
- [20] K. Jäger et al., *Solar Energy-Fundamentals, Technology and Systems*, Delft University of Technology, 2014.
- [21] Ndiaye et al., *Impact of dust on the photovoltaic (PV) modules characteristics after an exposition year in Sahelian environment: The case of Senegal*, *International Journal of Physical Sciences*, Vol. 8(21), 9 June 2013, pp. 1166-1173.
- [22] J. L. Santos, F. L. M. Antunes, *Maximum Power Point Tracker for PV Systems*, RIO 3 - World Climate & Energy Event, 1-5 December 2003, Rio de Janeiro, Brazil.
- [23] <https://www.solarelectricsupply.com/perlight-solar-plm-250m-60-solar-panels-102>
- [24] M. R. Maghami et al., *Power loss due to soiling on solar panel: A review*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 59 (2016), 1307-1316.
- [25] B. Ghosh, A. K. Ghosh, *Effect of Dust on Solar PV Modules Efficiency*, *Science and Culture*, Volume 80, September-October 2014, 290-297.
- [26] W. AL Saluos, *Dust Effect on Photovoltaic Electric Systems*, *International Journal of*

- Emerging Engineering Research and Technology, Volume 3, Issue 10, October 2015, pp. 4-9.
- [27] E. Klugmann-Radziemska, *Degradation of electrical performance of a crystalline photovoltaic module due to dust deposition in northern Poland*, Renewable Energy 78 (2015) 418-426.
- [28] J. Tanesab et al., *The contribution of dust to performance degradation of PV modules in a temperate climate zone*, Solar Energy 120 (2015), 147-157.
- [29] <https://kashanu.ac.ir/Files/Content/Handbook.pdf>
- [30] **I. S. Radonjić et al., *Investigation of the impact of atmospheric pollutants on solar module energy efficiency*, Thermal Science, Volume 21, No. 5, 2017, pp. 2021-2030, <http://thermalscience.vinca.rs/pdfs/papers-2016/TSCI160408176R.pdf>**
- [31] H. M. Ali, et al., *Effect of Dust Deposition on the Performance of Photo Voltaic Modules in Taxila, Pakistan*, Thermal Science, 21 (2017), 2, pp. 915-923.
- [32] M. A. Bashir, et al., *An Experimental Investigation of Performance of Photovoltaic Modules in Pakistan*, Thermal Science, 19 (2015), Suppl. 2, pp. S525-S534.
- [33] H. A. Kazem, M. T. Chaichan, *Experimental analysis of the effect of dust's physical properties on photovoltaic modules in Northern Oman*, Solar Energy 139 (2016), 68-80.
- [34] S. A. M. Said et al., *The effect of environmental factors and dust accumulation on photovoltaic modules and dust-accumulation mitigation strategies*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 82, Part 1, February 2018, Pages 743-760.
- [35] G. Picotti et al., *Soiling of solar collectors - Modelling approaches for airborne dust and its interactions with surfaces*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 81, Part 2, January 2018, pp. 2343-2357.

DRUGO POGLAVLJE

ZAPRLJANOST SOLARNIH MODULA

Zaprljanost je termin koji se koristi za opisivanje taloženja prašine (prljavštine) na solarnim modulima. Zaprljanost solarnih modula naročito predstavlja problem u sušnim oblastima gde je količina prašine u vazduhu velika, a količina padavina mala. Sunčevo zračenje se apsorbuje i rasejava na prašini koja postoji u atmosferskom vazduhu, ali se takođe apsorbuje i rasejava na prašini nataloženoj na solarnim modulima tako da dolazi do smanjenja intenziteta Sunčevog zračenja koje dospeva na solarne ćelije. Ovo može da izazove otežan rad celog PV sistema i da se zbog toga dobije manje električne energije.

Zaprljanost ne uključuje samo taloženje prašine, već i zaprljavanje biljnim produktima, solima, ptičijim izmetom, rastom organskih vrsta, itd, što sve negativno utiče na performanse solarnih modula.

Smanjenje performansi solarnih modula usled zaprljanosti takođe zavisi od raspodele čestica prašine nataloženih na površini modula po veličini. Manje čestice prašine imaju veću specifičnu površinu i mogu da se rasporede uniformnije i blizu jedna drugoj po površini solarnog modula, tako da je prostor između njih kroz koji svetlost može da prođe mnogo manji u odnosu na veće čestice prašine. Zbog toga manje čestice prašine uzrokuju značajnije smanjenje performansi solarnih modula, a samim tim i veće energetske gubitke, u poređenju sa istom masenom koncentracijom nataloženih većih čestica prašine.

Smanjenje efikasnosti solarnih modula usled njihove zaprljanosti zavisi od oblasti u kojoj se nalaze i od klimatskih karakteristika te oblasti [1-12].

2.1. Prašina

U literaturi se mogu naći različite definicije prašine, u zavisnosti od oblasti primene i oblasti istraživanja. U geološkom smislu, prašina se sastoji od čvrstih neorganskih čestica koje su nastale usled raspadanja stena tokom vremena. U atmosferskom smislu se pod prašinom podrazumevaju čestice koje lebde u vazduhu, odnosno aerosoli u čvrstom agregatnom stanju. U sastav prašine mogu da dospeju i organske čestice koje vetar podiže u atmosferu i koje se ponašaju kao lepak koji spaja čestice prašine međusobno ili čestice prašine sa površinom na koju se natalože.

Generalno, pod prašinom se podrazumeva mešavina različitih polutanata koji su karakteristični za određeno geografsko područje. Reč prašina predstavlja opšti naziv za čestice

bilo koje materije prečnika manjeg od 500 μm . Važne karakteristike prašine su veličina i raspodela njenih čestica, gustina, oblik, hemijski sastav, itd. Veličina i oblik čestica prašine, kao i ponašanje naslaga i brzina nagomilavanja prašine zavise od geografskog položaja, klimatskih uslova i urbanizacije određene lokacije. Čestice prašine se prema veličini svog prečnika mogu podeliti na: fine, odnosno sitnije (sa prečnikom manjim od 2,5 μm) i grube, odnosno krupnije (sa prečnikom većim od 2,5 μm). Čestice prašine imaju različite i nepravilne oblike. Važni ambijentalni uslovi koji mogu uticati na karakteristike i ponašanje prašine su vlažnost vazduha, brzina i smer kretanja vetra, itd. Koncentracija prašine u vazduhu eksponencijalno opada sa porastom nadmorske visine, osim pri pojavi oluja prašine.

Sastav prašine odražava karakteristike regiona odakle potiče prašina. U zavisnosti od lokacije, hemijski sastav prašine i njena količina na solarnim modulima mogu znatno da se razlikuju. U sastav prašine najčešće ulaze organski minerali (uglavnom pesak (kvarc) i erodirani krečnjak (kalcit), a nešto manje dolomit i glina, itd.) i čestice koje nastaju usled sagorevanja fosilnih goriva, ali prašina može da sadrži i male količine polena i gljiva, bakterija, vegetacije, mikrovlakana, itd. Zagađenje vazduha je veće u urbanim oblastima zbog velike gustine naseljenosti i industrijskih aktivnosti, a u njima su naročito prisutne čestice koje nastaju kao proizvod sagorevanja fosilnih goriva i koje nastaju prilikom građevinskih radova. U seoskim oblastima se u prašini mogu naći čestice iz različitih vrsta đubriva, čestice zemlje koje je oduvao vetar ili čestice poreklom od biljaka.

Ukoliko je tokom dužeg vremenskog perioda relativna vlažnost vazduha velika, na solarnim modulima mogu početi da rastu neke biološke vrste. Čestice fine prašine obično predstavljaju mešavinu ugljenika koji se javlja usled nepotpunog sagorevanja goriva, i sekundarnih čestica nastalih u hemijskim reakcijama u atmosferi (kondenzati kiselina, sulfati, nitrati, itd.), a čestice grube prašine obično vode poreklo od organskih materijala i čađi.

Prašina koja se nalazi u vazduhu se uglavnom sastoji od silicijuma jer je on hemijski element koga ima najviše u Zemljinoj kori. U prašini uglavnom ima dosta kiseonika i kalcijuma, a nešto manje aluminijuma, gvožđa, magnezijuma, ugljenika, kalijuma, natrijuma, sumpora, hlora, itd. Kalcijum koji se nalazi u prašini uglavnom potiče od industrijskih aktivnosti (npr. fabrike cementa), a delimično od stalnih građevinskih aktivnosti i degradacije građevinskih elemenata. Postoje i mnogi izuzeci, imajući u vidu da sastav prašine veoma zavisi od lokalnih uslova.

Može se reći da čestice prašine prolaze kroz tzv. „životni ciklus” koji se sastoji od četiri faze:

- stvaranje (nastajanje),
- taloženje,
- adhezija i
- uklanjanje [1, 7, 9, 11, 13-20].

2.1.1. Stvaranje prašine

Stvaranje prašine predstavlja proces dospevanja čestica prašine u atmosferu.

Prašina dospeva u vazduh na različite načine: može da je podigne i nosi vetar, može da se podigne i usled kretanja pešaka i vozila, može da se pojavi iz izduvnih gasova vozila, usled vulkanskih erupcija, poljoprivrednih aktivnosti (kao što je oranje), životinjskih aktivnosti, i uopšte usled zagađenja vazduha.

Čestice prašine dospevaju u atmosferu uglavnom usled erozije zemljišta pod dejstvom vetra, nakon čega ih vetar dalje prenosi. Rasprostiranje prašine pod dejstvom vetra se javlja kada vetar ima dovoljno snage da prašinu pomeri sa tla.

Na proces nastajanja prašine utiče veliki broj parametara, kao što su osobine zemljišta, karakteristike prašine, atmosferski uslovi (padavine, na primer, smanjuju koncentraciju prašine u vazduhu), itd.

Uticaj čoveka na nastajanje prašine je samo na lokalnom nivou i ogleda se u emitovanju izduvnih gasova iz vozila i poljoprivrednih aktivnosti [1, 7, 10, 16, 17, 21].

2.1.2. Talozenje prašine

Talozenje prašine se smatra najvažnijim procesom koji dovodi do zaprljavanja solarnih modula.

Talozenje prašine opisuje procese usled kojih čestice prašine dospevaju na površinu solarnih modula. Čestice prašine dospevaju na površinu solarnih modula uglavnom pod dejstvom gravitacije i usled difuzije čestica prašine u vazduhu.

Faktori koji utiču na taloženje prašine na solarnim modulima su: ugao njihovog nagiba, lokacija na kojoj se nalaze, koncentracija čestica prašine u vazduhu, osobine čestica prašine (veličina, oblik, gustina, sastav), lokalni klimatski i meteorološki uslovi (atmosfera stabilnost, brzina i pravac vetra, količina padavina, relativna vlažnost vazduha), karakteristike površine solarnih modula, itd. Većina ovih faktora je karakteristična za određeno područje. Količina prašine nataložene na solarnim modulima zavisi i od vremena koje su moduli proveli napolju (perioda tokom koga su solarni moduli izloženi prašini) bez čišćenja.

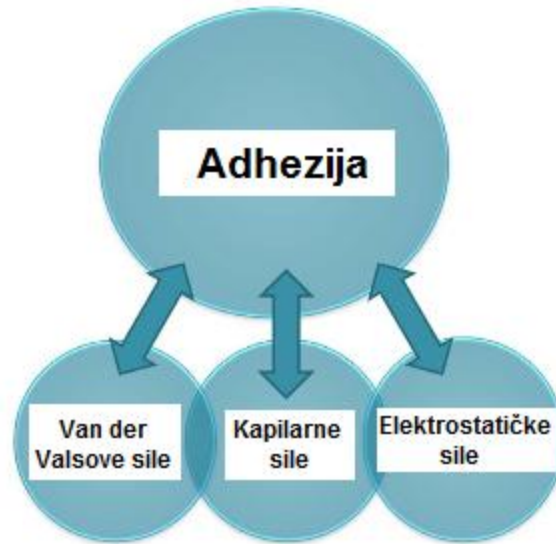
Ugao nagiba solarnih modula takođe utiče na taloženje prašine na njihovoj površini. Sa porastom ugla nagiba od 0° (horizontalni položaj) do 90° (vertikalni položaj) opada količina nataložene prašine na solarnim modulima. Najviše prašine se taloži na horizontalno postavljenim solarnim modulima, tako da ovako postavljeni moduli imaju najveće gubitke usled taloženja prašine na njima.

Osnovni mehanizam pri taloženju prašine je gravitacija, tako da se najviše prašine taloži kada je ugao nagiba solarnog modula 0° . Kada je solarni modul postavljen vertikalno, osnovni mehanizam pri taloženju čestica prašine je difuzija čestica u vazduhu.

Taloženje prašine pod dejstvom gravitacije je proporcionalno kvadratu prečnika čestice prašine, tako da što je čestica veća, veća je brzina taloženja čestice. Prema tome, većina čestica nataloženih na horizontalno postavljen solarni modul je većih dimenzija, a manje je finijih čestica. Difuzija je obrnuto proporcionalna prečniku čestice prašine, tako da se prašina nataložena na vertikalno postavljen solarni modul sastoji pretežno od finijih čestica [7-9, 11, 12].

2.1.3. Adhezija

Adhezija između čestica prašine na solarnom modulu i njegove površine predstavlja rezultat različitih interakcija koje se javljaju između njih na nano i mikro nivou (Van der Valsove sile, kapilarne sile i elektrostatičke sile).



Slika 2.1. Adhezione sile koje deluju na česticu prašine koja se nalazi na površini solarnog modula

Van der Valsove sile su slabo privlačne sile između dva molekula koje se javljaju zbog interakcije dipola različitih molekula. Za razliku od kapilarnih i elektrostatičkih sile, Van der Valsove sile su uvek prisutne između čestica prašine i površine solarnog modula.

Kapilarne sile između čestica prašine i površine solarnog modula se javljaju kada je relativna vlažnost vazduha velika (veća od 40%) ili kada je površina solarnog modula prekrivena slojem vode. Kada je prisutna, kapilarna sila je dominantna sila u adhezionom procesu. Kapilarna sila se javlja između dva mokra tela koja se dodiruju i uglavnom se javlja usled kondenzacije vlage iz vazduha koji okružuje solarni modul.

Ukoliko su čestice prašine naelektrisane, u procesu adhezije između čestica prašine i površine solarnog modula se javljaju i elektrostatičke sile.

Adhezione sile između čestica prašine i površine na kojoj se nalaze prvenstveno zavise od veličine kontaktne površine između njih, tako da adhezione sile rastu sa povećanjem veličine čestica prašine. Adhezione sile između sfernih čestica prašine i površine solarnog modula su veće zato što sferne čestice imaju veću kontaktnu površinu sa površinom na kojoj se nalaze. Pri velikoj relativnoj vlažnosti vazduha povećava se adhezija usled kondenzovanja vode i pojave kapilarnih sila između čestica prašine i površine solarnog modula.

Procesi adhezije i uklanjanja se najčešće razmatraju paralelno jer predstavljaju konkurentne procese čija ravnoteža određuje koje čestice prašine će ostati na površini solarnog modula, a koje će vremenom nestati sa njegove površine [7, 15, 22].

2.1.4. Uklanjanje prašine

Finalna faza u životnom ciklusu čestica prašine je njihovo uklanjanje sa solarnih modula. Ako se izuzme čišćenje solarnih modula veštačkim putem, prašina sa solarnih modula se može ukloniti pod dejstvom padavina (kiša i sneg) i vetra, tj. putem prirodnog čišćenja. Kiša i vetar su najefikasniji prirodni faktori za uklanjanje prašine sa solarnih modula. Izvršeno je više različitih eksperimenata kako bi se ispitao uticaj kiše i vetra na uklanjanje prašine sa solarnih modula. Smatra se da slaba kiša (manje od 1 l/m² kiše u toku dana) negativno utiče na proces uklanjanja prašine sa solarnih modula zato što može da stvori lepljiv sloj koji vezuje prašinu za površinu solarnog modula. Preporučuje se čišćenje solarnih modula odmah nakon ovakvih pojava da bi se njihova efikasnost vratila u prvobitno stanje. U literaturi se kao količina kiše potrebna da se solarni modul očisti navodi vrednost od oko 4-5 l/m² kiše u toku dana. Opšte je poznato da intenzivna (i česta) kiša očisti solarne module i na taj način poboljšava njihove performanse i obnavlja njihovu efikasnost skoro na početnu.

Istraživanja uticaja vetra na uklanjanje prašine sa solarnih modula su pokazala da ne postoji prag brzine vetra za početak uklanjanja, već da postoji određeni interval brzina vetra pri kome se prašina efikasno uklanja sa solarnih modula. Osnovni mehanizmi uklanjanja prašine sa solarnih modula pomoću vetra su: kotrljanje, klizanje i podizanje čestica prašine. Kotrljanje čestica prašine je dominantan proces uklanjanja prašine sa solarnih modula vetrom. Istraživanja su pokazala da se pod uticajem vetra veće čestice prašine lakše uklanjaju sa solarnih modula u odnosu na manje čestice.

Sa povećanjem ugla nagiba solarnih modula smanjuje se količina prašine nataložene na njima zato što se na taj način povećava verovatnoća uklanjanja čestica prašine (naročito većih čestica prašine) sa njihovih površina vetrom i kišom [4, 7, 9, 15, 23].

2.2. Čišćenje i održavanje solarnih modula

Zbog zaprljavanja solarnih modula mora se vršiti njihovo povremeno čišćenje koje predstavlja značajan trošak koji je često teško precizno odrediti, naročito u ranim fazama projektovanja, izgradnje i rada solarnih PV elektrana. Očekuje se da poznavanje „životnog ciklusa“ čestica prašine i količine prašine na određenoj lokaciji da značajne rezultate u oblasti rada i održavanja solarnih PV elektrana.

U komercijalnim PV sistemima čišćenje solarnih modula predstavlja dodatni trošak jer se mora postaviti poseban sistem za njihovo čišćenje ili angažovati tim ljudi koji će ih očistiti. U stambenim objektima solarne module obično čiste vlasnici kuća.



Slika 2.2. Manuelno čišćenje solarnih modula

Čišćenje solarnih modula se vrši na različite načine i pomoću različitih sredstava. Najefikasnije sredstvo za čišćenje solarnih modula je voda. Za uklanjanje lepljivih ili blatnjavih nečistoća se koristi voda pod pritiskom ili četka. U kišnim periodima kiša ukloni svu prašinu sa solarnih modula. Međutim, u periodima bez kiše (na primer leti) nagomilavanje prašine na površinama solarnih modula u nekim oblastima u svetu može da uzrokuje dnevne gubitke preko 20%.



Slika 2.3. Čišćenje solarnih modula vodom pod pritiskom i četkom

Za čišćenje solarnih modula vodom koriste se različiti automatizovani sistemi kao što su sistemi sa mlaznicama, sistemi sa četkom, itd. Sistemi sa mlaznicama mogu da koriste fiksne ili klizeće mlaznice. U sistemima sa fiksnim mlaznicama na vrhu solarnog modula je fiksiran cevovod sa nekoliko mlaznica iz kojih izlazi voda pri velikim brzinama. Mlazevi vode pogađaju solarni modul i na taj način uklanjaju prašinu sa njegove površine.



Slika 2.4. Sistem sa mlaznicama: 1) solarni modul, 2) cevovod sa mlaznicama

U sistemima sa klizećim mlaznicama cevovod sa mlaznicama se pomera preko celog solarnog modula i na taj način se površina solarnog modula čisti uniformno. U sistemima sa četkom je sistemu sa fiksnim mlaznicama dodata pokretna četka koja može da klizi ili da rotira po površini solarnog modula.

Svi ovi sistemi su potpuno automatizovani i sadrže senzore koji kontrolišu njihov rad (određuju odgovarajuće vreme za čišćenje i odgovarajuću količinu vode koja je potrebna za čišćenje). Ovi sistemi prilikom čišćenja solarnih modula istovremeno vrše i njihovo hlađenje. Usled čišćenja solarnih modula na ovaj način, povećava se njihova efikasnost do 15%. Čišćenje solarnih modula robotizovanim uređajima zahteva velika početna ulaganja i ima velike troškove pri radu.

Čišćenje solarnih modula se može vršiti i korišćenjem vazdušnog kompresora. Vazdušni kompresor oduva prašinu sa solarnih modula pri čemu se neke od čestica prašine podižu u vazduh i lebde iznad solarnih modula, tako da je ovaj način čišćenja pogodan za male sisteme.

Solarni moduli se mogu čistiti i mehaničkim sistemom sa četkicama koji je sličan brisačima vetrobrana na vozilima. Na ovaj način se ne mogu očistiti ptičiji izmet, a ni lepljiva prašina koja se zacementira za površinsko staklo solarnog modula usled visoke vlažnosti.



Slika 2.5. Čišćenje solarnih modula mehaničkim sistemom sa četkicama

Neki proizvođači stakala nude specijalne premaze za zaštitna stakla solarnih modula protiv zaprljanja (anti-soiling coatings). Premazi mogu biti hidrofobni i hidrofilni.

Jedan od najefikasnijih metoda za čišćenje solarnih modula je upotreba samočistećih nano-filmova od super-hidrofilnih supstanci kao što je TiO_2 .



Slika 2.6. Samočisteći premaz (SCHN107TM)

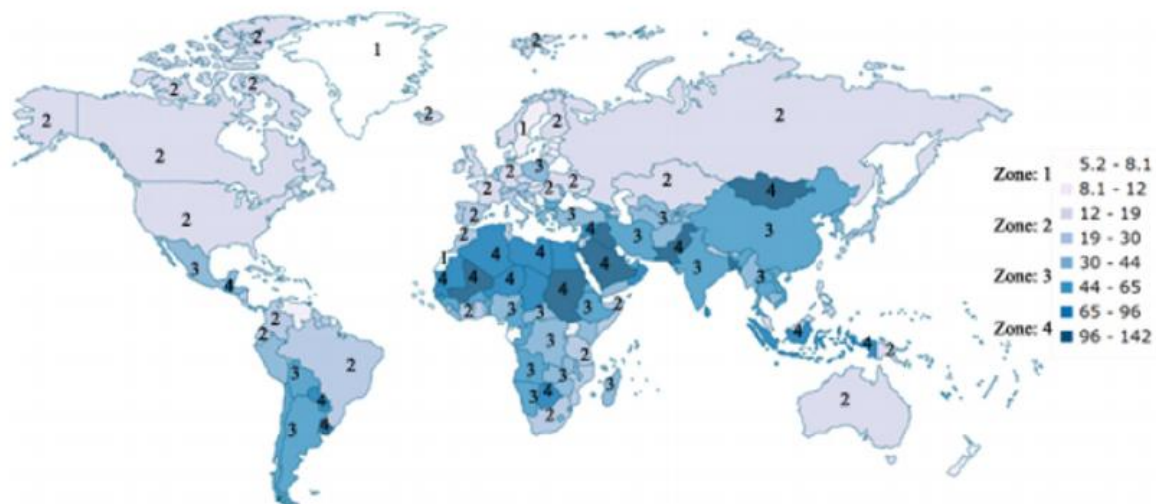
Da bi energetska efikasnost solarnih modula bila što veća, potrebno je da se povremeno čiste kako bi se uklonila nečistoća koja se taloži na njihovim površinama. Postoje opšte

preporuke za odgovarajuće čišćenje i održavanje solarnih modula u zavisnosti od klimatskih uslova u kojima se oni nalaze.

U literaturi se mogu naći različite preporuke o tome koliko često bi trebalo čistiti solarne module.

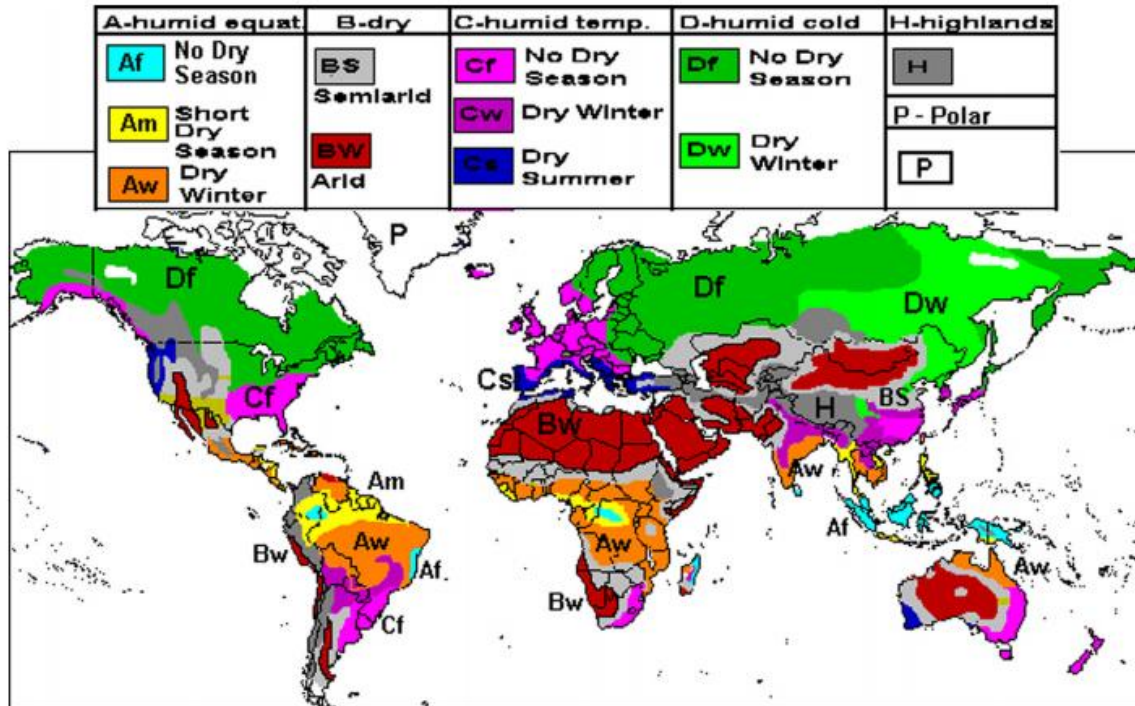
U radu [27] je detaljno objašnjeno koliko često bi trebalo čistiti solarne module u različitim klimatskim oblastima. U oblastima sa vlažnom, vlažno-suvom tropskom, suvom, polusušnom klimom, klimom tajgi i klimom tundri preporučuje se čišćenje solarnih modula jednom nedeljno. U oblastima sa Mediteranskom klimom čišćenje solarnih modula bi trebalo vršiti jednom u toku jedne ili dve nedelje u zavisnosti od brzine taloženja prašine na površinama solarnih modula. U slučaju intenzivnog taloženja prašine, preporučuje se svakodnevno čišćenje solarnih modula. U oblastima sa klimom pašnjaka dovoljno je čistiti solarne module jednom u toku jedne ili dve nedelje, a u delovima u kojima ima više prašine (usled ljudskih aktivnosti) jednom nedeljno. Ukoliko dođe do oluja prašine ili se na površinama solarnih modula formiraju naslage snega, potrebno je odmah nakon toga izvršiti njihovo čišćenje.

Mapa sveta sa označenom koncentracijom čestica prašine u vazduhu sa prečnikom manjim od $10\ \mu\text{m}$, izraženo u $\mu\text{g}/\text{m}^3$, data je na slici 2.7.



Slika 2.7. Mapa sveta sa označenom koncentracijom čestica prašine u vazduhu sa prečnikom manjim od $10\ \mu\text{m}$, izraženo u $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Mapa sveta sa označenim klimatskim zonama data je na slici 2.8.



Slika 2.8. Mapa sveta sa označenim klimatskim zonama

Ukoliko se uporedo razmatraju koncentracija čestica prašine u vazduhu i klimatske karakteristike određene lokacije (slika 2.7. i slika 2.8.) mogu se izvesti zaključci o učestanosti čišćenja solarnih modula u određenim oblastima u svetu (tabela 2.1).

Tabela 2.1. Opšte preporuke o učestanosti čišćenja solarnih modula u različitim oblastima u svetu

Zona sa slike 2.7.	Klimatska zona	Učestanost čišćenja
1	Hladna vlažna	Jedom u šest meseci
2	Umereno vlažna	Jednom u tri meseca
3	Vlažna ekvatorska/tropska	Jednom mesečno
4	Sušna	Jednom nedeljno

Solarne module ne bi trebalo čistiti suviše često da ne bi došlo do oštećenja njihovog zaštitnog stakla [1, 4, 7, 19, 24-28].

Zaštita solarnih modula od ptica

Prema nekim istraživanjima se smatra da je prisustvo ptičijeg izmeta na solarnim modulima i pravljenje gnezda mnogo ozbiljniji problem od prašine. Ptičiji izmet predstavlja organski materijal koji blokira upadno Sunčevo zračenje da dospe do solarnih ćelija solarnog modula i na taj način smanjuje njegove performanse. Delovi solarnih modula prekriveni ptičijim izmetom ostaju u senci (zatamnjeni) sve dok se ne počiste. Metalni ramovi solarnih modula mogu da korodiraju pod dejstvom ptičijeg izmeta. Za sprečavanje ovih problema u praksi se koriste različite metode za zaštitu solarnih modula kao što su: postavljanje zaštitnih mreža, metalnih bodlji, električnih ograda sa strujom, audio sistema za plašenje ptica, itd. u cilju zadržavanja ptica što dalje od solarnih modula. Neke od ovih metoda mogu vremenom da postanu nefunkcionalne zato što ptice mogu da se priviknu na njih [9, 21].

2.3. Pregled istraživanja o uticaju prašine na performanse solarnih modula u svetu

U radovima koji se mogu naći u literaturi dati su rezultati ispitivanja uticaja prašine na performanse solarnih modula. U literaturi se uglavnom mogu naći rezultati istraživanja koja ispituju uticaj zaprljanosti na karakteristike solarnih modula u funkciji vremena izloženosti modula prašini. Ova istraživanja su komparativnog tipa, tj. u njima je vršeno upoređivanje karakteristika čistih i zaprljanih solarnih modula. Uticaj prašine ispitivan je napolju ili u zatvorenom prostoru (unutra). Istraživanja koja se navode u literaturi ispitivala su uticaj prirodne i veštačke prašine. U ovim istraživanjima su korišćene različite vrste prašine i to: ugljenik, cement, kalcijum-karbonat, pepeo, zemlja, pesak, peskovito zemljište, glina, talk, fina i grublja prašina iz vazduha, itd.

Istraživanja o uticaju zaprljanosti solarnih modula prirodnom prašinom (određenog hemijskog sastava) na njihovu energetska efikasnost su korisna za razumevanje odnosa između efekta smanjivanja efikasnosti solarnih modula usled zaprljavanja i hemijskog sastava prašine [1, 7, 9, 12, 16, 17, 19, 27, 29].

Literaturni pregled istraživanja uticaja prašine na performanse solarnih modula vršenih u različitim delovima sveta dat je u tabeli 2.2.

Tabela 2.2. Istraživanja uticaja prašine na performanse solarnih modula vršena u različitim delovima sveta [9]

Referenca	Lokacija	Okruženje	Tip klime (po Köppen-u)	Ugao nagiba, orijentacija solarnih modula	Vreme izloženosti solarnih modula prašini	Mereni parametri solarnih modula na koje utiče prašina	Maksimalno smanjenje merenog parametra (%)
[30]	Berkeley Springs, WV, SAD	Ruralno	Kontinentalna	45°, ka jugu	1 godina	I_{sc}	7-12
[31]	Riyadh, Saudijska Arabija	Urbano	Pustinjska	25°, ka jugu	1 mesec	η	25
[32]	Dhahran, Saudijska Arabija	Urbano	Pustinjska	26°, ka jugu	2 meseca	P_{out}	15
[33]	Pasadena, CA, SAD	Urbano	Meditranska	45°, ka jugu	150 dana	T	37
[34]	Cleveland, OH, SAD	Prigradsko/ industrijsko	Kontinentalna	40°, ka jugu	83 dana	I_{sc}	6-23
	New York, NY, SAD	Urbano	Vlažna suptropska	45°, ka jugu		I_{out}	12-43
[35]	Kuwait, Kuvajt	Urbano	Pustinjska	30°, ka jugu	14 meseci	P_{out}	55
[36]	Riyadh, Saudijska Arabija	Prigradsko	Pustinjska	24,6°, ka jugu	1 godina	Energija η	32 28,6
[37]	Sokoto, Nigerija	Urbano	Vrela polu-sušna	12,5°, ka jugu	4 meseca	P_{max}	60
[38]	Eugene, OR, SAD	Urbano	Umerena	45°, ka jugu	6 godina	I_{sc}	8,4
[39]	Dhahran, Saudijska Arabija	Urbano	Pustinjska	26°, ka jugu	6 meseci	η	60
[40]	Sokoto, Nigerija	Urbano	Vrela polu-sušna	13°, ka jugu 0°	2 nedelje	I_{sc}	4,7 6
[41]	Jodhpur, Indija	Urbano	Polu-sušna	4°-48°, ka jugu	1 godina	I_{sc}	2-17
[42]	Isa Town, Bahrein	Urbano	Pustinjska	0° 26°, ka jugu	2 meseca	I_{sc}	41,4 31
[43]	Morges, Švajcarska	Urbano	Kontinentalna	0°	1 godina	T	22
[44]	Cologne, Nemačka	Urbano	Umereno- oceanska	20°, ka jugu	5 godina	P_{out}	24
[45]	Bern, Švajcarska	Industrijsko	Kontinentalna	20°, ka jugu	4 godine	Energija	10
[46]	Davis, CA, SAD	Prigradsko/ ruralno	Meditranska	18,4°, ka jugu	2 godine	I_{sc}	20
[47]	Tehran, Iran	Urbano, veoma zagađen vazduh	Hladna polu-sušna	45°, ka jugu	8 dana	P_{out}	43

[48]	Minia, Egipat	Urbano	Vrela pustinjska	20°, ka jugu 40°, ka jugu 60°, ka jugu	30 dana	T	21 16 11
[49]	Los Angeles, CA, SAD	Urbano	Meditranska	0°	1 godina	Energija	5,1
[50]	Mountain View, CA, SAD	Urbano	Meditranska	0°	8 meseci	Energija	80
[51]	Kuwait, Kuvajt	Urbano	Pustinjska	30°, ka jugu	1 godina	Energija	25
[52]	Athens, Grčka	Urbano	Meditranska	30°, ka jugu	2 meseca	Energija	6,5
[53]	Arava Valley, Izrael	Ruralno	Pustinjska	30°, ka jugu	2 nedelje	η	8,7
[4]	Mesa, AZ, SAD	Prigradsko	Pustinjska	23°, ka jugu 33°, ka jugu	3 meseca	I_{sc}	3,75 3,4
[54]	Navarra, Španija	Ruralno	Kontinentalna	0°	15 meseci	Energy	7-9
[55]	Abu Dhabi, UAE	Urbano	Pustinjska	25°, ka jugu	18 dana	P_{out} η	13 5,8
[56]	Puglia, Italija	Ruralno	Meditranska	25°, ka jugu	8 nedelja	P_{out}	6,9
[57]	Leuven, Belgija	Urbano	Umerena	60°, ka jugu	4 meseca	T	3
[58]	Dhaka, Bangladeš	Urbano	Tropska	23,5°, ka jugu	1 mesec	I_{sc} P_{out}	33 34
[59]	Dhahran, Saudijska Arabija	Urbano	Pustinjska	30°, ka jugu	1 mesec	P_{out} η	5,9 5,7
[60]	Ogbomoso, Nigerija	Urbano	Tropska	0°	70 dana	P_{out}	13
[61]	Taiyuan, Kina	Urbano	Polu-sušna	45°, ka jugu 0°	2 nedelje	P_{out}	18,2 32,6
[62]	Málaga, Španija	Stambeno/ industrijsko	Suptropska Meditranska	30°, ka jugu	1 godina	Energija	20
[63]	Limassol, Kipar	Urbano	Suptropska Meditranska	31°, ka jugu	10 nedelja	P_{out}	8-15
[64]	Southern Central Valley, CA, SAD	Poljoprivredno Poljoprivredno Ruralno	Pustinjska Sušna Sušna	25°, ka jugu	16 meseci	I_{sc}	8,6 5,0 2,8
[65]	Dhahran, Saudijska Arabija	Urbano	Pustinjska	26°, ka jugu	8 meseci	P_{max}	45,4-49,0
[66]	Málaga, Španija	Stambeno/ industrijsko	Suptropska Meditranska	21°, ka jugu	10 meseci	I_{sc}	12,5
[15]	Dhahran, Saudijska Arabija	Urbano	Pustinjska	26°	45 dana	P_{out} I_{sc}	6 13
[67]	Tripura,		Tropska	23,53°	6 meseci	η	9-13

	Indija						
[68]	Lalitpur, Nepal		Vlažna suptropska	27°	5 meseci	η	29,76
[5]	Taxila, Pakistan	Urbano	Vlažna suptropska	50°, ka jugu	3 meseca	P_{out} η	16-20 3,01-3,55

El-Shobokshy i Hussein [69] su bili među prvima koji su ispitivali uticaj prašine na energetska efikasnost solarnih modula. Oni su vršili istraživanja u laboratorijskim uslovima, tokom kojih su eksperimentalni parametri mogli da budu održavani, mereni i reprodukovani. Svrha njihovog eksperimenta je bila da se istraže fizičke osobine čestica prašine nagomilanih na površinama solarnih modula i da se zatim prouči uticaj prašine na degradaciju performansi solarnih modula. U ovom istraživanju korišćene su tri vrste „laboratorijski-definisane“ prašine koje su često prisutne u atmosferi, i to krečnjak, cement i ugljenik. Laboratorijski eksperiment je izveden korišćenjem volfram-halogenih lampi od 1000 W sa intenzitetom zračenja od oko 195 W/m² na površini modula od monokristalnog silicijuma. El-Shobokshy i Hussein su zaključili da degradacija performansi solarnih modula zavisi od taloženja prašine, od vrste prašine i od raspodele veličine njenih čestica. Gomilanje finije prašine (čestice prašine manjih dimenzija) na površini solarnih modula ima mnogo veći negativni uticaj na njihove performanse nego gomilanje grublje prašine (čestice prašine većih dimenzija). To potiče od činjenice da su čestice finije prašine raspoređene homogenije od čestica grublje prašine tako da je prostor između čestica kroz koji svetlost može da prođe kod finije prašine manji nego kod grublje. Takođe je primećeno da vrsta prašine utiče na performanse solarnih modula. Na primer, čestice ugljenika apsorbiraju Sunčevo zračenje više nego krečnjak i cement [1, 16, 19, 69].

Qasem, Betts i Gottschalg [70] su ispitivali uticaj ugla nagiba na koncentraciju prašine koja se taloži na solarnim modulima od kadmijum-telurida. U istraživanju je utvrđeno da se sa povećanjem ugla nagiba solarnih modula smanjuje koncentracija nataložene prašine na njima, tako da je smanjenje performansi usled zaprljanosti horizontalno postavljenih solarnih modula veće od smanjenja performansi vertikalno postavljenih modula [4, 70].

Mejia i Kleissl [71] su ispitivali uticaj prašine na efikasnost solarnih modula postavljenih pod različitim uglovima nagiba na 186 različitih lokacija u SAD. Mejia i Kleissl su došli do zaključka da je smanjenje performansi solarnih modula postavljenih pod malim uglovima nagiba (manjim od 5°) veće, pri čemu karakteristike lokacije nisu značajne [21, 71].

Qasem, Betts i Gottschalg [72] su ispitivali uticaj ugla nagiba solarnih modula na taloženje prašine na njihovim površinama, a samim tim i na performanse solarnih modula. Solarni moduli su bili postavljeni na otvorenom, u Kuvajtu, pod uglovima nagiba od 0° , 15° , 30° , 45° i 90° , u toku 3 meseca. Zaključili su da se sa povećanjem ugla nagiba solarnih modula smanjuje količina prašine nataložene na njihovim površinama, pri čemu se njihove performanse povećavaju. Pri većim uglovima nagiba solarnih modula (većim od 45°), uticaj prašine na smanjenje njihovih performansi se smanjuje. Najviše prašine se taloži na horizontalno postavljenim solarnim modulima, tako da je smanjenje snage kod horizontalno postavljenih solarnih modula veće nego kod vertikalno postavljenih solarnih modula [21, 72].

Amarnadh, Gupta i Shyam [73] su ispitivali uticaj ugla nagiba na performanse solarnih modula od monokristalnog i polikristalnog silicijuma, postavljenih pod uglovima nagiba od 0° , 30° i 60° na krovu zgrade Tehnološkog instituta u Vellore-i, na jugoistoku Indije, i okrenutih ka jugu, tokom 28 dana. U istraživanju je primećeno da solarni moduli od monokristalnog i polikristalnog silicijuma imaju maksimalnu snagu i maksimalnu efikasnost kada su postavljeni pod uglom od 30° [21, 73].

Cano et al. [74] su ispitivali uticaj prašine nataložene na solarnim modulima postavljenim pod uglovima nagiba od 0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 23° , 30° , 33° i 40° u Mesa-i, u Arizoni, na njihove performanse u toku tri meseca. Pokazalo se da su se performanse solarnih modula postavljenih pod uglom od 0° usled taloženja prašine smanjile za 2%, a solarnih modula postavljenih pod uglovima od 23° i 33° za 1% [21, 74].

Negash i Tadiwose [75] su ispitivali uticaj ugla nagiba solarnih modula postavljenih pod različitim uglovima (0° , 5° , $11,6^\circ$, 15° , $21,5^\circ$, 25° , 30° i 35°) na taloženje prašine na njima i usled taloženja prašine na energiju solarnih modula. Utvrdili su da se energetske gubici povećavaju sa smanjenjem ugla nagiba solarnih modula [21, 75].

Cabanillas i Munguia [76] su ispitivali uticaj prašine na solarne module od monokristalnog, polikristalnog i amornog silicijuma. U istraživanju koje je izvršeno u gradu Hermosillo, u Meksiku, koje je trajalo 90 dana, utvrđeno je da se izlazna snaga solarnih modula od monokristalnog i polikristalnog silicijuma smanjila usled taloženja prašine iz vazduha za 4-7%, a snaga solarnih modula od amornog silicijuma za 8-13% [76, 77].

Jiang, Lu i Sun [78] su ispitivali uticaj prašine na solarne module od monokristalnog, polikristalnog i amornog silicijuma. Zaključili su da se efikasnosti sve tri vrste solarnih ćellija

usled taloženja prašine smanjuju za slične vrednosti. Pokazali su da smanjenje efikasnosti solarnih modula linearno zavisi od gustine nataložene prašine. Pri koncentraciji nataložene prašine od 22 g/m^2 efikasnost solarnih modula se smanjila za 26%. Utvrdili su da taloženje prašine iz vazduha na solarnim modulima izaziva značajno smanjenje struje kratkog spoja, dok je smanjenje napona otvorenog kola beznačajno. Utvrdili su i da na smanjenje performansi solarnih modula najviše utiču velike čestice prašine [77, 78].

Kalogirou, Agathokleous i Panayiotou [63] su istraživali uticaj prašine na karakteristike solarnih modula od monokristalnog, polikristalnog i amornog silicijuma, pri čemu su moduli od monokristalnog i polikristalnog silicijuma bili pokriveni tedlar folijom, a moduli od amornog silicijuma staklom. Oni su utvrdili da zaprljanost solarnih modula manje utiče na solarne module napravljene od amornog silicijuma nego na module napravljene od monokristalnog i polikristalnog silicijuma. Takođe su zaključili da se suva prašina lakše uklanja sa solarnih modula pokrivenih staklom nego folijom, pri čemu je može ukloniti i slab vetar [63, 77].

Touati, Al-Hitmi i Boucheck [79] su, između ostalog, ispitivali uticaj prašine nataložene na solarnim modulima od amornog i monokristalnog silicijuma na njihove performanse u Dohi. Rezultati su pokazali da nataložena prašina više utiče na smanjenje performansi solarnih modula od amornog silicijuma nego na smanjenje performansi solarnih modula od monokristalnog silicijuma [21, 79].

Tanesab et al. [10] su ispitivali uticaj prašine na performanse različitih solarnih modula (dva od monokristalnog, tri od polikristalnog i dva od amornog silicijuma), postavljenih pod uglom nagiba od 32° , okrenutih ka jugu, koji su radili napolju skoro 18 godina u Pertu, u Australiji. Takođe su ispitivali hemijski sastav prašine i veličinu njenih čestica. Prašina koja se nataložila na solarnim modulima sastojala se uglavnom od finih čestica izgrađenih u najvećoj meri od kvarca (SiO_2), zatim kalcijum oksida (CaO) i nešto manjih količina minerala feldspara (KAlSi_3O_8). Kvarc i feldspar su najčešći minerali koji se nalaze u peščarama. Treba uzeti u obzir da se Pert nalazi na pustinjskoj zemlji kojom dominira peskovito zemljište. Prisustvo kalcijum oksida (supstance koja uglavnom potiče iz kalcijum-karbonata ili krečnjaka) u prašini, pripisuje se građevinskim radovima sa cementom u lokalnom okruženju. Od hemijskih elemenata, u prašini koja se nataložila na solarnim modulima najviše je bilo O (34%) i Si (29,14%), zatim Ca (13,21%), Al (9,26%), i manjih količina Fe (8,83%) i K (5,56%). Tanesab et al. su pokazali da prašina ima prilično jedinstven uticaj na smanjenje performansi svih vrsta solarnih modula koje

su ispitivali. Zaključili su da nataložena prašina značajno utiče na I_{sc} i P_{max} pri čemu se njihove izlazne vrednosti smanjuju za od 5% do 10%, i od 8% do 12%, respektivno. Nasuprot tome, U_{oc} i FF su manje osetljivi na prašinu i opadaju za samo 3% [10, 21].

John et al. [80] su, između ostalog, ispitivali uticaj prašine na performanse solarnih modula od amornog silicijuma, kadmijum-telurida, kristalnog silicijuma i CIGS. Prašina najviše utiče na solarne module od amornog silicijuma, zatim na solarne module od kadmijum-telurida, kristalnog silicijuma i CIGS [21, 80].

Ali et al. [5] su ispitivali uticaj prašine na performanse solarnih modula od monokristalnog i polikristalnog silicijuma postavljenih pod uglom nagiba od 50° na krovu zgrade fakulteta u Taxila-i, u Pakistanu, i okrenutih ka jugu, tokom 3 meseca (11 nedelja). Na kraju njihovog istraživanja koncentracija prašine nataložene na površinama solarnih modula iznosila je $0,9867 \text{ mg/cm}^2$. Utvrđeno je da se izlazna snaga solarnih modula od monokristalnog silicijuma u proseku smanjila za 20%, a od polikristalnog silicijuma za oko 16%. Efikasnost solarnih modula od monokristalnog silicijuma se smanjila za 3,55%, a od polikristalnog silicijuma za 3,01%. Može se zaključiti da se usled taloženja prašine performanse solarnih modula od monokristalnog silicijuma više smanjuju od performansi solarnih modula od polikristalnog silicijuma. Prašina iz vazduha koja se nataložila na solarnim modulima sastojala od oko 32% finog peska (prečnik $>0,06 \text{ mm}$), 60% mulja (prečnik $0,002-0,06 \text{ mm}$) i 8% gline (prečnik $<0,002 \text{ mm}$) [5, 21].

Elminir et al. [18] su, između ostalog, ispitivali hemijski sastav prašine i njen uticaj na izlaznu snagu solarnih ćelija u Kairu, u Egiptu. Na osnovu izvršene analize prašine koja se nataložila na solarnim modulima utvrđeno je da se uglavnom sastojala od kvarca i kalcita, a manje od dolomita, minerala gline, itd. U pogledu hemijskih elemenata, u prašini je najviše bilo silicijuma i kalcijuma, a malo aluminijuma, gvožđa, magnezijuma, kalijuma, natrijuma, hlora, cinka, mangana, titanijuma, sumpora, itd. Prisustvo silicijuma u prašini uglavnom se pripisuje eroziji zemljišta i ljudskim aktivnostima pri obrađivanju zemlje. Pojava kalcijuma u prašini se uglavnom pripisuje emitovanju iz industrijskih postrojenja (npr. cementare), a delimično stalnim građevinskim aktivnostima i degradaciji građevinskih elemenata tokom vremena. Smatra se da sumpor dospeva u prašinu iz industrijskih izvora (lokacija na kojoj je prašina sakupljena je veoma industrijalizovana). Prisustvo kalijuma u prašini pripisuje se i prirodnim (iz zemlje) i antropogenim izvorima, dok se male koncentracije hlora i natrijuma mogu pripisati blizini mora.

Pretpostavlja se da su male koncentracije aluminijuma, cinka, mangana, titanijuma i gvožđa dospele u prašinu iz izduvnih gasova u saobraćaju [18].

Kaldellis, Fragos i Kapsali [81] su ispitivali uticaj tri polutanta koji se uglavnom nalaze u vazduhu, crvene zemlje, krečnjaka i čestica pepela, na izlaznu snagu, dobijenu energiju i efikasnost solarnih modula. Ispitivani parametri solarnih modula su se najviše smanjili usled nanošenja čestica crvene zemlje, zatim krečnjaka i najmanje nanošenjem pepela [77, 81].

El-Din et al. [82] su ispitivali uticaj prašine iz vazduha na tankoslojne solarne module postavljene pod uglom od 30° na krovu zgrade jednog fakulteta u Aleksandriji, u Egiptu, i okrenutih ka jugu. Pri koncentraciji prašine na površini solarnih modula od $0,36 \text{ mg/cm}^2$, struja kratkog spoja i efikasnost solarnih modula su se smanjile za 17,7%, dok je smanjenje napona otvorenog kola bilo beznačajno. Oni su pokazali i da je uticaj prašine na performanse tankoslojnih solarnih modula mnogo veći pri oblačnom, nego pri vedrom vremenu. Prašina koja se nataložila na solarnim modulima se uglavnom sastojala od oksida metala (SiO , Al_2O_3 , FeO , Fe_2O_3 , CaO) i karbonata (CaCO_3 , MgCO) koji se inače nalaze u Zemljinoj kori. U pogledu hemijskih elemenata, u prašini je bilo Ca (51,2%), Si (21,4%), Fe (14,4%), Al (5,6%), K (2,9%), Ti (2,6%), S (1,9%), itd. S obzirom na to da se Aleksandrija nalazi u blizini pustinje, prašina je sadržala i teške metale kao što su olovo, gvožđe, arsen, mangan, vanadijum, nikl, hrom, itd. [21, 63, 82].

Adinoyi i Said [65] su ispitivali uticaj taloženja prašine na solarnim modulima na njihovu izlaznu snagu u Saudijskoj Arabiji. U svom eksperimentu su utvrdili da se izlazna snaga solarnih modula smanjila za 20% nakon jedne peščane oluje. Izlazna snaga solarnih modula koji su radili više od šest meseci bez čišćenja smanjila se za skoro 50%. Posmatranjem prašine korišćene u eksperimentu skening elektronskim mikroskopom utvrđeno je da su čestice prašine nepravilnog oblika i da imaju različite dimenzije. Što je veća koncentracija prašine na solarnim modulima, to manje Sunčevog zračenja prolazi kroz površinsko staklo koje prekriva solarne ćelije. EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) analiza prašine korišćene u eksperimentu pokazala je da u njoj ima najviše kiseonika (oko 58%), zatim kalcijuma (oko 13%), ugljenika (oko 10%), sumpora (oko 6%), itd. Sastav prašine najviše zavisi od lokacije i od ljudskih aktivnosti na datoj lokaciji [65, 77].

Kazem et al. [83] su, između ostalog, ispitivali uticaj različitih vrsta prašine na performanse solarnih modula, i to: crvene zemlje, pepela, peska, kalcijum-karbonata i

silicijumskog gela. Rezultati su pokazali da smanjenje snage solarnih modula zavisi od vrste polutanta, kao i od njegove količine na površini solarnog modula. Pokazalo se da na smanjenje performansi solarnih modula najviše utiče pepeo, a zatim crvena zemlja, kalcijum-karbonat, silicijumski gel i pesak, respektivno [21, 83].

Said i Walwil [15] su ispitivali uticaj prašine na performanse solarnih modula od monokristalnog silicijuma pokrivenih staklom, postavljenih napolju pod uglom nagiba od 26° u Dhahran-u, tokom 45 dana, kao i fizičke i hemijske osobine čestica prašine. Utvrdili su da se posle 5 nedelja izloženosti solarnih modula prašini (spoljašnjim uticajima) bez čišćenja njihova izlazna snaga u proseku smanjila za 6%, a struja kratkog spoja za 13%. Pokazali su i da vlaga pospešuje adheziju između čestica prašine i staklene površine. Said i Walwil su zaključili da u prašini ima najviše kiseonika, zatim kalcijuma i silicijuma, a manje sumpora, gvožđa, itd. U prašini se takođe nalaze i magnezijum, natrijum, kalijum, aluminijum, hlor, titanijum, itd. Uočeno je da kalcit i kvarc čine preko 60% prašine. Većina čestica prašine je prečnika manjeg od $2\ \mu\text{m}$, dok je manje većih čestica ($\geq 10\ \mu\text{m}$) koje predstavljaju najveći deo ukupne zapremine, i imaju najveći uticaj na rasejanje upadnog Sunčevog zračenja [15, 21].

Sulaiman et al. [84] su u laboratorijskim uslovima ispitivali uticaj prašine, peska, talka (talcum), mahovine i vode (kapljica vode) na performanse solarnih modula. Izlazna snaga solarnih modula zaprljanih prašinom smanjila se za do 71%, zaprljanih peskom za do 74%, zaprljanih talkom za do 31%, zaprljanih mahovinom za do 86%, i zaprljanih vodom (kapljicama vode) za do 4,6% [21, 84].

Klugmann-Radziemska [11] je proučavala sastav prašine, njeno taloženje na solarim modulima i njen uticaja na performanse solarnih modula. Zaključila je da prašina koja se nalazi u vazduhu predstavlja vrstu aerosola, i da pri visokim koncentracijama može da izazove klimatske promene. Talozenje prašine zavisi od ugla nagiba solarnih modula, klimatskih uslova lokacije, vetra, osobina prašine, itd. Smanjenje efikasnosti solarnih modula linearno zavisi od koncentracije nataložene prašine. Glavne komponente prašine su SiO_2 i Al_2O_3 . Prašina značajno utiče na smanjenje I_{sc} , ali ne utiče na vrednosti U_{oc} . Veće čestice prašine značajnije smanjuju efikasnost solarnih modula [11, 21].

Al-Hasan i Ghoneim [85] su ispitivali uticaj peskovite prašine na efikasnost solarnih modula postavljenih pod uglom od 30° , i okrenutih ka jugu, u Kuvajtu. Utvrdili su da se usled taloženja prašine na solarnim modulima njihova struja kratkog spoja i maksimalna izlazna snaga

manjuju mnogo više od napona otvorenog kola. Smanjenje efikasnosti solarnih modula je linearno zavisno od količine peskovite prašine nataložene na njihovoj površini [16, 85, 86].

Kimber et al. [87] su ispitali uticaj prašine na performanse velikih PV sistema povezanih na elektrodistributivnu mrežu u SAD. U ovom istraživanju su izabrane oblasti sa različitim klimatskim karakteristikama, između ostalih i oblasti u kojima kiša pada samo nekoliko meseci u toku godine i skoro uopšte ne pada tokom leta. Za svaku oblast koja je obuhvaćena ovim istraživanjem je definisan sušni period koji traje od poslednje kiše u sezoni kiša do prve naredne kiše. U oblastima u kojima je kiša padala više od jednom mesečno, energetske gubici usled taloženja prašine na solarnim modulima nisu bili veliki. U Kaliforniji i jugozapadnoj pustinjskoj oblasti SAD su tokom sušnog perioda performanse solarnih modula postepeno opadale. U ovim oblastima je količina kiše potrebna da očisti solarne module veća od 5 l/m^2 , kao što je navedeno u nekim prethodnim istraživanjima. Za solarne module u Severnoj Kaliforniji potrebna je količina kiše od 20 l/m^2 da očisti solarne module. Utvrđeno je da ne postoji određena vrednost količine kiše koja je potrebna da očisti module, tj. da se razlikuje za različite oblasti. Primećeno je da slaba kiša može čak da smanji efikasnost solarnih modula. U ovom istraživanju je utvrđeno da se efikasnost solarnih modula smanjuje za oko 0,2% dnevno tokom sušnog perioda. Na ovaj način, izračunato je da se godišnje gubi od 1,5% do 6,2% energije, u zavisnosti od klimatskih karakteristika [4, 87].

Pavan, Mellit i Pieri [56] su ispitali uticaj prašine na proizvodnju energije dve velike PV elektrane na jugu Italije sa solarnim modulima postavljenim pod uglom od 25° i okrenutim ka jugu. Utvrđeno je da se usled taloženja prašine snaga prve PV elektrane u proseku smanjila za 6,9%, a snaga druge PV elektrane za oko 1,1%. Prva PV elektrana se nalazila na peskovitom zemljištu, a druga na kompaktnijem (sabijenijem) zemljištu, tako da je količina prašine u vazduhu bila veća u oblasti prve elektrane. Takođe su primenjivane i različite metode čišćenja solarnih modula u ove dve PV elektrane. Moduli u prvoj PV elektrani su čišćeni špricanjem destilovane vode pod pritiskom i korišćenjem četke, a u drugoj PV elektrani samo špricanjem. Rezultati ovog istraživanja pokazuju da uticaj zaprljanosti na performanse solarnih modula veoma zavisi od vrste prašine i od načina njihovog čišćenja [4, 56].

Hammond et al. [23] su zaključili da ptičiji izmet predstavlja veći problem za čišćenje solarnih modula od prašine, delimično zbog toga što kiša ne može u potpunosti da ga ukloni [4, 16, 23].

U svim istraživanjima je zaključeno da sve vrste prašine negativno utiču na energetska efikasnost solarnih modula, ali da najveći uticaj imaju pepeo, krečnjak (kalcijum-karbonat), crvena zemlja i pesak (silicijum-dioksid) [1, 12, 19].

Iako se ponekad u istraživanjima koja ispituju uticaj prašine na energetska efikasnost solarnih modula mogu naći kontradiktorni rezultati, ova istraživanja su veoma značajna jer pokazuju da se sastav prašine razlikuje na različitim lokacijama u svetu i da je uticaj prašine na efikasnost solarnih modula takođe različit u različitim delovima sveta, predstavljaju dobru osnovu za dalja, naprednija istraživanja, itd. [16].

U dostupnoj literaturi nema podataka o rezultatima istraživanja uticaja zaprljanosti na performanse solarnih modula u Srbiji. Imajući prethodno u vidu i uvidevši značaj koji se u svetu posvećuje ispitivanjima uticaja zaprljanosti na performanse solarnih modula, u Laboratoriji za solarnu energetiku na Prirodno-matematičkom fakultetu u Nišu u 2015. godini počelo se sa istraživanjima o uticaju zaprljanosti na performanse solarnih modula, i od tada do danas su publikovani sledeći radovi:

- I. Radonjić et al., *Influence of Different Types of Dust on PV Modules Energy Efficiency*, Proceedings of 1st Virtual International Conference on Science, Technology and Management in Energy “*eNergetics 2015*”, Research and Development Center “ALFATEC”, Niš, Serbia, 2015, pp. 94-99.
- I. S. Radonjić et al., *Investigation of solar module energy efficiency depending on their surface soiling degree*, Proceedings of Scientific Conference UNITECH 2016, 18-19 November 2016, Gabrovo, Volume I, pp. 147-151.
- I. S. Radonjić et al., *Investigation of the impact of atmospheric pollutants on solar module energy efficiency*, Thermal Science, Volume 21, No. 5, 2017, pp. 2021-2030.
- I. S. Radonjić et al., *Investigation of the energy efficiency of soiled solar module mounted at the optimal angle*, Proceedings of International Scientific Conference UNITECH 2017, 17-18 November 2017, Gabrovo, Volume I, pp. 84-88.
- I. S. Radonjić, T. M. Pavlović, *Investigation of the energy efficiency of horizontally mounted solar module soiled with CaCO_3* , Facta Universitatis: Series Physics, Chemistry and Technology, Volume 15, No. 2, 2017, pp. 57-69.

LITERATURA

- [1] I. S. Radonjić et al., *Investigation of the impact of atmospheric pollutants on solar module energy efficiency*, Thermal Science, Volume 21, No. 5, 2017, pp. 2021-2030, <http://thermalscience.vinca.rs/pdfs/papers-2016/TSCI160408176R.pdf>
- [2] I. S. Radonjić et al., *Investigation of solar module energy efficiency depending on their surface soiling degree*, Proceedings of Scientific Conference UNITECH 2016, 18-19 November 2016, Gabrovo, Volume I, pp. 147-151.
- [3] I. S. Radonjić, T. M. Pavlović, *Investigation of the energy efficiency of horizontally mounted solar module soiled with CaCO₃*, Facta Universitatis: Series Physics, Chemistry and Technology, Volume 15, No. 2, 2017, pp. 57-69.
- [4] J. Cano, *Photovoltaic Modules: Effect of Tilt Angle on Soiling*, A Thesis Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science in Technology, Arizona State University, 2011.
- [5] H. M. Ali et al., *Effect of Dust Deposition on the Performance of Photovoltaic Modules in Taxila, Pakistan*, Thermal Science, 21 (2017), 2, pp. 915-923.
- [6] M. A. Bashir, et al., *An Experimental Investigation of Performance of Photovoltaic Modules in Pakistan*, Thermal Science, 19 (2015), Suppl. 2, pp. S525-S534.
- [7] G. Picotti et al., *Soiling of solar collectors - Modelling approaches for airborne dust and its interactions with surfaces*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 81, Part 2, January 2018, pp. 2343-2357.
- [8] F. M. Zaihidee et al., *Dust as an unalterable deteriorative factor affecting PV panel's efficiency: Why and how*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 65 (2016) 1267-1278.
- [9] A. Sayyah, M. N. Horenstein, M. K. Mazumder, *Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels*, Solar Energy 107 (2014) 576-604.
- [10] J. Tanesab et al., *The contribution of dust to performance degradation of PV modules in a temperate climate zone*, Solar Energy, 120 (2015) 147-157.
- [11] E. Klugmann-Radziemska, *Degradation of electrical performance of a crystalline photovoltaic module due to dust deposition in northern Poland*, Renewable Energy 78 (2015) 418-426.

- [12] W. Javed et al., *Characterization of dust accumulated on photovoltaic panels in Doha, Qatar*, Solar Energy 142 (2017) 123-135.
- [13] G. B. Hoidale et al., *A study of atmospheric dust*, Atmospheric science laboratory, White Sands Missile Range, New Mexico, 1967.
- [14] C. L. C. Tan et al., *Adhesion of Dust Particles to Common Indoor Surfaces in an Air-Conditioned Environment*, Aerosol Science and Technology, 48, 2014, 541-551.
- [15] S. A. M. Said, H. M. Walwil, *Fundamental studies on dust fouling effects on PV module performance*, Solar Energy 107 (2014) 328-337.
- [16] T. Sarver, A. Al-Qaraghuli, L. L. Kazmerski, *A comprehensive review of the impact of the dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 22 (2013) 698-733.
- [17] Z. A. Darwish et al., *Effect of dust pollutant type on photovoltaic performance*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 41 (2015) 735-744.
- [18] H. K. Elminir et al., *Effect of dust on the transparent cover of solar collectors*, Energy Conversion and Management 47 (2006) 3192-3203.
- [19] **I. Radonjić et al., *Influence of Different Types of Dust on PV Modules Energy Efficiency*, Proceedings of 1st Virtual International Conference on Science, Technology and Management in Energy “eNergetics 2015”, Research and Development Center “ALFATEC”, Niš, Serbia, 2015, pp. 94-99.**
- [20] **I. S. Radonjić et al., *Investigation of the energy efficiency of soiled solar module mounted at the optimal angle*, Proceedings of International Scientific Conference UNITECH 2017, 17-18 November 2017, Gabrovo, Volume I, pp. 84-88.**
- [21] S. C. S. Costa, A. S. A. C. Diniz, L. L. Kazmerski, *Dust and soiling issues and impacts relating to solar energy systems: Literature review update for 2012-2015*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 63 (2016) 33-61.
- [22] A. Otsuka et al., *Measurement of the adhesive force between particles of powdered materials and a glass substrate by means of the impact separation method III: effect of particle shape and surface asperity*, Chemical and Pharmaceutical Bulletin, Volume 36, Issue 2, 1988, 741-749.
- [23] R. Hammond et al., *Effects of soiling on PV module and radiometer performance*, In: Proceedings of the 26th IEEE PVSC, Anaheim, New York, 1997, pp. 1121-1124.

- [24] M. Köntges et al., *Assessment of Photovoltaic Module Failures in the Field*, Report IEA-PVPS T13-09:2017, 2017.
- [25] S. Ghazi, A. Sayigh, K. Ip, *Dust effect on flat surfaces-A review paper*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 33 (2014) 742-751.
- [26] K. A. Moharram et al., *Influence of cleaning using water and surfactants on the performance of photovoltaic panels*, *Energy Conversion and Management* 68 (2013) 266–272.
- [27] M. Mani, R. Pillai, *Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 14, 2010, 3124-3131.
- [28] <http://www2.harpercollege.edu/mhealy/g101ilec/intro/phy/phcli/phclifr.htm>
- [29] S. Mekhilef, R. Saidur, M. Kamalisarvestani, *Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012), 2920-2925.
- [30] C. R. Maag, *Outdoor weathering performance of solar electric generators*, *J. Energy* 1 (6), 1977, 376–381.
- [31] A. A. M. Sayigh, S. Charchafchi, A. Al-Habali, *Experimental evaluation of solar cells in arid zones*, In: *Izmir International Symposium on Solar Energy Fundamentals and Applications*, Izmir, Turkey, 1979, pp. 909–932.
- [32] B. Nimmo, S. A. M. Said, *Effects of dust on the performance of thermal and photovoltaic flat plate collectors in Saudi Arabia-preliminary results*, In: *2nd International Conference on Alternative Energy Sources*, Miami Beach, FL, 1979, pp. 145–152.
- [33] A. R. Hoffman, C. R. Maag, *Photovoltaic Module Soiling Studies May 1978 October 1980*, Tech. Rep. 1012-1049, Department of Energy/Jet Propulsion Laboratory, 1980.
- [34] A. R. Hoffman, C. R. Maag, *Airborne particulate soiling of terrestrial photovoltaic modules and cover materials*, In: *26th Annual Technical Meeting of Institute of Environmental Sciences*, 12–14 May, Philadelphia, PA, 1980, pp. 229–236.
- [35] H. Al-Busairi, A. Al-Kandari, *Performance evaluation of photovoltaic modules in Kuwait*, In: *3rd International Photovoltaic Science and Engineering Conference*, Tokyo, Japan, 1987, pp. 323–326.
- [36] A. A. Salim, F. S. Huraib, N. N. Eugenio, *PV power-study of system options and*

- optimization*, In: 8th International Photovoltaic Solar Energy Conference. Florence, Italy, 1988, pp. 688–692.
- [37] S. C. Bajpai, R. C. Gupta, *Performance of silicon solar cells under hot & dusty environmental conditions*, Indian Journal of Pure and Applied Physics, 26, 1988, 364–369.
- [38] C. P. Ryan, F. Vignola, D. K. McDaniels, *Solar cell arrays: degradation due to dirt*, In: American Section of the International Solar Energy Society. Denver, CO, 1989, pp. 234–237.
- [39] S. A. M. Said, *Effects of dust accumulation on performances of thermal and photovoltaic flat-plate collectors*, Applied Energy 37 (1), 1990, 73–84.
- [40] H. N. Yahya, A. S. Sambo, *The effect of dust on the performance of photovoltaic modules in Sokoto, Niger*. J. Renew. Energy 2 (1), 1991, 36–42.
- [41] P. C. Pande, *Effect of dust on the performance of PV panels*, In: 6th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, New Delhi, India, 1992, pp. 539–542.
- [42] A. K. Som, S. M. Al-Alawi, *Evaluation of efficiency and degradation of mono- and polycrystalline PV modules under outdoor conditions*, Renewable Energy 2 (1), 1992, 85–91.
- [43] J. Bonvin, *Dirt deposit level measurements on different glass type in various surroundings*, In: 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 23–25 October, Nice, France, 1995, pp. 740–742.
- [44] H. Becker, W. Vaassen, W. Hermann, *Reduced output of solar generators due to pollution*, In: 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 30 June–4 July, Barcelona, Spain, 1997, pp. 251–255.
- [45] H. Haeberlin, J. D. Graf, *Gradual reduction of PV generator yield due to pollution*, In: 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, 6–10 July 1998, Vienna, Austria, pp. 1–4.
- [46] T. U. Townsend, P. A. Hutchinson, *Soiling analysis at PVUSA*, In: Solar 2000 Conference, 16–21 June, Madison, WI, 2000, pp. 417–420.
- [47] E. Asl-Soleimani, S. Farhangi, M. S. Zabihi, *The effect of tilt angle, air pollution on performance of photovoltaic systems in Tehran*, Renewable Energy 24 (3-4), 2001, 459–468.

- [48] A. A. Hegazy, *Effect of dust accumulation on solar transmittance through glass covers of plate-type collectors*, *Renewable Energy* 22 (4), 2001, 525–540.
- [49] A. Kimber, *The effect of soiling on photovoltaic systems located in arid climates*, In: 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 3–7 September, Milan, Italy, 2007, pp. 3023–3026.
- [50] W. Lam et al., *Getting the Most Energy Out of Googl's Solar Panels*, 2009, https://docs.google.com/present/view?id=dfhw7d9z_0gtk9bsgc
- [51] H. A. AlBusairi, H. J. Möller, *Performance evaluation of CdTe PV modules under natural outdoor conditions in Kuwait*, In: 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition/5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 6–10 September, Valencia, Spain, 2010, pp. 3468–3470.
- [52] J. K. Kaldellis, A. Kokala, *Quantifying the decrease of the photovoltaic panels' energy yield due to phenomena of natural air pollution disposal*, *Energy* 35 (12), 2010, 4862–4869.
- [53] E. Boykiw, *The Effect of Settling Dust in the Arava Valley on the Performance of Solar Photovoltaic Panels*, Senior thesis, Allegheny College, Meadville, PA, 2011.
- [54] M. García et al., *Soiling and other optical losses in solar-tracking PV plants in Navarra*, *Progress in Photovoltaics Research and Applications* 19 (2), 2011, 211–217.
- [55] T. A. Hanai et al., *Environmental effects on a grid connected 900W photovoltaic thin-film amorphous silicon system*, *Renewable Energy* 36 (10), 2011, 2615–2622.
- [56] M. A. Pavan, A. Mellit, D. D. Pieri, *The effect of soiling on energy production for large-scale photovoltaic plants*, *Solar Energy* 85 (5), 2011, 1128–1136.
- [57] R. Appels et al., *The effect of dust deposition on photovoltaic modules*, In: 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 3–8 June, Austin, TX, 2012, pp. 001886–001889.
- [58] M. M. Rahman et al., *Effects of natural dust on the performance of PV panels in Bangladesh*, *International Journal of Modern Education and Computer Science*, 4 (10), 2012, 26–32.
- [59] S. Rehman, I. El-Amin, *Performance evaluation of an off-grid photovoltaic system in Saudi Arabia*, *Energy* 46 (1), 2012, 451–458.
- [60] Y. K. Sanusi, *The performance of amorphous silicon PV system under Harmattan dust*

- conditions in a tropical area*, The Pacific Journal of Science and Technology, Volume 13, Number 1, 2012, 168–175.
- [61] L. Liqun, L. Zhiqi, S. Z. L. Chunxia, *Degraded output characteristic at atmospheric air pollution and economy analysis of PV power system: a case study*, Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review) 88 (9A), 2012, 281–284.
- [62] J. Zorrilla-Casanova et al., *Losses produced by soiling in the incoming radiation to photovoltaic modules*, Progress in Photovoltaics Research and Applications 21 (4), 2013, 790–796.
- [63] S. A. Kalogirou, R. Agathokleous, G. Panayiotou, *On-site PV characterization and the effect of soiling on their performance*, Energy 51, 2013, 439–446.
- [64] J. R. Caron, B. Littmann, *Direct monitoring of energy lost due to soiling on first solar modules in California*, IEEE Journal of Photovoltaics 3 (1), 2013, 336–340.
- [65] M. J. Adinoyi, S. A. Said, *Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules*, Renewable Energy 60, 2013, 633–636.
- [66] M. Piliouguine et al., *Comparative analysis of energy produced by photovoltaic modules with anti-soiling coated surface in arid climates*, Applied Energy 112, 2013, 626–634.
- [67] T. Bhattacharya, A. K. Chakraborty, K. Pal, *Influence of Environmental Dust on the Operating Characteristics of the Solar PV Module in Tripura, India*, International Journal of Engineering Research, Volume 4, Issue 3, pp. 141–144.
- [68] B. R. Paudyal, S. R. Shakya, *Dust accumulation effects on efficiency of solar PV modules for off grid purpose: A case study of Kathmandu*, Solar Energy 135 (2016), pp. 103-110.
- [69] M. S. El-Shobokshy, F. M. Hussein, *Effect of dust with different physical properties on the performance of photovoltaic cells*, Solar Energy, Vol. 51, 1993, pp. 505-511.
- [70] H. Qasem, T. R. Betts, R. Gottschalg, *Effect of shading caused by dust on cadmium telluride photovoltaic modules*, Loughborough University, Leicestershire, LE11 3TU, UK, 2011.
- [71] F. A. Mejia, J. Kleissl, *Soiling losses for solar photovoltaic systems in California*, Solar Energy, Volume 95, September 2013, pp. 357–363.
- [72] H. Qasem, T. R. Betts, R. Gottschalg, *Spatially-resolved modelling of dust effect on cadmium telluride photovoltaic modules*, Solar Energy, Volume 90, April 2013, pp. 154–163.

- [73] G. T. Amarnadh, A. Gupta, V. B. Shyam, *Investigation of the effects of dust accumulation, and performance for mono and poly crystalline silica modules*, International Journal of Renewable Energy Research, Volume 4, No. 3, 2014, pp. 628-634.
- [74] J. Cano et al., *Effect of tilt angle on soiling of photovoltaic modules*, In: Proceedings of the 40th IEEE photovoltaic specialist conference, NY, IEEE, 2014, pp.3174–3176.
- [75] T. Negash, T. Tadiwose, *Experimental investigation of the effect of tilt angle on the dust photovoltaic module*, International Journal of Energy and Power Engineering, Volume 4, No. 4, 2015, pp. 227–231.
- [76] R. E. Cabanillas, H. Munguia, *Dust accumulation effect on efficiency of Si photovoltaic modules*, Journal of Renewable and Sustainable Energy 3 (2011) 043114-043121.
- [77] Y. Guan et al., *In-situ investigation of the effect of dust deposition on the performance of polycrystalline silicon photovoltaic modules*, Renewable Energy 101 (2017) 1273-1284.
- [78] H. Jiang, L. Lu, K. Sun, *Experimental investigation of the impact of airborne dust deposition on the performance of solar photovoltaic (PV) modules*, Atmospheric Environment, Volume 45, Issue 25, 2011, pp. 4299-4304.
- [79] F. A. Touati, M. A. Al-Hitmi, H. J. Boucheck, *Study of the effects of dust, relative humidity, and temperature on solar PV performance in Doha: comparison between monocrystalline and amorphous PVS*, International Journal of Green Energy, Volume 10, Issue 7, 2013, 680–689.
- [80] J. J. John, et al., *Study of soiling loss on photovoltaic modules with artificially deposited dust of different gravimetric densities and compositions collected from different locations in India*, In: Proceedings of the 42nd IEEE PVSC-New Orleans, IEEE, NewYork, 2015, pp. 236–243.
- [81] J. K. Kaldellis, P. Fragos, M. Kapsali, *Systematic experimental study of the pollution deposition impact on the energy yield of photovoltaic installations*, Renewable Energy, Volume 36, Issue 10, 2011, pp. 2717-2724.
- [82] A. M. A. M. S. El-Din et al., *Effect of dust deposition on performance of thin film photovoltaic module in harsh humid climate*, In: Proceedings of the 2013 international conference on renewable energy research and applications (ICRERA), 2013, pp. 674–679.
- [83] H. A. Kazem et al., *Effect of dust deposition on the performance of multi-crystalline*

- photovoltaic modules based on experimental measurements*, International Journal of Renewable Energy Research, 2013, Volume 3, Issue 4, 850–853.
- [84] S. A. Sulaiman et al., *Influence of dirt accumulation on performance of PV panels*, Energy Procedia 50 (2014), 50–56.
- [85] A. Y. Al-Hasan, A. A. Ghoneim, *A new correlation between photovoltaic panel's efficiency and amount of sand dust accumulated on their surface*, International Journal of Sustainable Energy, Volume 24, No. 4, December 2005, pp. 187-197.
- [86] <https://documents.tips/documents/a-new-correlation-between-photovoltaic-panels-efficiency-and-amount-of-sand.html>
- [87] A. Kimber et al., *The effect of soiling on large grid-connected photovoltaic systems in California and the Southwest region of the United States*, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2, 2006, pp. 2391-2395.

TREĆE POGLAVLJE

REZULTATI EKSPERIMENTALNOG ODREĐIVANJA ENERGETSKE EFIKASNOSTI SOLARNIH MODULA U ZAVISNOSTI OD NJIHOVE ZAPRLJANOSTI U REALNIM KLIMATSKIM USLOVIMA U NIŠU

3.1. Eksperiment

3.1.1. Eksperimentalni uređaji

Eksperiment je urađen u Laboratoriji za solarnu energetiku na Prirodno-matematičkom fakultetu u Nišu, u Srbiji. Za određivanje energetske efikasnosti solarnih modula u zavisnosti od njihove zaprljanosti u realnim klimatskim uslovima napravljen je solarni sistem prikazan na slici 3.1.



Slika 3.1. Solarni sistem od šest istih solarnih modula

Solarni sistem se sastoji od metalnog postolja na koje je postavljeno šest fotonaponskih solarnih modula ISF-60/12 od monokristalnog silicijuma, pojedinačne snage 60 W i površine 0,514 m² (Isofoton, Španija). Po dva solarna modula su postavljena jedan pored drugog i to su dva modula postavljena vertikalno, dva horizontalno i dva pod optimalnim uglom za područje Niša od 32°. Svi solarni moduli su okrenuti ka jugu. Eksperimentalni sistem postavljen je na krovu fakulteta tako da tokom cele godine okolni objekti ne stvaraju senku.

Tabela 3.1. Tehničke karakteristike solarnog modula ISF-60/12

Spoljne dimenzije	776 x 662 x 39,5 mm
Težina	6,5 kg
Tip solarne ćelije	Monokristalni silicijum
Snaga solarnog modula	60 Wp
Efikasnost	11%
Struja maksimalne snage	3,47 A
Napon maksimalne snage	17,3 V
Napon otvorenog kola	21,6
NOCT (800 W/m ² , 20°C, AM 1,5, 1 m/s)	47°C

Izvor čadi



Slika 3.2. (a) Solarni sistem na krovu Prirodno-matematičkog fakulteta u Nišu, (b) dimnjak na Prirodno-matematičkom fakultetu u Nišu

Izvor čadi koja je korišćena za ispitivanje energetske efikasnosti solarnih modula u zavisnosti od njihove zaprljanosti nataloženom čađi jeste dim iz kotlarnice na Prirodno-matematičkom fakultetu u Nišu. Kotlarnica se nalazi u podrumu Prirodno-matematičkog fakulteta, ima tri kotla od po 2300 kW i kao gorivo koristi mazut. Dim iz kotlarnice izlazi u atmosferu kroz dimnjak koji je 12 m udaljen od solarnih modula. Kotlarnica radi od 15. oktobra do 15. aprila.

3.1.1.1. Merna oprema

Meteorološka stanica

Za praćenje meteoroloških parametara korišćeni su podaci iz Meteorološke stanice u Nišu (slika 3.3.) i iz automatske meteorološke stanice DAVIS Vantage Pro (SAD) koja se nalazi na Prirodno-matematičkom fakultetu u Nišu (slika 3.4.).



Slika 3.3. Meteorološka stanica u Nišu



Slika 3.4. Automatska meteorološka stanica DAVIS Vantage Pro na Prirodno-matematičkom fakultetu u Nišu

Akvizicija meteoroloških parametara dobijenih pomoću meteorološke stanice DAVIS Vantage Pro vršena je pomoću računara na svakih deset minuta. Pomoću meteorološke stanice DAVIS Vantage Pro neprekidno su mereni i registrovani sledeći meteorološki parametri: temperatura vazduha, intenzitet Sunčevog zračenja, energija Sunčevog zračenja, pritisak, vlažnost vazduha, brzina i pravac vetra.

Tabela 3.2. Tehničke karakteristike meteorološke stanice DAVIS Vantage Pro

Merena veličina	Rezolucija	Merni opseg	Nominalna preciznost
Intenzitet Sunčevog zračenja	1 W/m ²	od 0 W/m ² do 1800 W/m ²	5% mernog opsega
Temperatura ambijenta	0,1°C	od -40°C do 65°C	±0,5°C do 43°C
Relativna vlažnost vazduha	1%	od 1% do 100%	±2%

PV-KLA i MINI-KLA uređaji

Za snimanje strujno-naponskih karakteristika (I-U karakteristika) fotonaponskih solarnih modula korišćeni su PV-KLA i Mini-KLA uređaji (Ingenieurburo Mencke&Tegtmeyer, Nemačka) prikazani na slikama 3.5. i 3.6. Pomoću PV-KLA i Mini-KLA uređaja vršeno je merenje napona otvorenog kola (U_{oc}), struje kratkog spoja (I_{sc}), nominalne snage (P_{mpp}), nominalne struje (I_{mpp}), nominalnog napona (U_{mpp}) i fil faktor (FF) solarnih modula.



Slika 3.5. PV-KLA uređaj, Ingenieurburo Mencke&Tegtmeyer, Nemačka



Slika 3.6. Mini-KLA uređaj, Ingenieurburo Mencke&Tegtmeyer, Nemačka

SolarUsbSW uređaj

Kompjuterski kontrolisan uređaj SolarUsbSW (MetteringSolutions, BiH) omogućava konekciju i sinhronizaciju mernih ciklusa. Kompjuterski softver SolarControlM (MetteringSolutions, BiH) kontroliše SolarUsbSW uređaj i vrši automatski monitoring, kontrolu i pamćenje podataka, kao i slanje obaveštenja u slučaju nepredviđenog prekida merenja.



Slika 3.7. SolarUsbSW uređaj, MetteringSolutions, BiH

Snimanje strujno-naponskih karakteristika

U Laboratoriji za solarnu energetiku je postavljena merna tabla koja je odgovarajućim provodnicima povezana sa svakim solarnim modulom pojedinačno. Na tabli se nalaze po dva izvoda za svaki solarni modul (slika 3.8).



Slika 3.8. Merna tabla sa odgovarajućim električnim izvodima

Snimanje strujno-naponskih karakteristika solarnih modula pomoću PV-KLA uređaja vršeno je na svakih 10 minuta u određenom periodu u toku dana. Snimanja su automatizovana pomoću SolarUsbSW uređaja i SolarControlM interfejsa, specijalno napravljenih za ovu namenu. Svaki par izvoda povezan je preko SolarUsbSW uređaja sa PV-KLA uređajem i kompjuterom.

Snimanje strujno-naponskih karakteristika solarnih modula pomoću Mini-KLA uređaja je vršeno na svakih 10 minuta u određenom periodu u toku dana. Priključivanjem Mini-KLA uređaja na odgovarajući par izvoda snimane su trenutne karakteristike solarnih modula. Promenom parova izvoda skoro istovremeno su snimane karakteristike svih šest modula. Za eksperimentalna merenja pomoću Mini-KLA uređaja merni opseg napona bio je 0-30 V, a merni opseg struje 0-4 A. Preciznost Mini-KLA uređaja je $\pm 0,4\%$ mernog opsega. Kada je intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na površinu orijentisanu kao i solarni modul manji od 120

W/m^2 (odnosno 60 W na površini solarnog modula) napon na solarnim modulima je nedovoljan da bi se izvršilo snimanje strujno-naponskih karakteristika pomoću Mini-KLA uređaja.

Skening elektronski mikroskop

Za posmatranje čestica ugljenika, kalcijum-karbonata, zemljišta i čađi korišćen je skening elektronski mikroskop JEOL JSM-5300 (Japan) koji se nalazi na Medicinskom fakultetu u Nišu (slika 3.9).



Slika 3.9. Skening elektronski mikroskop JEOL JSM-5300

3.1.1.2. Metodologija merenja

U eksperimentu je radi upoređivanja karakteristika čistih i zaprljanih solarnih modula vršeno merenje strujno-naponskih karakteristika i parametara šest solarnih modula. U toku grejne sezone 2016/2017. ispitivan je uticaj čađi iz dimnjaka kotlarnice na energetske efikasnosti solarnih modula. U drugom delu godine (2016. i 2017.) ispitivan je uticaj drugih polutanata na energetske efikasnosti solarnih modula (ugljenika, kalcijum-karbonata i čestica zemljišta) pri čemu su polutanti nanošeni na module rasprašivanjem iz vodenog rastvora.

Pomoću automatske meteorološke stanice DAVIS Vantage Pro meren je intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na horizontalnu površinu. U okviru eksperimenta nisu merene vrednosti intenziteta Sunčevog zračenja koje dospeva na vertikalno postavljenu površinu i

površinu postavljenu pod optimalnim uglom. Za izračunavanje energije globalnog Sunčevog zračenja koje je u toku dana dospelo na površinu orijentisanu ka jugu i postavljenu pod optimalnim uglom u odnosu na horizontalnu ravan, i vertikalnu površinu orijentisanu orijentisanu ka jugu, korišćeni su izrazi za izračunavanje intenziteta Sunčevog zračenja koje dospeva na površine orijentisane ka jugu i postavljene pod nekim uglom u odnosu na horizontalnu površinu (izrazi (1.1)-(1.3)).

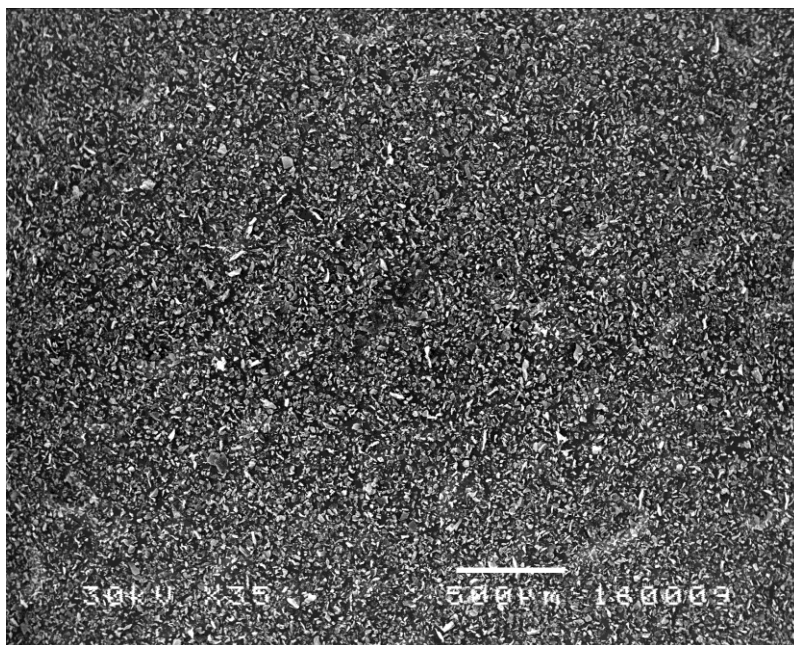
3.2. Rezultati ispitivanja energetske efikasnosti solarnih modula u zavisnosti od njihove zaprljanosti ugljenikom

Dana 03.10.2017. godine ispitivan je uticaj različitih masa ugljenika na energetske efikasnost solarnih modula postavljenih pod uglovima od 0° , 32° i 90° u odnosu na horizontalnu ravan.

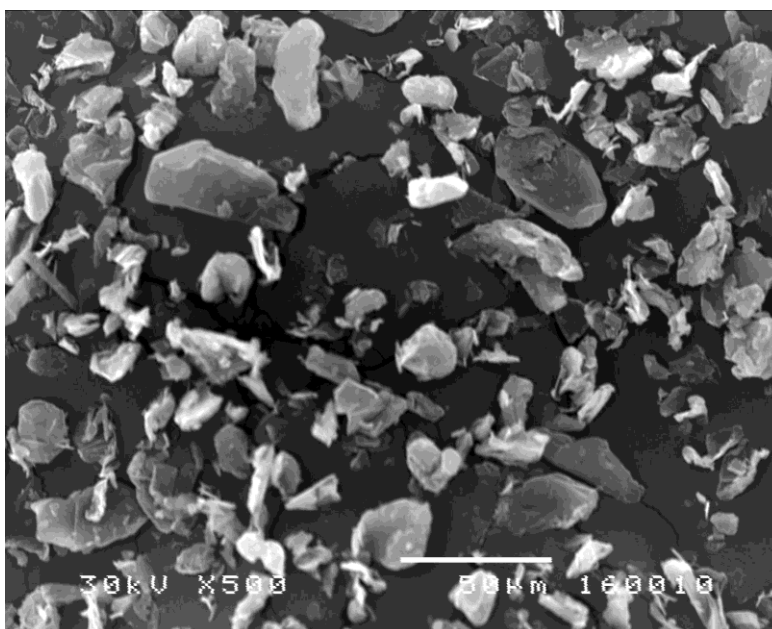
Na dan merenja, 03.10.2017. godine, prvo je očišćeno svih šest solarnih modula kako bi se sa njih uklonila sva nečistoća. Tokom merenja solarni moduli 4, 5 i 6 su sve vreme bili čisti i nisu se zaprljavali. Moduli 1, 2 i 3 su uniformno zaprljavani rasprašivanjem određene količine vode koja sadrži 1 g ugljenika nakon čega je u 12:40 h izvršeno prvo merenje. Površina svakog solarnog modula iznosi $S=0,514 \text{ m}^2$ pa je koncentracija ugljenika na svakom zaprljanom solarnom modulu pre prvog merenja iznosila $1,945 \text{ g/m}^2$. Nakon izvršenog prvog merenja su moduli 1, 2 i 3 dodatno uniformno zaprljani rasprašivanjem određene količine vode koja sadrži 1 g ugljenika, tako da je koncentracija ugljenika na zaprljanim solarnim modulima (1, 2 i 3) pre drugog merenja iznosila $3,891 \text{ g/m}^2$, i u 13:00 h je izvršeno drugo merenje. Posle izvršenog drugog merenja su moduli 1, 2 i 3 dodatno uniformno zaprljani rasprašivanjem određene količine vode koja sadrži 1,3 g ugljenika, tako da je koncentracija ugljenika na zaprljanim solarnim modulima pre trećeg merenja iznosila $6,420 \text{ g/m}^2$, i u 13:30 h je izvršeno treće merenje.

3.2.1. Rezultati SEM ispitivanja ugljenika

SEM fotografije čestica ugljenika korišćenih u eksperimentu pri različitim uvećanjima date su na slikama 3.10. i 3.11.



Slika 3.10. SEM fotografija čestica ugljenika pri uvećanju od 35 puta



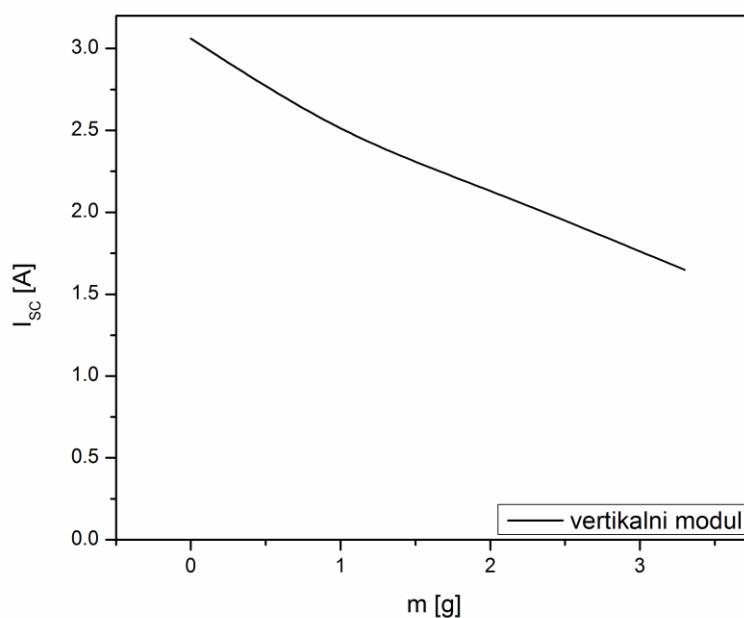
Slika 3.11. SEM fotografija čestica ugljenika pri uvećanju od 500 puta

Na slici 3.10. se vidi da su čestice ugljenika raspoređene homogeno i gusto tako da je prostor između čestica kroz koji svetlost može da prođe veoma mali. Na slici 3.11. se vidi da čestice ugljenika imaju listastu strukturu, male su debljine i imaju prečnik oko 30 µm.

3.2.2. Rezultati merenja struje kratkog spoja čistih i ugljenikom zaprljanih solarnih modula postavljenih pod različitim uglovima u Nišu

Vertikalni modul

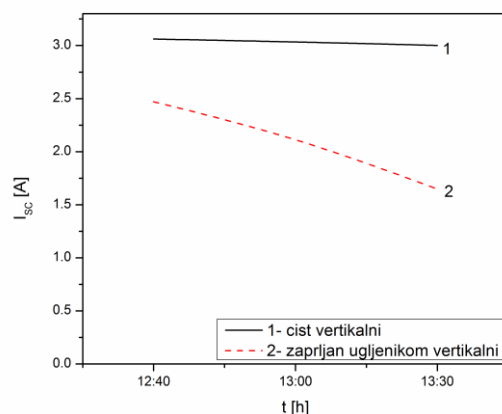
Zavisnost struje kratkog spoja (I_{sc}) od zaprljanosti površine vertikalno postavljenog solarnog modula različitim masama ugljenika data je na slici 3.12.



Slika 3.12. Zavisnost I_{sc} od zaprljanosti površine vertikalno postavljenog solarnog modula različitim masama ugljenika

Na slici 3.12. se vidi da se kod vertikalno postavljenog solarnog modula vrednosti I_{sc} smanjuju od 3,06 A za čist, do 1,65 A za modul zaprljan sa 3,3 g ugljenika.

Uporedni prikaz I_{sc} za čist (1) i ugljenikom zaprljan (2) vertikalni solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.13.

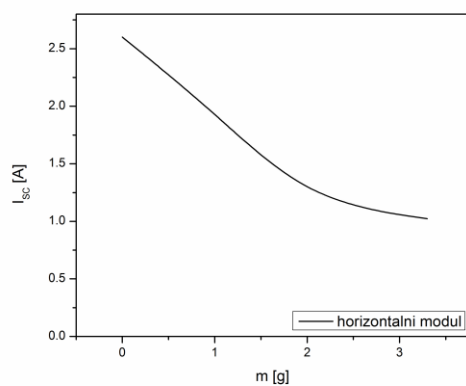


Slika 3.13. Uporedni prikaz I_{sc} za čist (1) i ugljenikom zaprljan (2) vertikalni solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.13. se vidi da se kod vertikalno postavljenih solarnih modula vrednosti I_{sc} kreću od 3,06 A do 3,00 A za čist, i od 2,47 A do 1,65 A za modul zaprljan različitim masama ugljenika.

Horizontalni modul

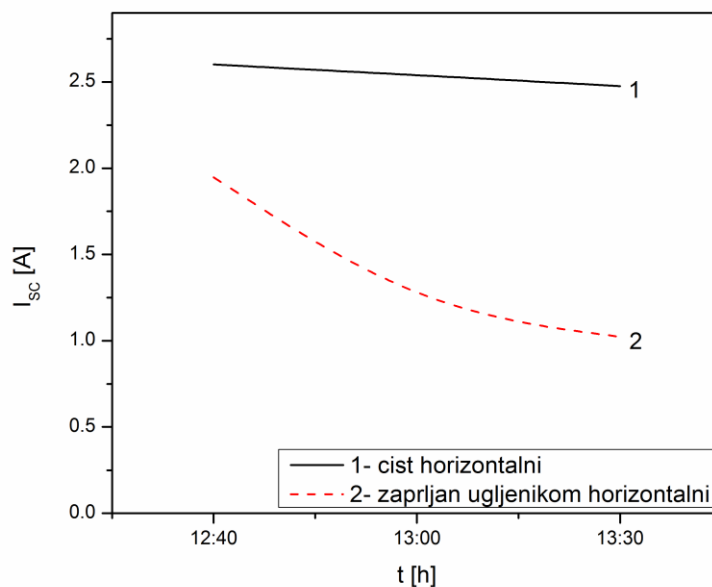
Zavisnost I_{sc} od zaprljanosti površine horizontalno postavljenog solarnog modula različitim masama ugljenika data je na slici 3.14.



Slika 3.14. Zavisnost I_{sc} od zaprljanosti površine horizontalno postavljenog solarnog modula različitim masama ugljenika

Na slici 3.14. se vidi da se kod horizontalno postavljenog solarnog modula vrednosti I_{sc} smanjuju od 2,60 A za čist, do 1,02 A za modul zaprljan sa 3,3 g ugljenika.

Uporedni prikaz I_{sc} za čist (1) i ugljenikom zaprljan (2) horizontalni solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.15.

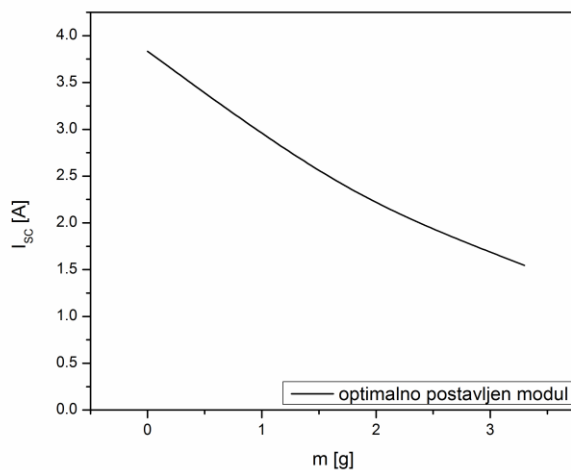


Slika 3.15. Uporedni prikaz I_{sc} za čist (1) i ugljenikom zaprljan (2) horizontalni solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.15. se vidi da se kod horizontalno postavljenih solarnih modula vrednosti I_{sc} kreću od 2,60 A do 2,48 A za čist, i od 1,95 A do 1,02 A za modul zaprljan različitim masama ugljenika.

Optimalno postavljen modul

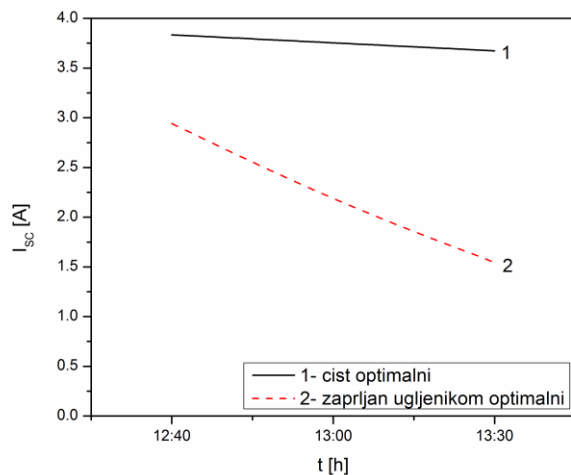
Zavisnost I_{sc} od zaprljanosti površine optimalno postavljenog solarnog modula različitim masama ugljenika data je na slici 3.16.



Slika 3.16. Zavisnost I_{sc} od zaprljanosti površine optimalno postavljenog solarnog modula različitim masama ugljenika

Na slici 3.16. se vidi da se kod optimalno postavljenog solarnog modula vrednosti I_{sc} smanjuju od 3,83 A za čist, do 1,55 A za modul zaprljan sa 3,3 g ugljenika.

Uporedni prikaz I_{sc} za čist (1) i ugljenikom zaprljan (2) optimalno postavljen solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.17.

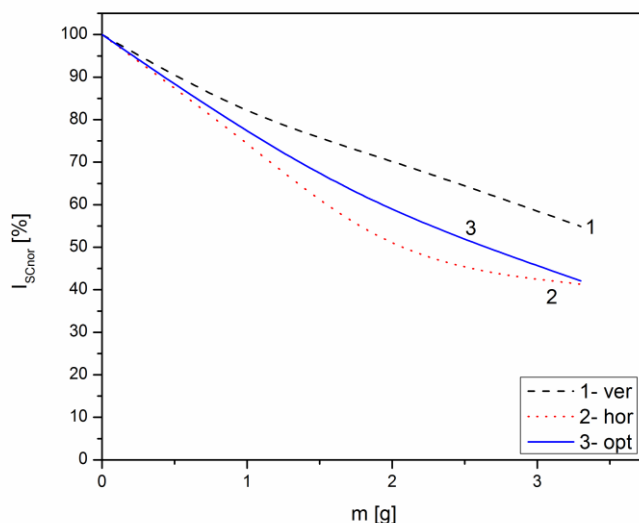


Slika 3.17. Uporedni prikaz I_{sc} za čist (1) i ugljenikom zaprljan (2) optimalno postavljen solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.17. se vidi da se kod optimalno postavljenih solarnih modula vrednosti I_{sc} kreću od 3,83 A do 3,67 A za čist, i od 2,94 A do 1,55 A za modul zaprljan različitim masama ugljenika.

Uporedni prikaz

Zavisnost normalizovane struje kratkog spoja vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula od zaprljanosti njihove površine različitim masama ugljenika data je na slici 3.18.



Slika 3.18. Zavisnost normalizovane struje kratkog spoja vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula od zaprljanosti njihove površine različitim masama ugljenika

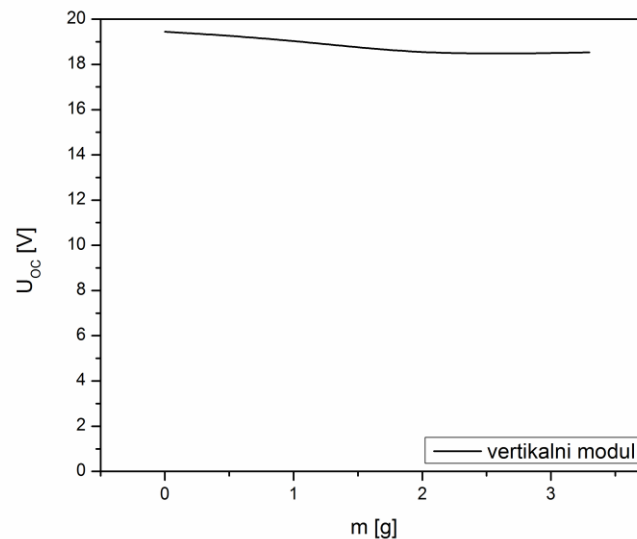
Na slici 3.18. se vidi da se struje kratkog spoja vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula smanjuju sa povećanjem mase nanetog ugljenika. Usled zaprljavanja solarnih modula, intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na njihovu površinu se smanjuje, tako da se smanjuje i struja kratkog spoja solarnih modula. U periodu merenja je intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na horizontalne solarne module bio manji od intenziteta Sunčevog zračenja koje dospeva na optimalno postavljene i vertikalne solarne

module. Zbog toga je smanjenje struje kratkog spoja usled zaprljanja ugljenikom najveće kod horizontalno postavljenog modula.

3.2.3. Rezultati merenja napona otvorenog kola čistih i ugljenikom zaprljanih solarnih modula postavljenih pod različitim uglovima u Nišu

Vertikalni modul

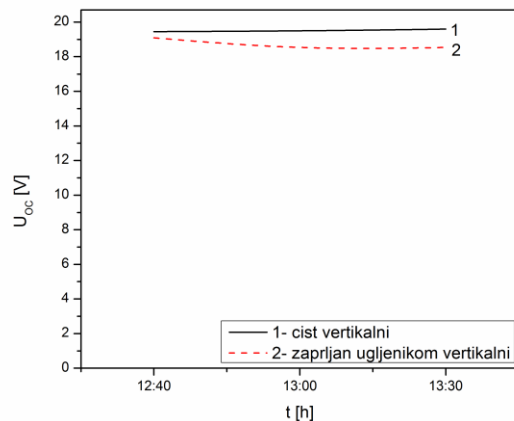
Zavisnost napona otvorenog kola (U_{oc}) od zaprljanosti površine vertikalno postavljenog solarnog modula različitim masama ugljenika data je na slici 3.19.



Slika 3.19. Zavisnost U_{oc} od zaprljanosti površine vertikalno postavljenog solarnog modula različitim masama ugljenika

Na slici 3.19. se vidi da se kod vertikalno postavljenog solarnog modula vrednosti U_{oc} smanjuju od 19,4 V za čist, do 18,5 V za modul zaprljan sa 3,3 g ugljenika.

Uporedni prikaz U_{oc} za čist (1) i ugljenikom zaprljan (2) vertikalni solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.20.

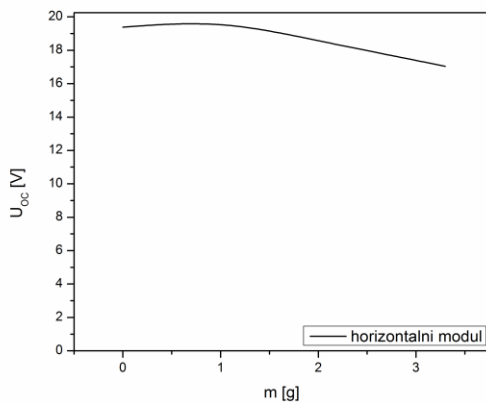


Slika 3.20. Uporedni prikaz U_{oc} za čist (1) i ugljenikom zaprljan (2) vertikalni solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.20. se vidi da se kod vertikalno postavljenih solarnih modula vrednosti U_{oc} kreću od 19,4 V do 19,6 V za čist, i od 19,1 V do 18,5 V za modul zaprljan različitim masama ugljenika.

Horizontalni modul

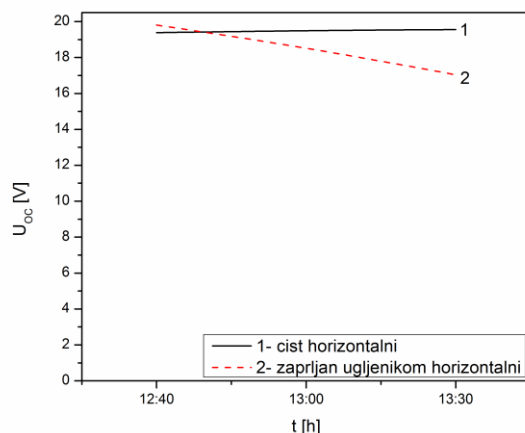
Zavisnost U_{oc} od zaprljanosti površine horizontalno postavljenog solarnog modula različitim masama ugljenika data je na slici 3.21.



Slika 3.21. Zavisnost U_{oc} od zaprljanosti površine horizontalno postavljenog solarnog modula različitim masama ugljenika

Na slici 3.21. se vidi da se kod horizontalno postavljenog solarnog modula vrednosti U_{oc} smanjuju od 19,4 V za čist, do 17,0 V za modul zaprljan sa 3,3 g ugljenika.

Uporedni prikaz U_{oc} za čist (1) i ugljenikom zaprljan (2) horizontalni solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.22.

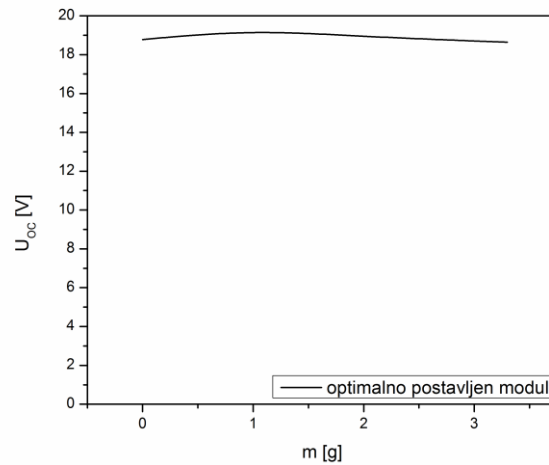


Slika 3.22. Uporedni prikaz U_{oc} za čist (1) i ugljenikom zaprljan (2) horizontalni solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.22. se vidi da se kod horizontalno postavljenih solarnih modula vrednosti U_{oc} kreću od 19,4 V do 19,6 V za čist, i od 19,8 V do 17,0 V za modul zaprljan različitim masama ugljenika. Na slici 3.22. se vidi da je prilikom merenja u 12:40 h izmerena veća vrednost U_{oc} za zaprljan nego za čist solarni modul. To se može objasniti činjenicom da se usled nanošenja ugljenika na horizontalni solarni modul smanjuje intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na njegovu površinu, pri čemu se smanjuje i njegova temperatura, a sa smanjenjem temperature dolazi do blagog porasta U_{oc} .

Optimalno postavljen modul

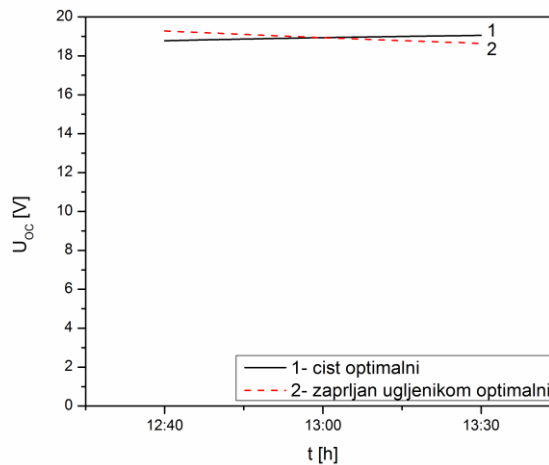
Zavisnost U_{oc} od zaprljanosti površine optimalno postavljenog solarnog modula različitim masama ugljenika data je na slici 3.23.



Slika 3.23. Zavisnost U_{oc} od zaprljanosti površine optimalno postavljenog solarnog modula različitim masama ugljenika

Na slici 3.23. se vidi da se kod optimalno postavljenog solarnog modula vrednosti U_{oc} kreću od 18,8 V za čist, do 18,6 V za modul zaprljan sa 3,3 g ugljenika.

Uporedni prikaz U_{oc} za čist (1) i ugljenikom zaprljan (2) optimalno postavljen solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.24.

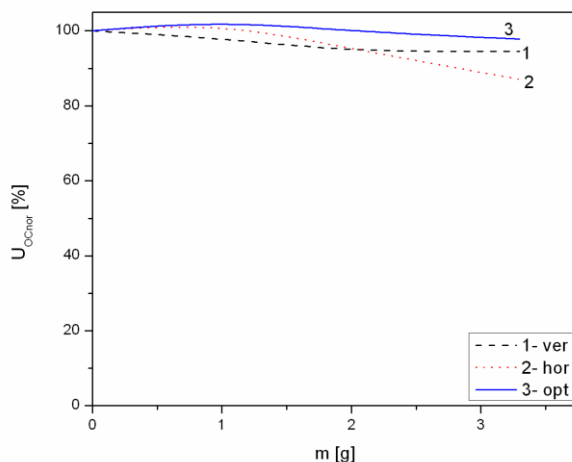


Slika 3.24. Uporedni prikaz U_{oc} za čist (1) i ugljenikom zaprljan (2) optimalno postavljen solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.24. se vidi da se kod optimalno postavljenih solarnih modula vrednosti U_{oc} kreću od 18,8 V do 19,0 V za čist, i od 19,3 V do 18,6 V za modul zaprljan različitim masama ugljenika. Na slici 3.24. se vidi da je prilikom merenja u 12:40 h izmerena veća vrednost U_{oc} za zaprljan nego za čist solarni modul. To se može objasniti činjenicom da se usled nanošenja ugljenika na optimalno postavljen solarni modul smanjuje intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na njegovu površinu, pri čemu se smanjuje i njegova temperatura, a sa smanjenjem temperature dolazi do blagog porasta U_{oc} .

Uporedni prikaz

Zavisnost normalizovanog napona otvorenog kola vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula od zaprljanosti njihove površine različitim masama ugljenika data je na slici 3.25.



Slika 3.25. Zavisnost normalizovanog napona otvorenog kola vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula od zaprljanosti njihove površine različitim masama ugljenika

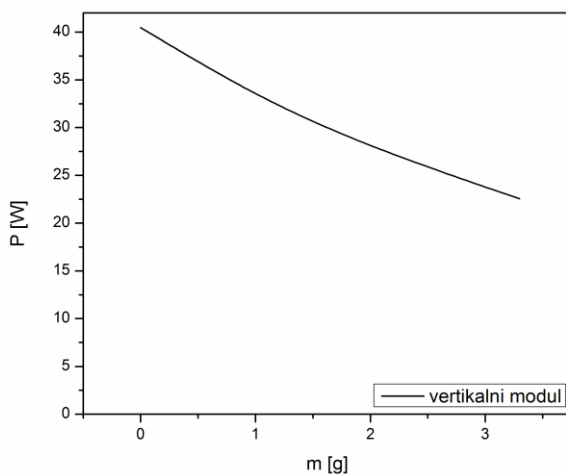
Na slici 3.25. se vidi da napon otvorenog kola vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula blago opada sa povećanjem mase nanetog ugljenika. Usled zaprljavanja solarnih modula, intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na njihovu površinu se

smanjuje, a sa smanjenjem intenziteta Sunčevog zračenja napon otvorenog kola solarnih modula blago opada. U periodu merenja je intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na optimalno postavljene solarne module bio najveći, intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na vertikalne solarne module za oko 20% manji, a intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na horizontalne solarne module za oko 30% manji, tako da je pad napona otvorenog kola usled zaprljavanja ugljenikom najmanji kod optimalno postavljenog modula, nešto veći kod vertikalnog modula i najveći kod horizontalnog modula.

3.2.4. Rezultati merenja maksimalne snage čistih i ugljenikom zaprljanih solarnih modula postavljenih pod različitim uglovima u Nišu

Vertikalni modul

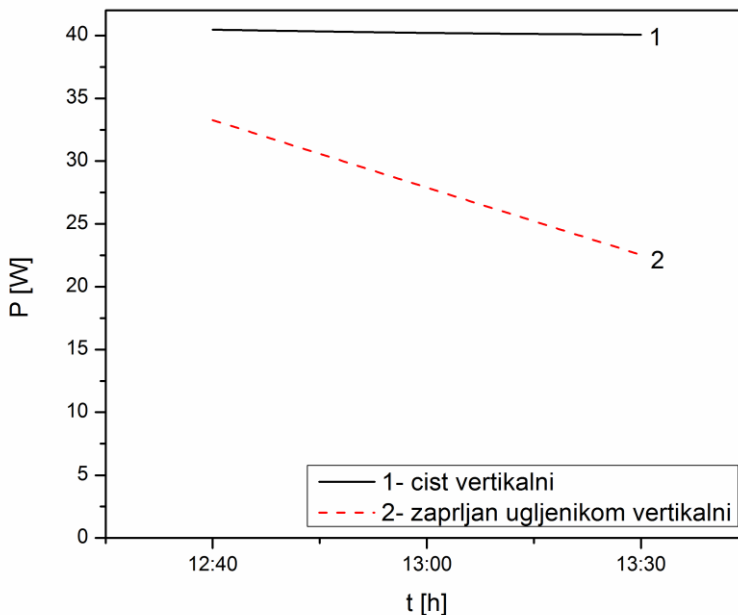
Zavisnost snage od zaprljanosti površine vertikalno postavljenog solarnog modula različitim masama ugljenika data je na slici 3.26.



Slika 3.26. Zavisnost snage od zaprljanosti površine vertikalno postavljenog solarnog modula različitim masama ugljenika

Na slici 3.26. se vidi da se kod vertikalno postavljenog solarnog modula vrednosti snage smanjuju od 40,5 W za čist, do 22,5 W za modul zaprljan sa 3,3 g ugljenika.

Uporedni prikaz snage za čist (1) i ugljenikom zaprljan (2) vertikalni solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.27.

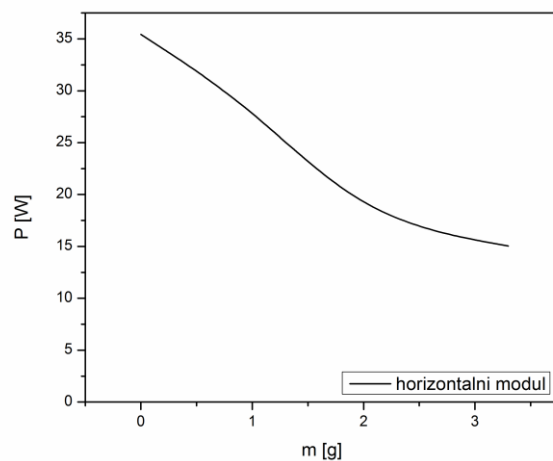


Slika 3.27. Uporedni prikaz snage za čist (1) i ugljenikom zaprljan (2) vertikalni solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.27. se vidi da se kod vertikalno postavljenih solarnih modula vrednosti snage kreću od 40,5 W do 40,1 W za čist, i od 33,3 W do 22,5 W za modul zaprljan različitim masama ugljenika.

Horizontalni modul

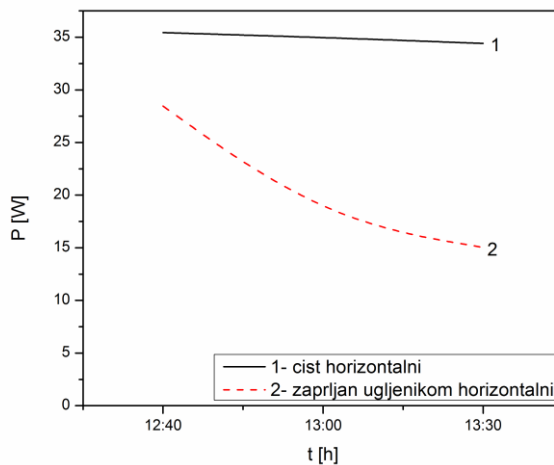
Zavisnost snage od zaprljanosti površine horizontalno postavljenog solarnog modula različitim masama ugljenika data je na slici 3.28.



Slika 3.28. Zavisnost snage od zaprljanosti površine horizontalno postavljenog solarnog modula različitim masama ugljenika

Na slici 3.28. se vidi da se kod horizontalno postavljenog solarnog modula vrednosti snage smanjuju od 35,4 W za čist, do 15,0 W za modul zaprljan sa 3,3 g ugljenika.

Uporedni prikaz snage za čist (1) i ugljenikom zaprljan (2) horizontalni solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.29.

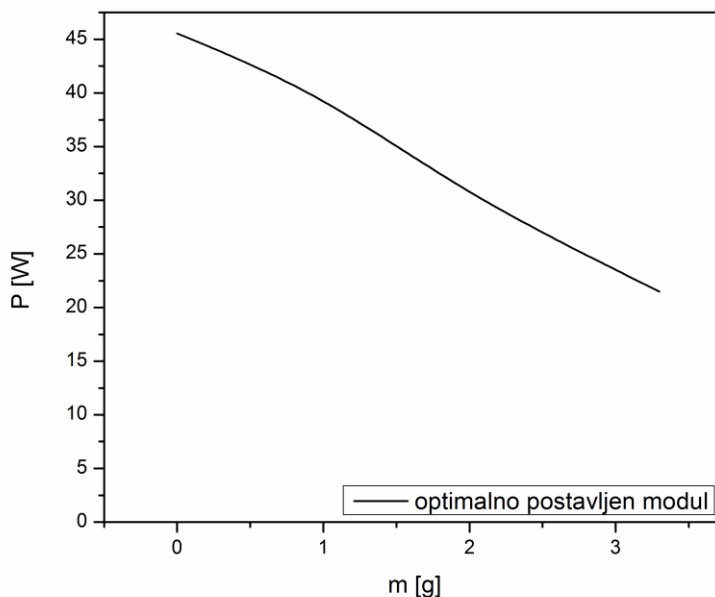


Slika 3.29. Uporedni prikaz snage za čist (1) i ugljenikom zaprljan (2) horizontalni solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.29. se vidi da se kod horizontalno postavljenih solarnih modula vrednosti snage kreću od 35,4 W do 34,4 W za čist, i od 28,5 W do 15,0 W za modul zaprljan različitim masama ugljenika.

Optimalno postavljen modul

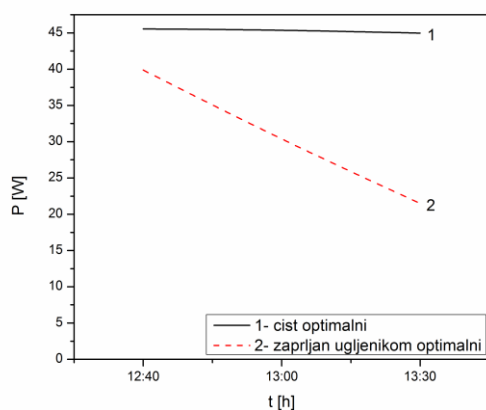
Zavisnost snage od zaprljanosti površine optimalno postavljenog solarnog modula različitim masama ugljenika data je na slici 3.30.



Slika 3.30. Zavisnost snage od zaprljanosti površine optimalno postavljenog solarnog modula različitim masama ugljenika

Na slici 3.30. se vidi da se kod optimalno postavljenog solarnog modula vrednosti snage smanjuju od 45,6 W za čist, do 21,5 W za modul zaprljan sa 3,3 g ugljenika.

Uporedni prikaz snage za čist (1) i ugljenikom zaprljan (2) optimalno postavljen solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.31.

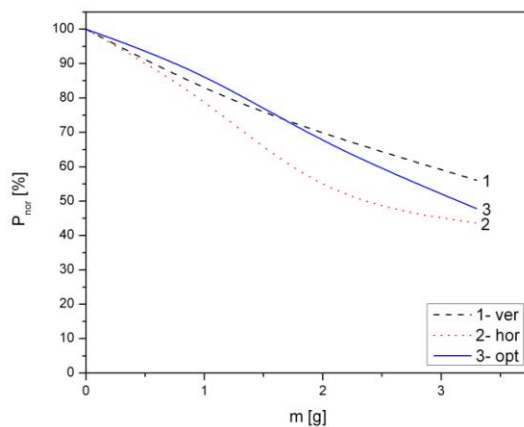


Slika 3.31. Uporedni prikaz snage za čist (1) i ugljenikom zaprljan (2) optimalno postavljen solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.31. se vidi da se kod optimalno postavljenih solarnih modula vrednosti snage kreću od 45,6 W do 45,0 W za čist, i od 39,9 W do 21,5 W za modul zaprljan različitim masama ugljenika.

Uporedni prikaz

Zavisnost normalizovane snage vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula od zaprljanosti njihove površine različitim masama ugljenika data je na slici 3.32.



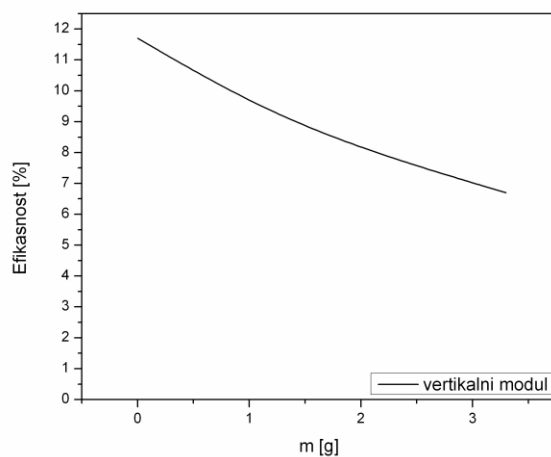
Slika 3.32. Zavisnost normalizovane snage vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula od zaprljanosti njihove površine različitim masama ugljenika

Na slici 3.32. se vidi da se snage vertikalno, horizontalno i optimalno postavljениh solarnih modula smanjuju sa povećanjem mase nanetog ugljenika. Usled zaprljavanja solarnih modula, intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na njihovu površinu se smanjuje, tako da se smanjuje i snaga solarnih modula. U periodu merenja je intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na optimalno postavljene solarne module bio najveći, intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na vertikalne solarne module za oko 20% manji, a intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na horizontalne solarne module za oko 30% manji, tako da je smanjenje snage usled zaprljanja ugljenikom najveće kod horizontalnog solarnog modula.

3.2.5. Rezultati eksperimentalnog određivanja energetske efikasnosti čistih i ugljenikom zaprljanih solarnih modula postavljenih pod različitim uglovima u Nišu

Vertikalni modul

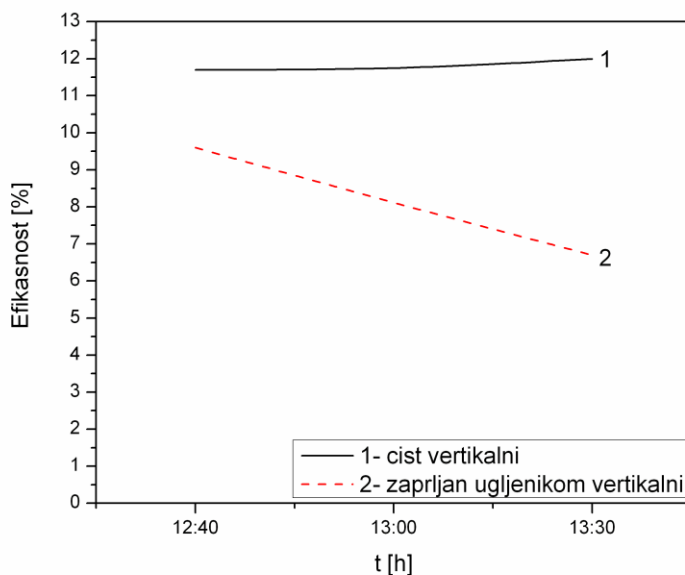
Zavisnost efikasnosti od zaprljanosti površine vertikalno postavljenog solarnog modula različitim masama ugljenika data je na slici 3.33.



Slika 3.33. Zavisnost efikasnosti od zaprljanosti površine vertikalno postavljenog solarnog modula različitim masama ugljenika

Na slici 3.33. se vidi da se kod vertikalno postavljenog solarnog modula vrednosti efikasnosti smanjuju od 11,7% za čist, do 6,7% za modul zaprljan sa 3,3 g ugljenika.

Uporedni prikaz efikasnosti za čist (1) i ugljenikom zaprljan (2) vertikalni solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.34.

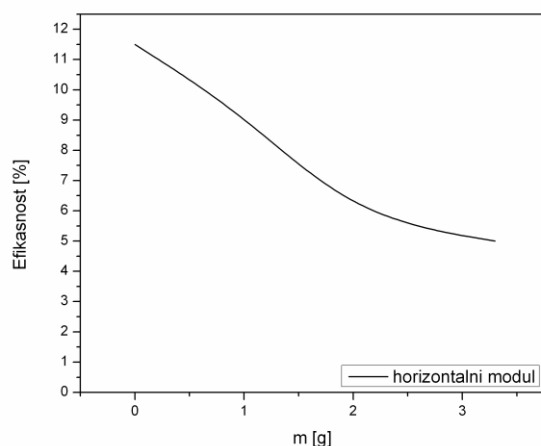


Slika 3.34. Uporedni prikaz efikasnosti za čist (1) i ugljenikom zaprljan (2) vertikalni solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.34. se vidi da se kod vertikalno postavljenih solarnih modula vrednosti efikasnosti kreću od 11,7% do 12,0% za čist, i od 9,6% do 6,7% za modul zaprljan različitim masama ugljenika.

Horizontalni modul

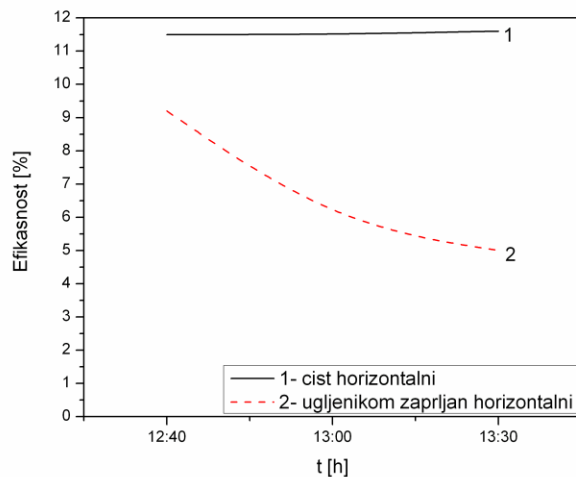
Zavisnost efikasnosti od zaprljanosti površine horizontalno postavljenog solarnog modula različitim masama ugljenika data je na slici 3.35.



Slika 3.35. Zavisnost efikasnosti od zaprljanosti površine horizontalno postavljenog solarnog modula različitim masama ugljenika

Na slici 3.35. se vidi da se kod horizontalno postavljenog solarnog modula vrednosti efikasnosti smanjuju od 11,5% za čist, do 5,0% za modul zaprljan sa 3,3 g ugljenika.

Uporedni prikaz efikasnosti za čist (1) i ugljenikom zaprljan (2) horizontalni solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.36.

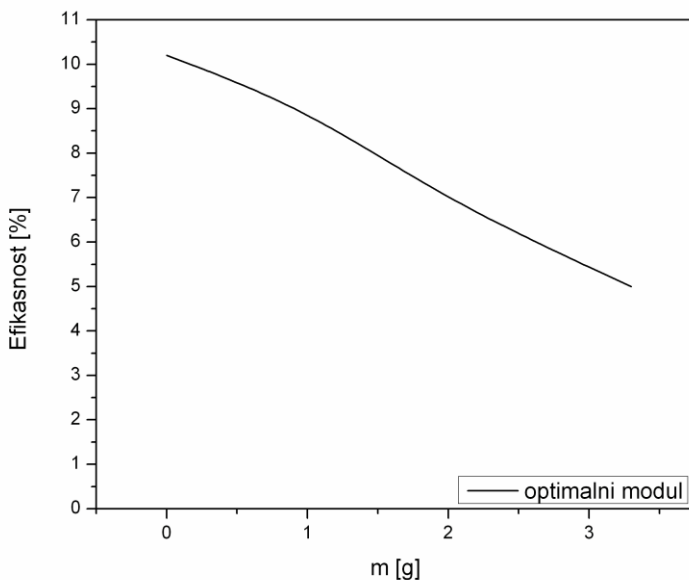


Slika 3.36. Uporedni prikaz efikasnosti za čist (1) i ugljenikom zaprljan (2) horizontalni solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.36. se vidi da se kod horizontalno postavljenih solarnih modula vrednosti efikasnosti kreću od 11,5% do 11,6% za čist, i od 9,2% do 5,0% za modul zaprljan različitim masama ugljenika.

Optimalno postavljen modul

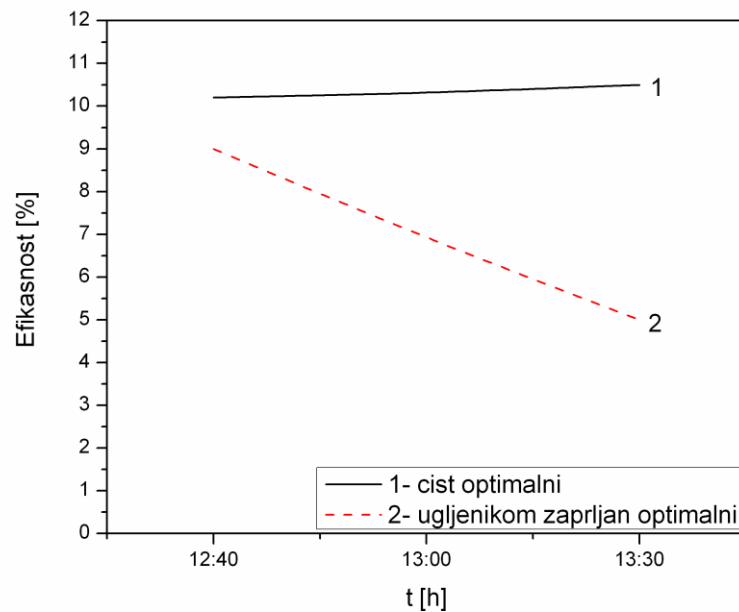
Zavisnost efikasnosti od zaprljanosti površine optimalno postavljenog solarnog modula različitim masama ugljenika data je na slici 3.37.



Slika 3.37. Zavisnost efikasnosti od zaprljanosti površine optimalno postavljenog solarnog modula različitim masama ugljenika

Na slici 3.37. se vidi da se kod optimalno postavljenog solarnog modula vrednosti efikasnosti smanjuju od 10,2% za čist, do 5,0% za modul zaprljan sa 3,3 g ugljenika.

Uporedni prikaz efikasnosti za čist (1) i ugljenikom zaprljan (2) optimalno postavljen solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.38.

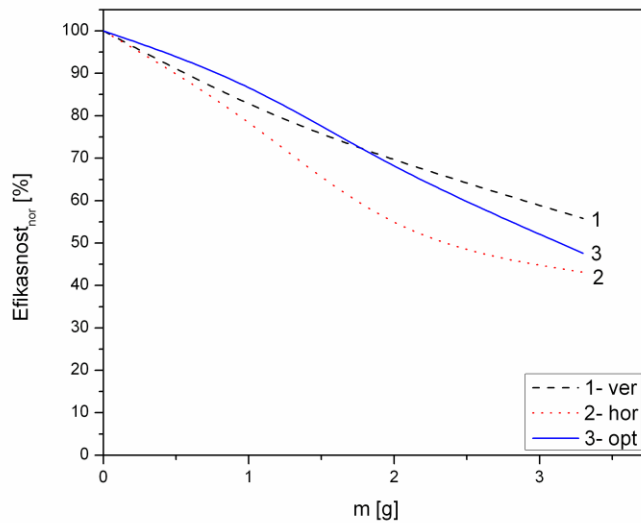


Slika 3.38. Uporedni prikaz efikasnosti za čist (1) i ugljenikom zaprljan (2) optimalno postavljen solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.38. se vidi da se kod optimalno postavljenih solarnih modula vrednosti efikasnosti kreću od 10,2% do 10,5% za čist, i od 9,0% do 5,0% za modul zaprljan različitim masama ugljenika.

Uporedni prikaz

Zavisnost normalizovane efikasnosti vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula od zaprljanosti njihove površine različitim masama ugljenika data je na slici 3.39.

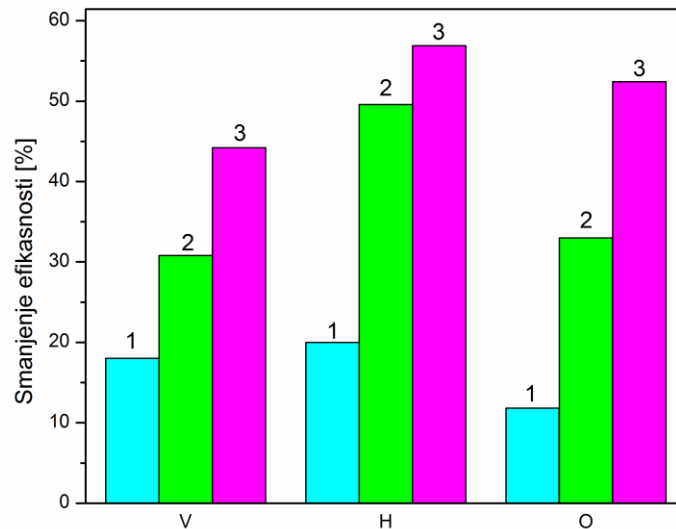


Slika 3.39. Zavisnost normalizovane efikasnosti vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula od zaprljanosti njihove površine različitim masama ugljenika

Na slici 3.39. se vidi da se efikasnosti vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula smanjuju sa povećanjem mase nanetog ugljenika. Efikasnost solarnih modula je direktno proporcionalna izlaznoj snazi, tako da se efikasnost solarnih modula usled njihovog zaprljanja ugljenikom menja na isti način kao i snaga. Smanjenje efikasnosti solarnih modula usled njihovog zaprljanja ugljenikom je najveće kod horizontalnog solarnog modula.

Tabela 3.3. Intenzitet Sunčevog zračenja koje pada na vertikalno, horizontalno i optimalno postavljene solarne module (I_{ver} , I_{hor} , I_{opt}), efikasnosti čistih (η_{cist}) i ugljenikom zaprljanih ($\eta_{ugljenik}$) vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih modula, i smanjenje efikasnosti usled zaprljanja vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula ($\Delta\eta$) dana 03.10.2017. godine

t (h)	m (g)	ver				hor				opt			
		I_{ver} (W/m ²)	η_{cist} (%)	$\eta_{ugljenik}$ (%)	$\Delta\eta$ (%)	I_{hor} (W/m ²)	η_{cist} (%)	$\eta_{ugljenik}$ (%)	$\Delta\eta$ (%)	I_{opt} (W/m ²)	η_{cist} (%)	$\eta_{ugljenik}$ (%)	$\Delta\eta$ (%)
12:40	1,0	672,5	11,7	9,6	18,0	599,0	11,5	9,2	20,0	864,3	10,2	9,0	11,8
13:00	2,0	665,7	11,7	8,1	30,8	593,0	11,5	5,8	49,6	855,7	10,3	6,9	33,0
13:30	3,3	650,0	12,0	6,7	44,2	579,0	11,6	5,0	56,9	835,5	10,5	5,0	52,4

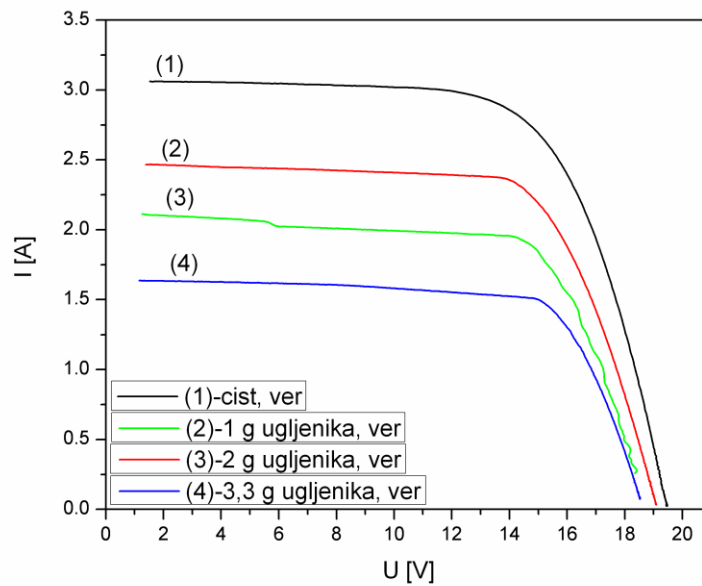


Slika 3.40. Smanjenje efikasnosti vertikalnog (V), horizontalnog (H) i optimalno postavljenog (O) solarnog modula u zavisnosti od mase nanetog ugljenika: 1. m=1 g, 2. m=2 g, 3. m=3,3 g

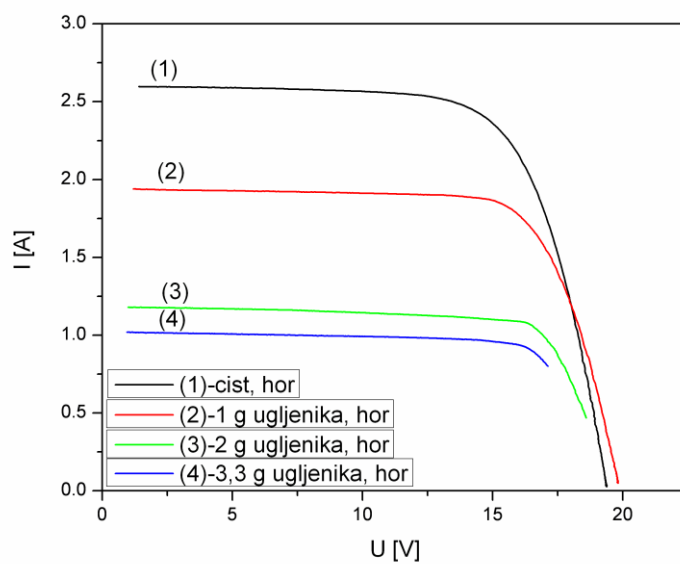
Na osnovu podataka u tabeli 3.3. i na slici 3.40. vidi se da se usled zaprljanja sa 1 g ugljenika efikasnost vertikalno postavljenog modula smanjila za 18,0%, horizontalno postavljenog za 20,0% i optimalno postavljenog za 11,8%. Usled zaprljanja sa 2 g ugljenika efikasnost vertikalno postavljenog modula smanjila se za 30,8%, horizontalno postavljenog za 49,6% i optimalno postavljenog za 33,0%. Usled zaprljanja sa 3,3 g ugljenika efikasnost vertikalno postavljenog modula smanjila se za 44,2%, horizontalno postavljenog za 56,9% i optimalno postavljenog za 52,4%.

3.2.6. Rezultati eksperimentalnog određivanja strujno-naponskih karakteristika čistih i ugljenikom zaprljanih solarnih modula postavljenih pod različitim uglovima u Nišu

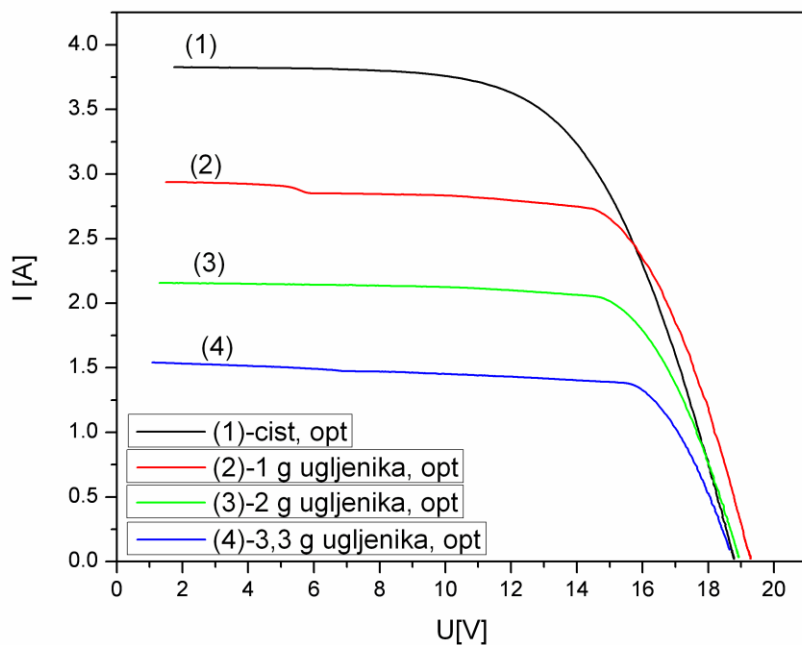
Strujno-naponske karakteristike vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula u zavisnosti od zaprljanosti njihove površine različitim masama ugljenika date su na slikama 3.41, 3.42. i 3.43.



Slika 3.41. Strujno-naponske karakteristike vertikalno postavljenih solarnih modula u zavisnosti od zaprljanosti njihove površine različitim masama ugljenika



Slika 3.42. Strujno-naponske karakteristike horizontalno postavljenih solarnih modula u zavisnosti od zaprljanosti njihove površine različitim masama ugljenika

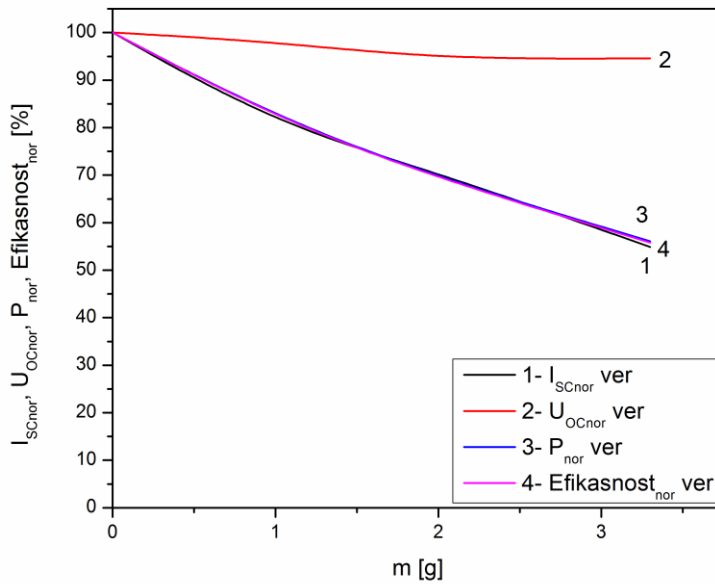


Slika 3.43. Strujno-naponske karakteristike optimalno postavljenih solarnih modula u zavisnosti od zaprljanosti njihove površine različitim masama ugljenika

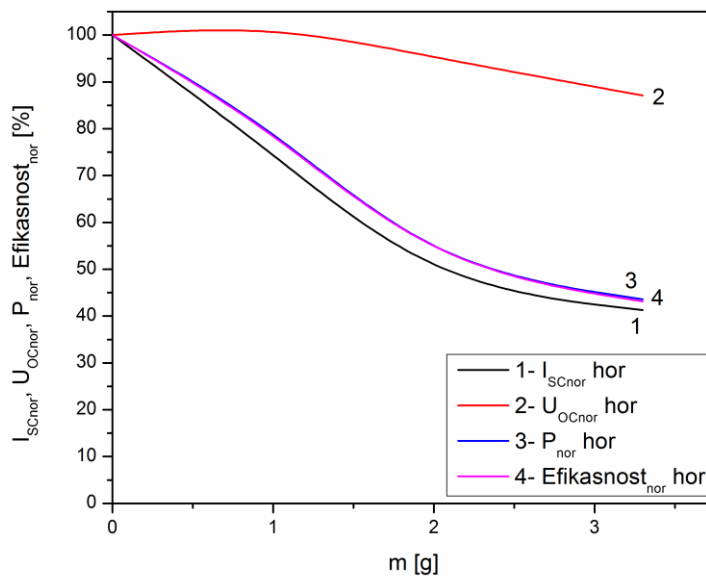
Na slikama 3.41, 3.42. i 3.43. se vidi da se sa povećanjem mase ugljenika nanetog na vertikalno, horizontalno i optimalno postavljene solarne module smanjuje njihova struja. Usled zaprljavanja solarnih modula sve većom masom ugljenika, intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na njihovu površinu se smanjuje, tako da se smanjuje i struja solarnih modula.

3.2.7. Uporedni prikaz parametara solarnih modula zaprljanih ugljenikom

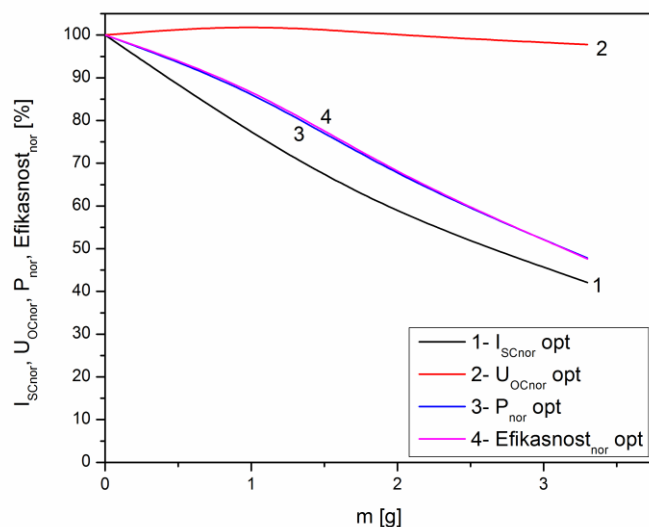
Zavisnost normalizovane I_{sc} , U_{oc} , P i efikasnosti vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula od zaprljanosti njihove površine različitim masama ugljenika data je na slikama 3.44, 3.45. i 3.46, respektivno.



Slika 3.44. Zavisnost normalizovane I_{sc} , U_{oc} , P i efikasnosti vertikalno postavljenog solarnog modula od zaprljanosti njegove površine različitim masama ugljenika



Slika 3.45. Zavisnost normalizovane I_{sc} , U_{oc} , P i efikasnosti horizontalno postavljenog solarnog modula od zaprljanosti njegove površine različitim masama ugljenika



Slika 3.46. Zavisnost normalizovane I_{sc} , U_{oc} , P i efikasnosti optimalno postavljenog solarnog modula od zaprljanosti njegove površine različitim masama ugljenika

Na slici 3.44. se vidi da se kod vertikalno postavljenog solarnog modula usled njegovog zaprljanja ugljenikom jednako smanjuju I_{sc} , P i efikasnost, a U_{oc} se smanjuje neznatno. Na slikama 3.45. i 3.46. se vidi da se kod horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula usled njihovog zaprljanja ugljenikom najviše smanjuje I_{sc} , zatim P i efikasnost, a smanjenje U_{oc} je malo.

3.3. Rezultati ispitivanja energetske efikasnosti solarnih modula u zavisnosti od njihove zaprljanosti kalcijum-karbonatom

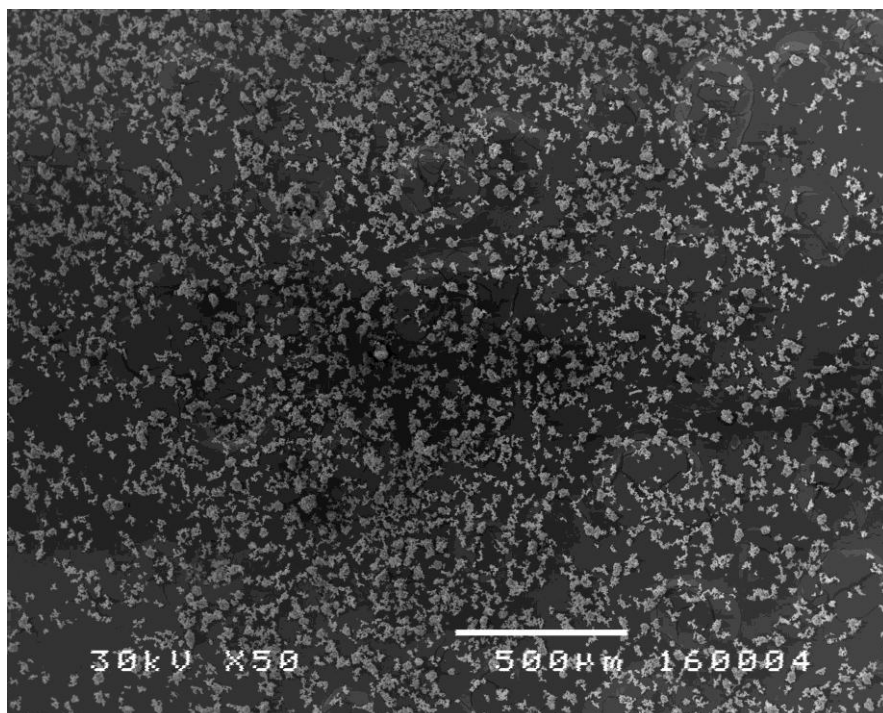
Dana 05.08.2016. godine ispitivan je uticaj različitih masa kalcijum-karbonata na energetska efikasnost solarnih modula postavljenih pod uglovima od 0° , 32° i 90° u odnosu na horizontalnu ravan.

Na dan merenja, 05.08.2016. godine, prvo je očišćeno svih šest solarnih modula kako bi se sa njih uklonila sva nečistoća. Tokom merenja solarni moduli 4, 5 i 6 su sve vreme bili čisti i nisu se zaprljavali. Moduli 1, 2 i 3 su uniformno zaprljavani rasprašivanjem određene količine vode koja sadrži 1 g kalcijum-karbonata nakon čega je u 12:10 h izvršeno prvo merenje.

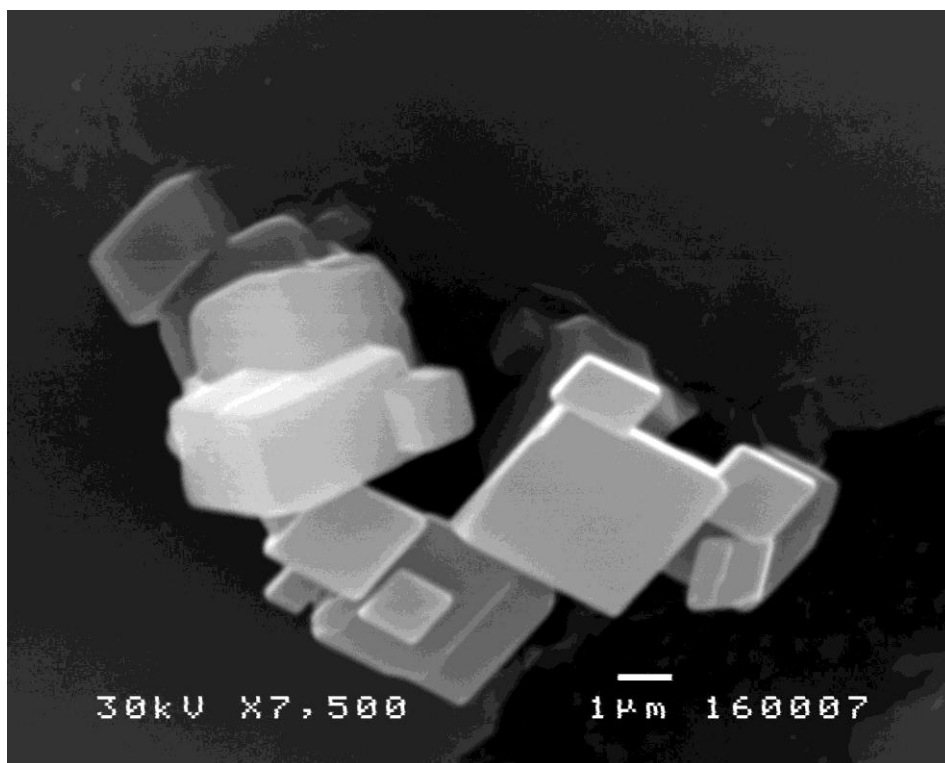
Površina svakog solarnog modula iznosi $S=0,514 \text{ m}^2$ pa je koncentracija kalcijum-karbonata na svakom zaprljanom solarnom modulu pre prvog merenja iznosila $1,945 \text{ g/m}^2$. Nakon izvršenog prvog merenja su moduli 1, 2 i 3 dodatno uniformno zaprljani rasprašivanjem određene količine vode koja sadrži 1 g kalcijum-karbonata, tako da je koncentracija kalcijum-karbonata na zaprljanim solarnim modulima (1, 2 i 3) pre drugog merenja iznosila $3,891 \text{ g/m}^2$, i u 12:20 h je izvršeno drugo merenje. Posle izvršenog drugog merenja su moduli 1, 2 i 3 dodatno uniformno zaprljani rasprašivanjem određene količine vode koja sadrži 1 g kalcijum-karbonata, tako da je koncentracija kalcijum-karbonata na zaprljanim solarnim modulima pre trećeg merenja iznosila $5,837 \text{ g/m}^2$, i u 12:30 h je izvršeno treće merenje.

3.3.1. Rezultati SEM ispitivanja kalcijum-karbonata

SEM fotografije čestica kalcijum-karbonata korišćenih u eksperimentu pri različitim uvećanjima date su na slikama 3.47. i 3.48.



Slika 3.47. SEM fotografija čestica kalcijum-karbonata pri uvećanju od 50 puta



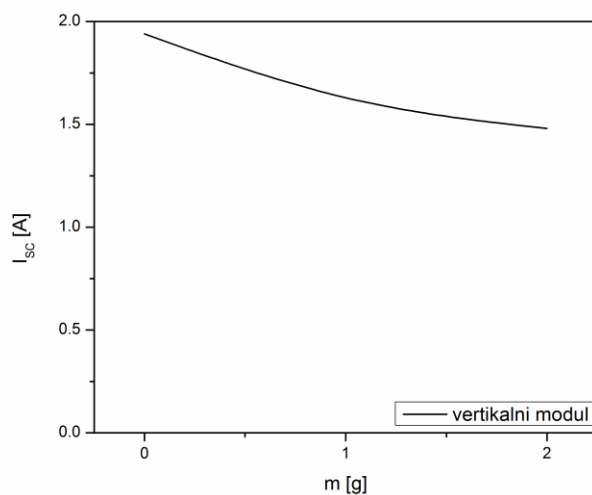
Slika 3.48. SEM fotografija čestica kalcijum-karbonata pri uvećanju od 7500 puta

Na slici 3.47. se vidi da su čestice kalcijum-karbonata raspoređene homogeno ali je prostor između čestica kroz koji svetlost može da prođe veći nego kod čestica ugljenika. Sa slike 3.48. se vidi da čestice kalcijum-karbonata imaju kubičnu strukturu, a prečnik im je oko 30 µm.

3.3.2. Rezultati merenja struje kratkog spoja čistih i kalcijum-karbonatom zaprljanih solarnih modula postavljenih pod različitim uglovima u Nišu

Vertikalni modul

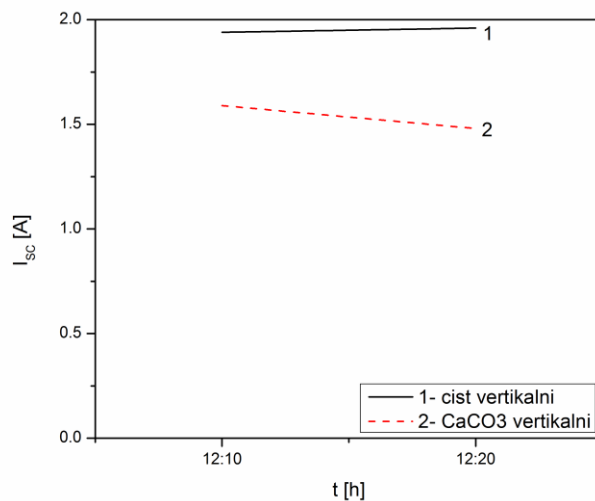
Zavisnost struje kratkog spoja (I_{sc}) od zaprljanosti površine vertikalno postavljenog solarnog modula različitim masama kalcijum-karbonata data je na slici 3.49.



Slika 3.49. Zavisnost I_{sc} od zaprljanosti površine vertikalno postavljenog solarnog modula različitim masama kalcijum-karbonata

Na slici 3.49. se vidi da se kod vertikalno postavljenog solarnog modula vrednosti I_{sc} kreću od 1,94 A za čist, do 1,48 A za modul zaprljan sa 2 g kalcijum-karbonata.

Uporedni prikaz I_{sc} za čist (1) i kalcijum-karbonatom zaprljan (2) vertikalni solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.50.

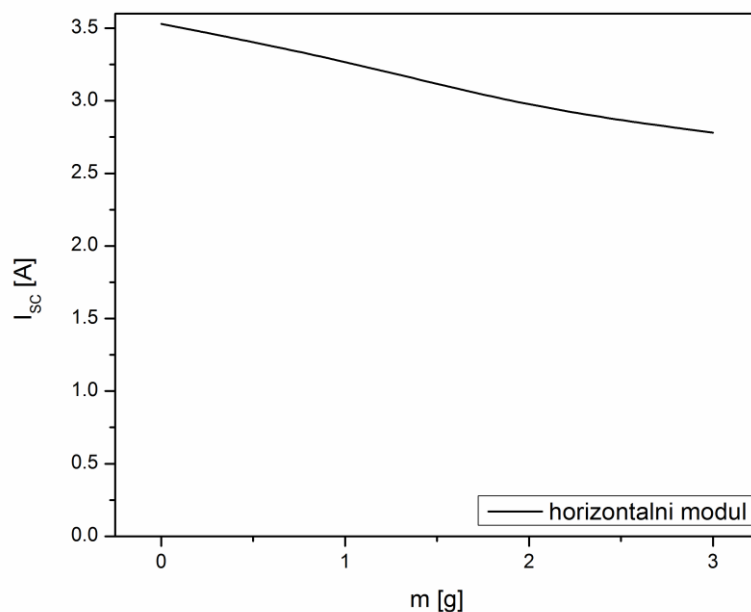


Slika 3.50. Uporedni prikaz I_{sc} za čist (1) i kalcijum-karbonatom zaprljan (2) vertikalni solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.50. se vidi da se kod vertikalno postavljenih solarnih modula vrednosti I_{sc} kreću od 1,94 A do 1,96 A za čist, i od 1,59 A do 1,48 A za modul zaprljan različitim masama kalcijum-karbonata.

Horizontalni modul

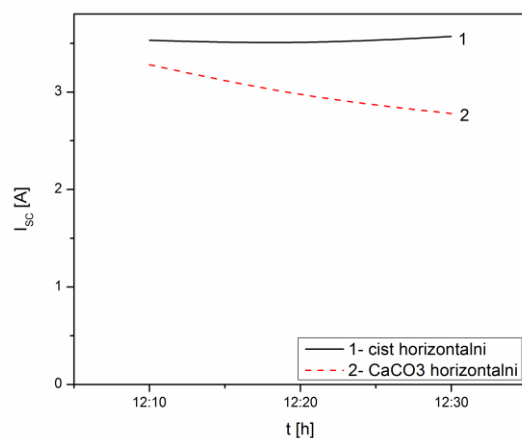
Zavisnost I_{sc} od zaprljanosti površine horizontalno postavljenog solarnog modula različitim masama kalcijum-karbonata data je na slici 3.51.



Slika 3.51. Zavisnost I_{sc} od zaprljanosti površine horizontalno postavljenog solarnog modula različitim masama kalcijum-karbonata

Na slici 3.51. se vidi da se kod horizontalno postavljenog solarnog modula vrednosti I_{sc} smanjuju od 3,53 A za čist, do 2,78 A za modul zaprljan sa 3 g kalcijum-karbonata.

Uporedni prikaz I_{sc} za čist (1) i kalcijum-karbonatom zaprljan (2) horizontalni solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.52.

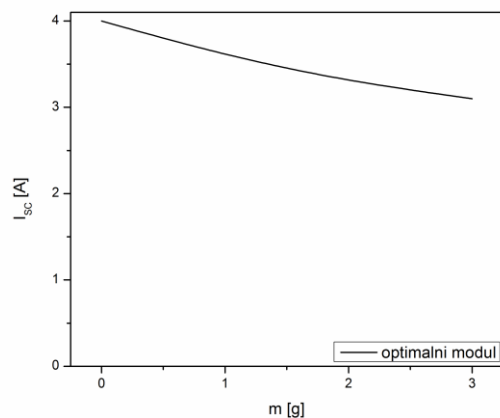


Slika 3.52. Uporedni prikaz I_{sc} za čist (1) i kalcijum-karbonatom zaprljan (2) horizontalni solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.52. se vidi da se kod horizontalno postavljenih solarnih modula vrednosti I_{sc} kreću od 3,53 A do 3,57 A za čist, i od 3,28 A do 2,78 A za modul zaprljan različitim masama kalcijum-karbonata.

Optimalno postavljen modul

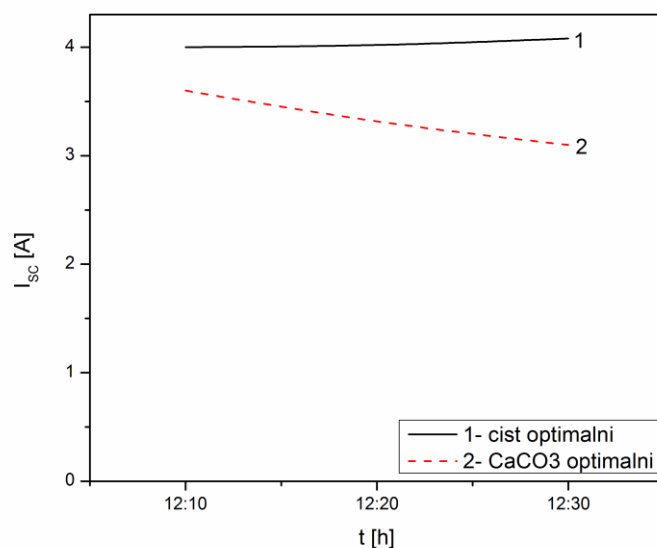
Zavisnost I_{sc} od zaprljanosti površine optimalno postavljenog solarnog modula različitim masama kalcijum-karbonata data je na slici 3.53.



Slika 3.53. Zavisnost I_{sc} od zaprljanosti površine optimalno postavljenog solarnog modula različitim masama kalcijum-karbonata

Na slici 3.53. se vidi da se kod optimalno postavljenog solarnog modula vrednosti I_{sc} smanjuju od 4,00 A za čist, do 3,10 A za modul zaprljan sa 3 g kalcijum-karbonata.

Uporedni prikaz I_{sc} za čist (1) i kalcijum-karbonatom zaprljan (2) optimalno postavljen solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.54.

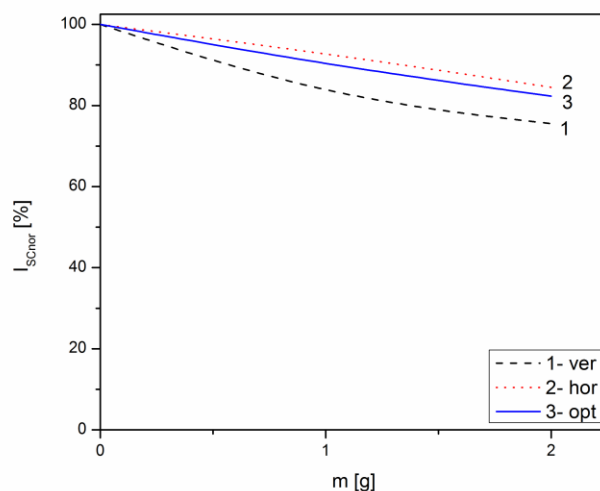


Slika 3.54. Uporedni prikaz I_{sc} za čist (1) i kalcijum-karbonatom zaprljan (2) optimalno postavljen solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.54. se vidi da se kod optimalno postavljenih solarnih modula vrednosti I_{sc} kreću od 4,00 A do 4,08 A za čist, i od 3,60 A do 3,10 A za modul zaprljan različitim masama kalcijum-karbonata.

Uporedni prikaz

Zavisnost normalizovane struje kratkog spoja vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula od zaprljanosti njihove površine različitim masama kalcijum-karbonata data je na slici 3.55.



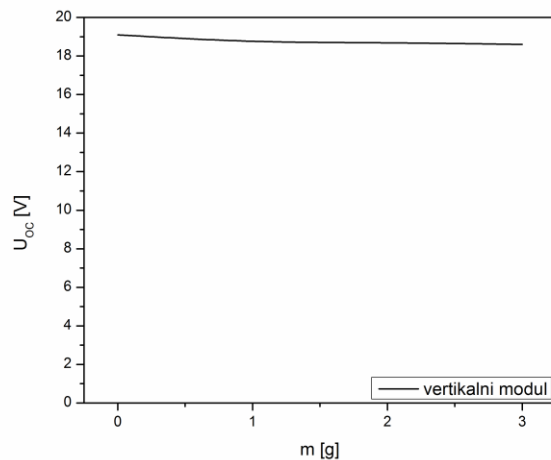
Slika 3.55. Zavisnost normalizovane struje kratkog spoja vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula od zaprljanosti njihove površine različitim masama kalcijum-karbonata

Na slici 3.55. se vidi da se struje kratkog spoja vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula smanjuju sa povećanjem mase nanetog kalcijum-karbonata. Usled zaprljavanja solarnih modula, intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na njihovu površinu se smanjuje, tako da se smanjuje i struja kratkog spoja solarnih modula. U periodu merenja su intenziteti Sunčevog zračenja koje dospeva na optimalne i horizontalne solarne module bili mnogo veći od intenziteta Sunčevog zračenja koje dospeva na vertikalne solarne module, tako da je smanjenje struje kratkog spoja solarnih modula usled njihovog zaprljanja kalcijum-karbonatom manje kod optimalno orijentisanih i horizontalnih solarnih modula, a veće kod vertikalnih solarnih modula.

3.3.3. Rezultati merenja napona otvorenog kola čistih i kalcijum-karbonatom zaprljanih solarnih modula postavljenih pod različitim uglovima u Nišu

Vertikalni modul

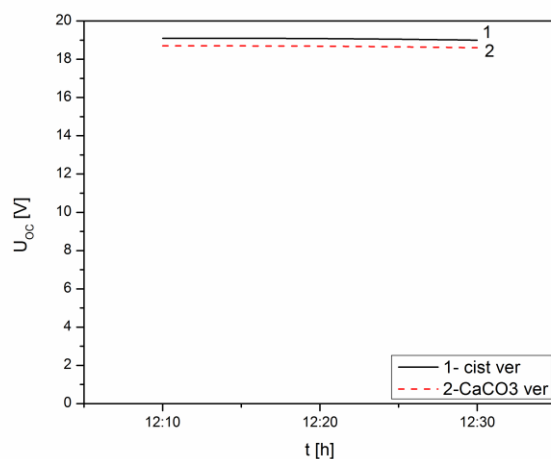
Zavisnost napona otvorenog kola (U_{oc}) od zaprljanosti površine vertikalno postavljenog solarnog modula različitim masama kalcijum-karbonata data je na slici 3.56.



Slika 3.56. Zavisnost U_{oc} od zaprljanosti površine vertikalno postavljenog solarnog modula različitim masama kalcijum-karbonata

Na slici 3.56. se vidi da se kod vertikalno postavljenog solarnog modula vrednosti U_{oc} smanjuju od 19,1 V za čist, do 18,6 V za modul zaprljan sa 3 g kalcijum-karbonata.

Uporedni prikaz U_{oc} za čist (1) i kalcijum-karbonatom zaprljan (2) vertikalni solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.57.

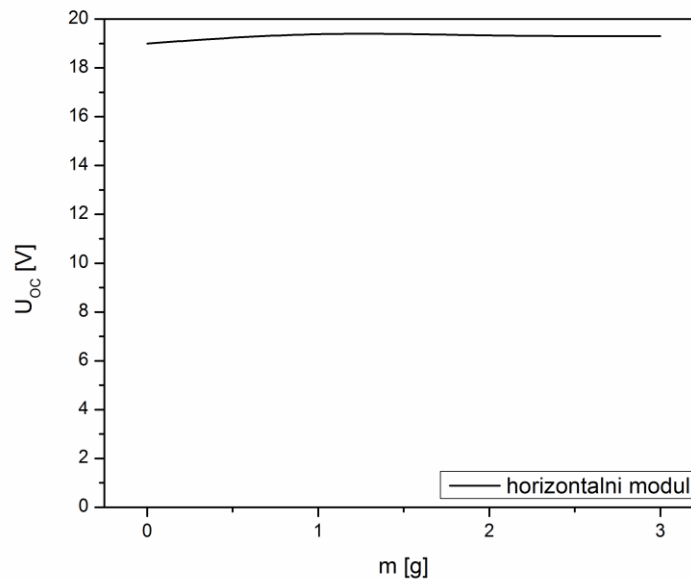


Slika 3.57. Uporedni prikaz U_{oc} za čist (1) i kalcijum-karbonatom zaprljan (2) vertikalni solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.57. se vidi da se kod vertikalno postavljenih solarnih modula vrednosti U_{oc} kreću od 19,1 V do 19,0 V za čist, i od 18,7 V do 18,6 V za modul zaprljan različitim masama kalcijum-karbonata.

Horizontalni modul

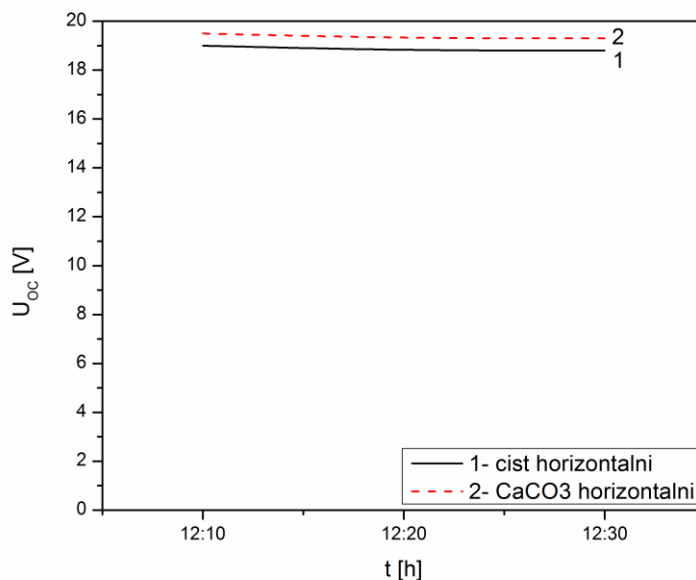
Zavisnost U_{oc} od zaprljanosti površine horizontalno postavljenog solarnog modula različitim masama kalcijum-karbonata data je na slici 3.58.



Slika 3.58. Zavisnost U_{oc} od zaprljanosti površine horizontalno postavljenog solarnog modula različitim masama kalcijum-karbonata

Na slici 3.58. se vidi da se kod horizontalno postavljenog solarnog modula vrednosti U_{oc} kreću od 19,0 V za čist, do 19,3 V za modul zaprljan sa 3 g kalcijum-karbonata.

Uporedni prikaz U_{oc} za čist (1) i kalcijum-karbonatom zaprljan (2) horizontalni solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.59.

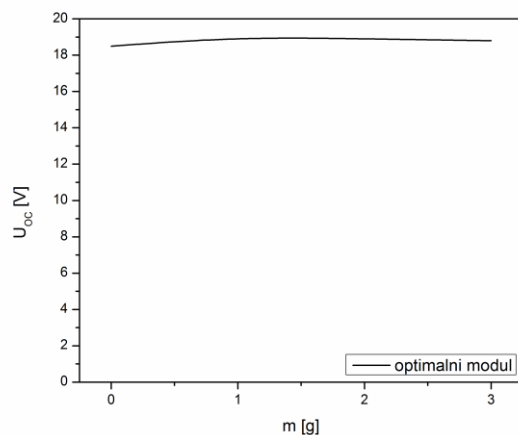


Slika 3.59. Uporedni prikaz U_{oc} za čist (1) i kalcijum-karbonatom zaprljan (2) horizontalni solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.59. se vidi da se kod horizontalno postavljenih solarnih modula vrednosti U_{oc} kreću od 19,0 V do 18,8 V za čist, i od 19,5 V do 19,3 V za modul zaprljan različitim masama kalcijum-karbonata. Na slici 3.59. se vidi da su prilikom merenja izmerene veće vrednosti U_{oc} za zaprljan nego za čist solarni modul. To se može objasniti činjenicom da se usled nanošenja kalcijum-karbonata na horizontalni solarni modul smanjuje intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na njegovu površinu, pri čemu se smanjuje i njegova temperatura, a sa smanjenjem temperature dolazi do blagog porasta U_{oc} .

Optimalno postavljen modul

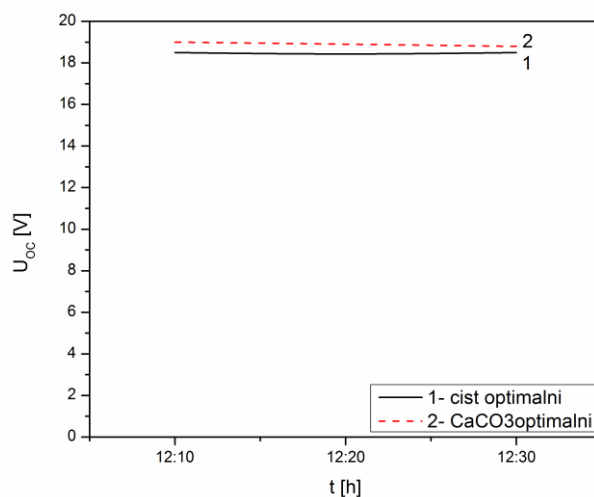
Zavisnost U_{oc} od zaprljanosti površine optimalno postavljenog solarnog modula različitim masama kalcijum-karbonata data je na slici 3.60.



Slika 3.60. Zavisnost U_{oc} od zaprljanosti površine optimalno postavljenog solarnog modula različitim masama kalcijum-karbonata

Na slici 3.60. se vidi da se kod optimalno postavljenog solarnog modula vrednosti U_{oc} kreću od 18,5 V za čist, do 18,8 V za modul zaprljan sa 3 g kalcijum-karbonata.

Uporedni prikaz U_{oc} za čist (1) i kalcijum-karbonatom zaprljan (2) optimalno postavljen solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.61.

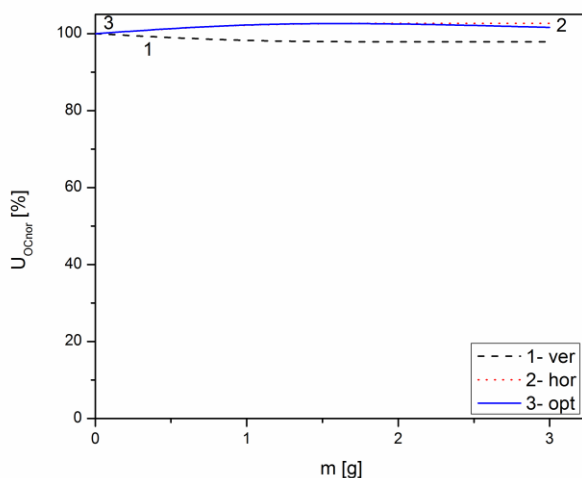


Slika 3.61. Uporedni prikaz U_{oc} za čist (1) i kalcijum-karbonatom zaprljan (2) optimalno postavljen solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.61. se vidi da kod optimalno postavljenih solarnih modula U_{oc} ima vrednosti 18,4 V i 18,5 V za čist solarni modul, i da se vrednosti U_{oc} kreću od 19,0 V do 18,8 V za modul zaprljan različitim masama kalcijum-karbonata. Na slici 3.61. se vidi da su prilikom merenja izmerene veće vrednosti U_{oc} za zaprljan nego za čist solarni modul. To se može objasniti činjenicom da se usled nanošenja kalcijum-karbonata na optimalno postavljen solarni modul smanjuje intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na njegovu površinu, pri čemu se smanjuje i njegova temperatura, a sa smanjenjem temperature dolazi do blagog porasta U_{oc} .

Uporedni prikaz

Zavisnost normalizovanog napona otvorenog kola vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula od zaprljanosti njihove površine različitim masama kalcijum-karbonata data je na slici 3.62.



Slika 3.62. Zavisnost normalizovanog napona otvorenog kola vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula od zaprljanosti njihove površine različitim masama kalcijum-karbonata

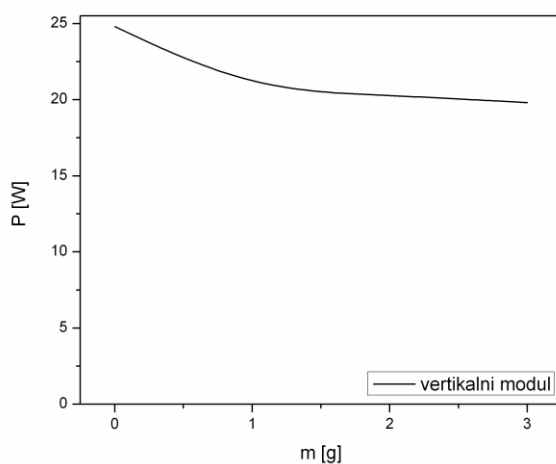
Na slici 3.62. se vidi da napon otvorenog kola horizontalno i optimalno postavljenih modula blago raste, a da napon otvorenog kola vertikalno postavljenih modula blago opada sa porastom mase nanetog kalcijum-karbonata. Usled zaprljavanja solarnih modula, intenzitet

Sunčevog zračenja koje dospeva na njihovu površinu se smanjuje, a samim tim i temperatura solarnih modula, tako da se napon otvorenog kola solarnih modula vrlo malo povećava. U periodu merenja je intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na optimalne solarne module bio najveći, intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na horizontalne solarne module je bio malo manji, tako da se vrednosti napona otvorenog kola horizontalnih i optimalno postavljenih modula usled zaprljavanja kalcijum-karbonatom menjaju na isti način i usled smanjenja intenziteta Sunčevog zračenja vrlo blago rastu. Intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na vertikalne solarne module je u periodu merenja bio duplo manji od intenziteta Sunčevog zračenja koje dospeva na horizontalne i optimalno postavljene module, tako da se vrednosti napona otvorenog kola vertikalnih modula usled zaprljavanja kalcijum-karbonatom veoma malo smanjuju.

3.3.4. Rezultati merenja maksimalne snage čistih i kalcijum-karbonatom zaprljanih solarnih modula postavljenih pod različitim uglovima u Nišu

Vertikalni modul

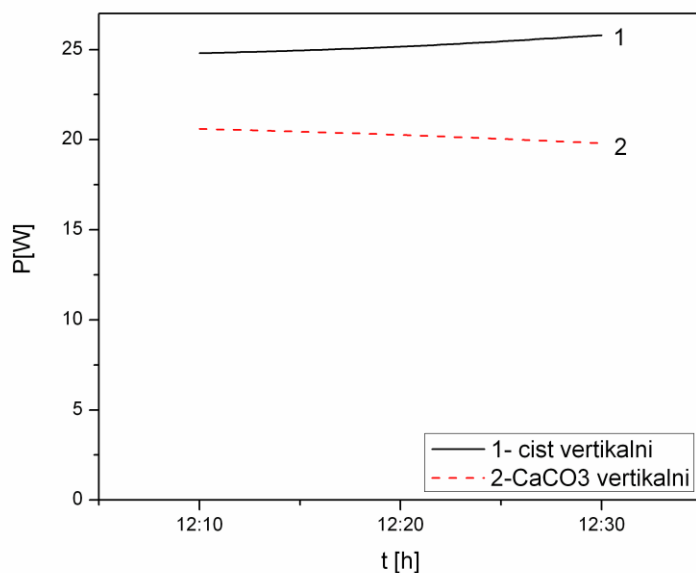
Zavisnost snage od zaprljanosti površine vertikalno postavljenog solarnog modula različitim masama kalcijum-karbonata data je na slici 3.63.



Slika 3.63. Zavisnost snage od zaprljanosti površine vertikalno postavljenog solarnog modula različitim masama kalcijum-karbonata

Na slici 3.63. se vidi da se kod vertikalno postavljenog solarnog modula vrednosti snage smanjuju od 24,8 W za čist, do 19,8 W za modul zaprljan sa 3 g kalcijum-karbonata.

Uporedni prikaz snage za čist (1) i kalcijum-karbonatom zaprljan (2) vertikalni solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.64.

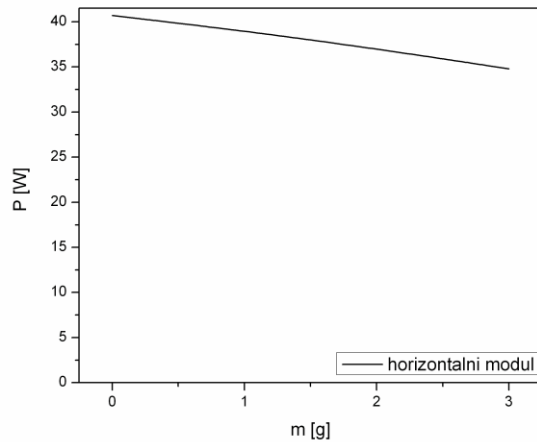


Slika 3.64. Uporedni prikaz snage za čist (1) i kalcijum-karbonatom zaprljan (2) vertikalni solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.64. se vidi da se kod vertikalno postavljenih solarnih modula vrednosti snage kreću od 24,8 W do 25,8 W za čist, i od 20,6 W do 19,8 W za modul zaprljan različitim masama kalcijum-karbonata.

Horizontalni modul

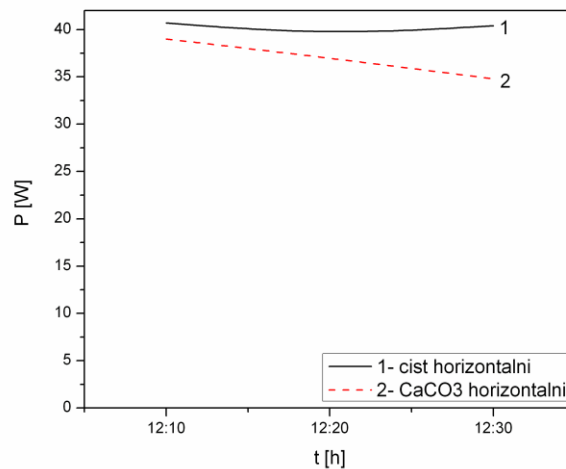
Zavisnost snage od zaprljanosti površine horizontalno postavljenog solarnog modula različitim masama kalcijum-karbonata data je na slici 3.65.



Slika 3.65. Zavisnost snage od zaprljanosti površine horizontalno postavljenog solarnog modula različitim masama kalcijum-karbonata

Na slici 3.65. se vidi da se kod horizontalno postavljenog solarnog modula vrednosti snage smanjuju od 40,7 W za čist, do 34,8 W za modul zaprljan sa 3 g kalcijum-karbonata.

Uporedni prikaz snage za čist (1) i kalcijum-karbonatom zaprljan (2) horizontalni solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.66.

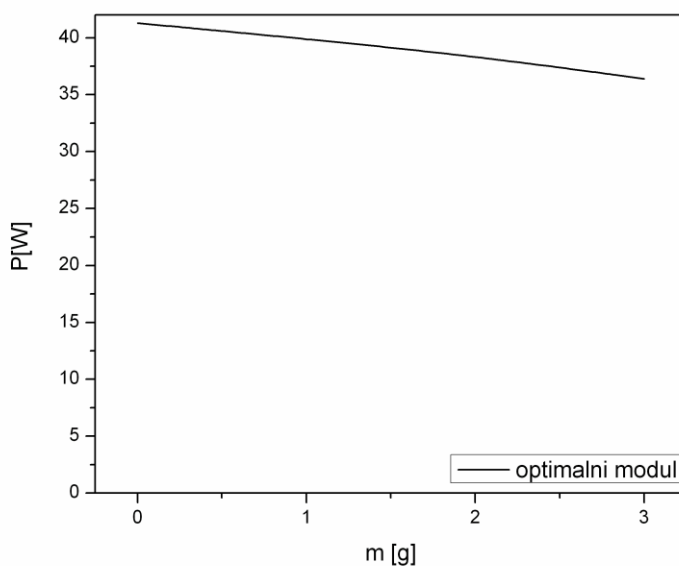


Slika 3.66. Uporedni prikaz snage za čist (1) i kalcijum-karbonatom zaprljan (2) horizontalni solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.66. se vidi da se kod horizontalno postavljenih solarnih modula vrednosti snage kreću od 40,7 W do 40,4 W za čist, i od 39,0 W do 34,8 W za modul zaprljan različitim masama kalcijum-karbonata.

Optimalno postavljen modul

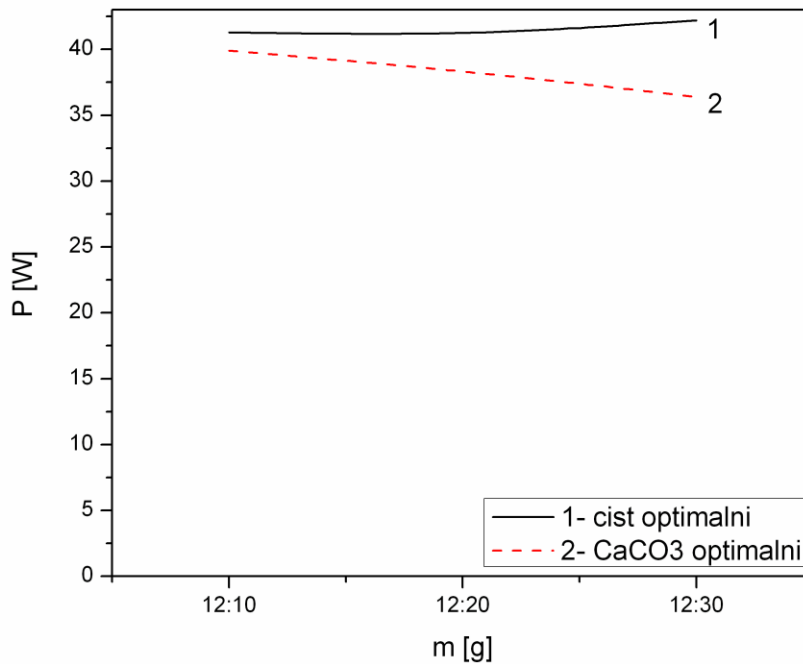
Zavisnost snage od zaprljanosti površine optimalno postavljenog solarnog modula različitim masama kalcijum-karbonata data je na slici 3.67.



Slika 3.67. Zavisnost snage od zaprljanosti površine optimalno postavljenog solarnog modula različitim masama kalcijum-karbonata

Na slici 3.67. se vidi da se kod optimalno postavljenog solarnog modula vrednosti snage smanjuju od 41,3 W za čist, do 36,4 W za modul zaprljan sa 3 g kalcijum-karbonata.

Uredni prikaz snage za čist (1) i kalcijum-karbonatom zaprljan (2) optimalno postavljen solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.68.

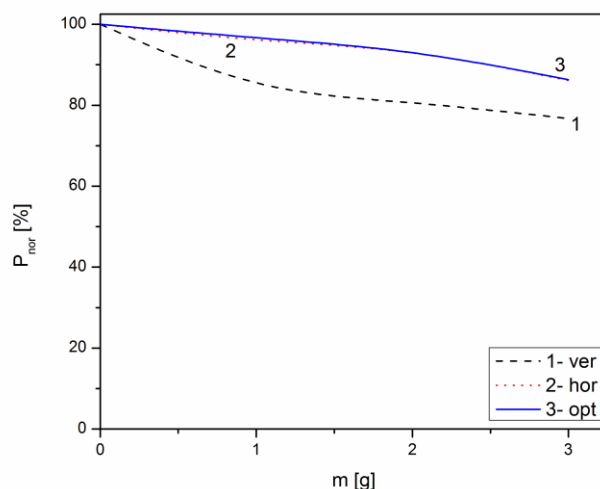


Slika 3.68. Uporedni prikaz snage za čist (1) i kalcijum-karbonatom zaprljan (2) optimalno postavljen solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.68. se vidi da se kod optimalno postavljenih solarnih modula vrednosti snage kreću od 41,3 W do 42,2 W za čist, i od 39,9 W do 36,4 W za modul zaprljan različitim masama kalcijum-karbonata.

Uporedni prikaz

Zavisnost normalizovane snage vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula od zaprljanosti njihove površine različitim masama kalcijum-karbonata data je na slici 3.69.



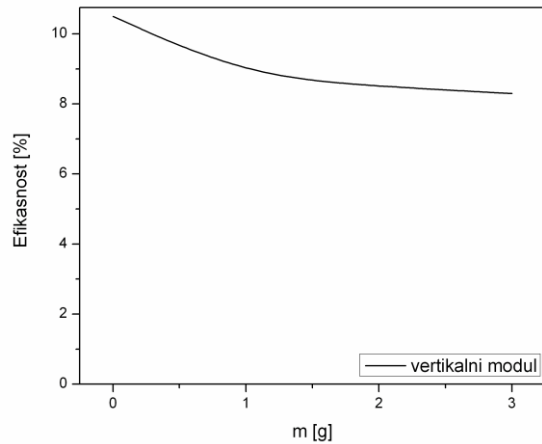
Slika 3.69. Zavisnost normalizovane snage vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula od zaprljanosti njihove površine različitim masama kalcijum-karbonata

Na slici 3.69. se vidi da se snage vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula smanjuju sa povećanjem mase nanetog kalcijum-karbonata. Usled zaprljavanja solarnih modula, intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na njihovu površinu se smanjuje, tako da se smanjuje i snaga solarnih modula. U periodu merenja su intenziteti Sunčevog zračenja koje dospeva na optimalno postavljene i horizontalne solarne module bili mnogo veći od intenziteta Sunčevog zračenja koje dospeva na vertikalne solarne module, tako da je smanjenje snage solarnih modula usled njihovog zaprljanja kalcijum-karbonatom manje kod optimalno orijentisanih i horizontalnih solarnih modula, a veće kod vertikalnih solarnih modula.

3.3.5. Rezultati eksperimentalnog određivanja energetske efikasnosti čistih i kalcijum-karbonatom zaprljanih solarnih modula postavljenih pod različitim uglovima u Nišu

Vertikalni modul

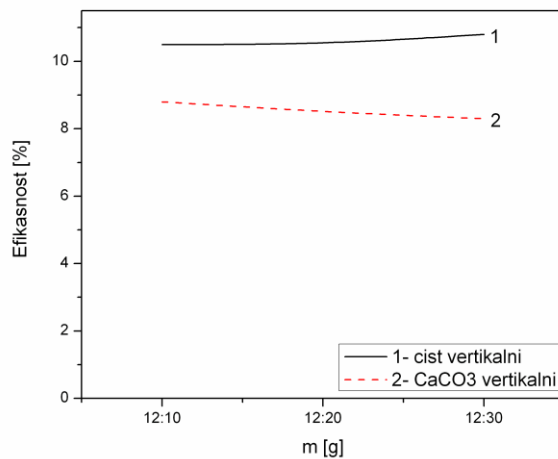
Zavisnost efikasnosti od zaprljanosti površine vertikalno postavljenog solarnog modula različitim masama kalcijum-karbonata data je na slici 3.70.



Slika 3.70. Zavisnost efikasnosti od zaprljanosti površine vertikalno postavljenog solarnog modula različitim masama kalcijum-karbonata

Na slici 3.70. se vidi da se kod vertikalno postavljenog solarnog modula vrednosti efikasnosti smanjuju od 10,5% za čist, do 8,3% za modul zaprljan sa 3 g kalcijum-karbonata.

Uporedni prikaz efikasnosti za čist (1) i kalcijum-karbonatom zaprljan (2) vertikalni solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.71.

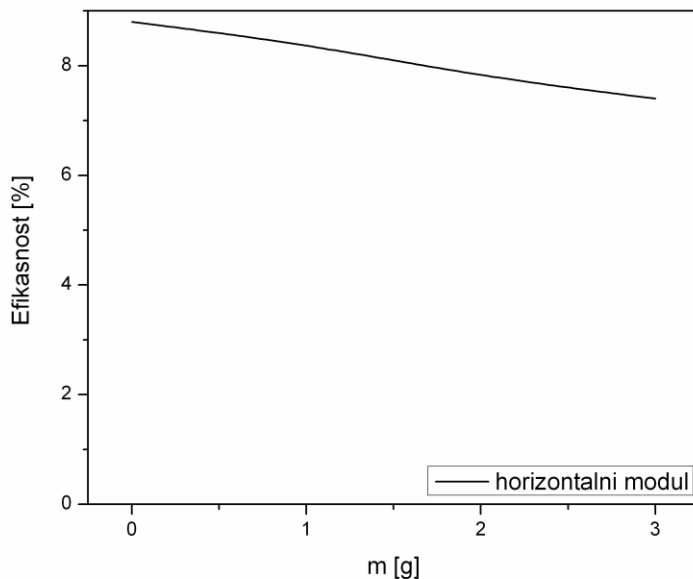


Slika 3.71. Uporedni prikaz efikasnosti za čist (1) i kalcijum-karbonatom zaprljan (2) vertikalni solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.71. se vidi da se kod vertikalno postavljenih solarnih modula vrednosti efikasnosti kreću od 10,5% do 10,8% za čist, i od 8,8% do 8,3% za modul zaprljan različitim masama kalcijum-karbonata.

Horizontalni modul

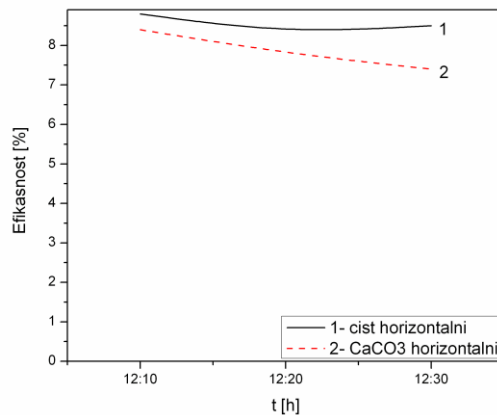
Zavisnost efikasnosti od zaprljanosti površine horizontalno postavljenog solarnog modula različitim masama kalcijum-karbonata data je na slici 3.72.



Slika 3.72. Zavisnost efikasnosti od zaprljanosti površine horizontalno postavljenog solarnog modula različitim masama kalcijum-karbonata

Na slici 3.72. se vidi da se kod horizontalno postavljenog solarnog modula vrednosti efikasnosti smanjuju od 8,8% za čist, do 7,4% za modul zaprljan sa 3 g kalcijum-karbonata.

Uporedni prikaz efikasnosti za čist (1) i kalcijum-karbonatom zaprljan (2) horizontalni solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.73.

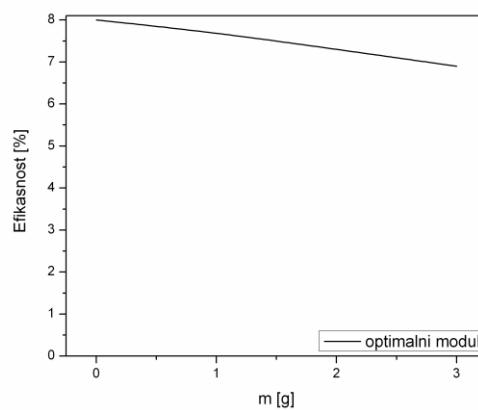


Slika 3.73. Uporedni prikaz efikasnosti za čist (1) i kalcijum-karbonatom zaprljan (2) horizontalni solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.73. se vidi da se kod horizontalno postavljenih solarnih modula vrednosti efikasnosti kreću od 8,8% do 8,5% za čist, i od 8,4% do 7,4% za modul zaprljan različitim masama kalcijum-karbonata.

Optimalno postavljen modul

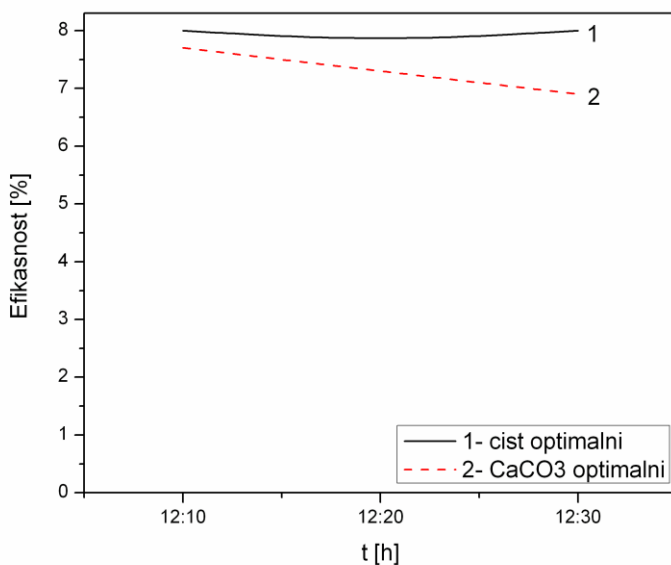
Zavisnost efikasnosti od zaprljanosti površine optimalno postavljenog solarnog modula različitim masama kalcijum-karbonata data je na slici 3.74.



Slika 3.74. Zavisnost efikasnosti od zaprljanosti površine optimalno postavljenog solarnog modula različitim masama kalcijum-karbonata

Na slici 3.74. se vidi da se kod optimalno postavljenog solarnog modula vrednosti efikasnosti smanjuju od 8,0% za čist, do 6,9% za modul zaprljan sa 3 g kalcijum-karbonata.

Uporedni prikaz efikasnosti za čist (1) i kalcijum-karbonatom zaprljan (2) optimalno postavljen solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.75.

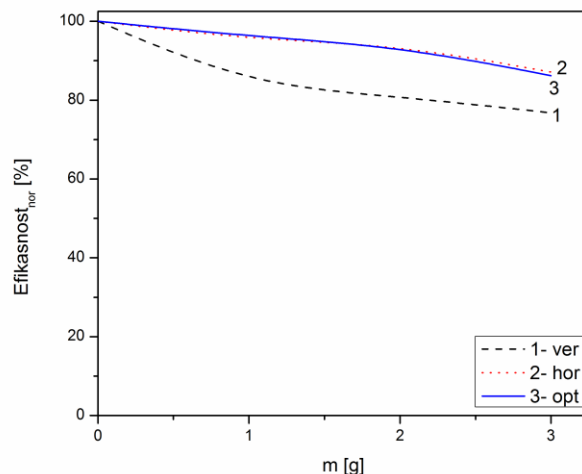


Slika 3.75. Uporedni prikaz efikasnosti za čist (1) i kalcijum-karbonatom zaprljan (2) optimalno postavljen solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.75. se vidi da kod optimalno postavljenih solarnih modula efikasnost ima vrednosti 7,8% i 8,0% za čist solarni modul, i da se vrednosti efikasnosti kreću od 7,7% do 6,9% za modul zaprljan različitim masama kalcijum-karbonata.

Uporedni prikaz

Zavisnost normalizovane efikasnosti vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula od zaprljanosti njihove površine različitim masama kalcijum-karbonata data je na slici 3.76.

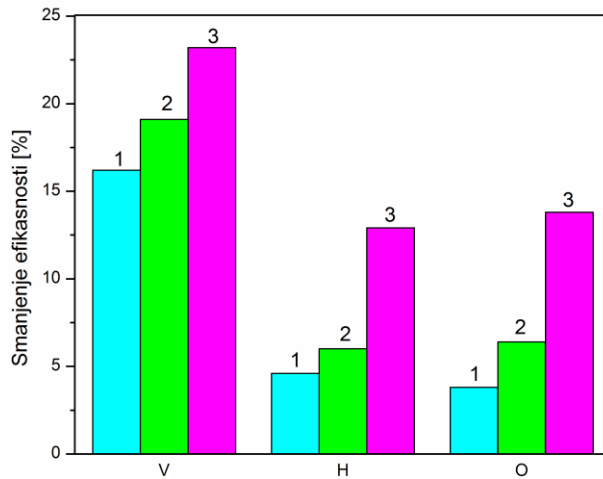


Slika 3.76. Zavisnost normalizovane efikasnosti vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula od zaprljanosti njihove površine različitim masama kalcijum-karbonata

Na slici 3.76. se vidi da se efikasnosti vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula smanjuju sa povećanjem mase nanetog kalcijum-karbonata. Efikasnost solarnih modula je direktno proporcionalna izlaznoj snazi, tako da se efikasnost solarnih modula usled njihovog zaprljanja kalcijum-karbonatom menja na isti način kao i snaga. Smanjenje efikasnosti solarnih modula usled njihovog zaprljanja kalcijum-karbonatom je manje kod optimalno postavljenih i horizontalnih solarnih modula nego kod vertikalnih solarnih modula.

Tabela 3.4. Intenzitet Sunčevog zračenja koje pada na vertikalno, horizontalno i optimalno postavljene solarne module (I_{ver} , I_{hor} , I_{opt}), efikasnosti čistih (η_{cist}) i kalcijum-karbonatom zaprljanih (η_{CaCO_3}) vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih modula, i smanjenje efikasnosti usled zaprljanja vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula ($\Delta\eta$) dana 05.08.2016. godine

t (h)	m (g)	ver				hor				opt			
		I_{ver} (W/m^2)	η_{cist} (%)	η_{CaCO_3} (%)	$\Delta\eta$ (%)	I_{hor} (W/m^2)	η_{cist} (%)	η_{CaCO_3} (%)	$\Delta\eta$ (%)	I_{opt} (W/m^2)	η_{cist} (%)	η_{CaCO_3} (%)	$\Delta\eta$ (%)
12:10	1,0	457,5	10,5	8,8	16,2	902,8	8,8	8,4	4,6	1008,0	8,0	7,7	3,8
12:20	2,0	465,6	10,5	8,5	19,1	918,9	8,3	7,8	6,0	1026,0	7,8	7,3	6,4
12:30	3,0	466,1	10,8	8,3	23,2	919,8	8,5	7,4	12,9	1027,0	8,0	6,9	13,8

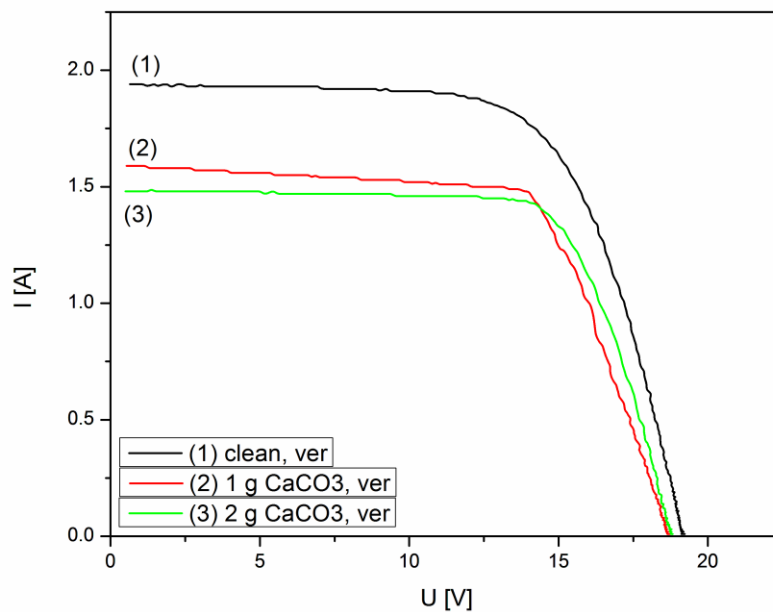


Slika 3.77. Smanjenje efikasnosti vertikalnog (V), horizontalnog (H) i optimalno postavljenog (O) solarnog modula u zavisnosti od mase nanetog kalcijum-karbonata: 1. $m=1$ g, 2. $m=2$ g, 3. $m=3$ g

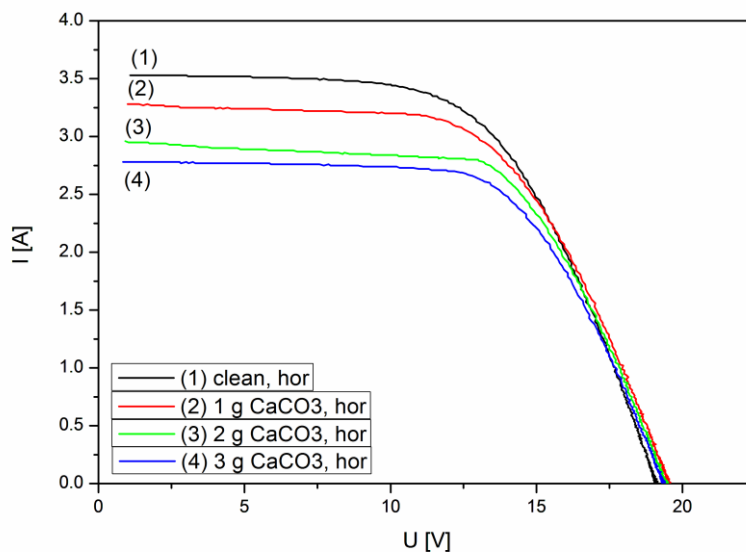
Na osnovu podataka u tabeli 3.4. i na slici 3.77. vidi se da se usled zaprljanja sa 1 g kalcijum-karbonata efikasnost vertikalno postavljenih modula smanjila za 16,2%, horizontalno postavljenih za 4,6% i optimalno postavljenih za 3,8%. Usled zaprljanja sa 2 g kalcijum-karbonata efikasnost vertikalno postavljenih modula se smanjila za 19,1%, horizontalno postavljenih za 6,0% i optimalno postavljenih za 6,4%. Usled zaprljanja sa 3 g kalcijum-karbonata efikasnost vertikalno postavljenih modula se smanjila za 23,2%, horizontalno postavljenih za 12,9% i optimalno postavljenih za 13,8%.

3.3.6. Rezultati eksperimentalnog određivanja strujno-naponskih karakteristika čistih i kalcijum-karbonatom zaprljanih solarnih modula postavljenih pod različitim uglovima u Nišu

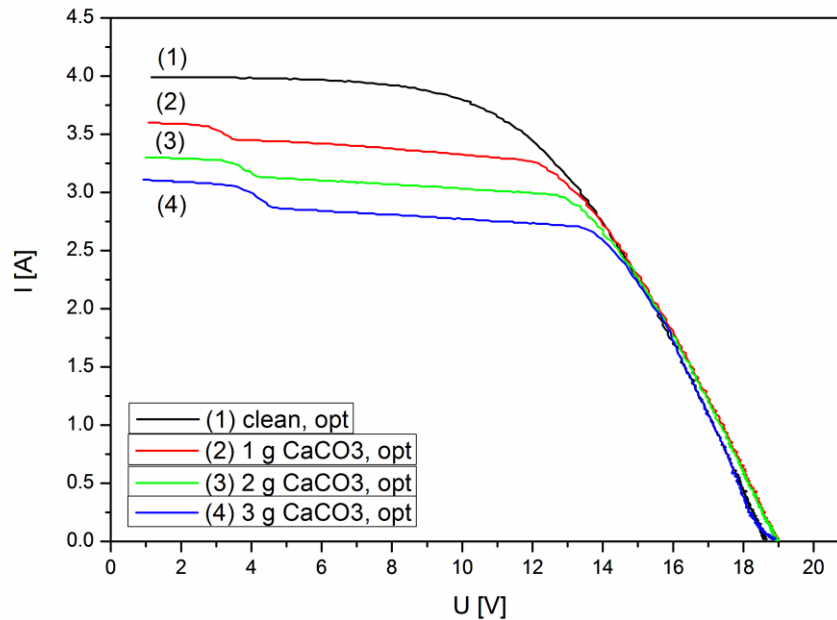
Strujno-naponske karakteristike vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula u zavisnosti od zaprljanosti njihove površine različitim masama kalcijum-karbonata date su na slikama 3.78, 3.79. i 3.80.



Slika 3.78. Strujno-naponske karakteristike vertikalno postavljenih solarnih modula u zavisnosti od zaprljanosti njihove površine različitim masama kalcijum-karbonata



Slika 3.79. Strujno-naponske karakteristike horizontalno postavljenih solarnih modula u zavisnosti od zaprljanosti njihove površine različitim masama kalcijum-karbonata

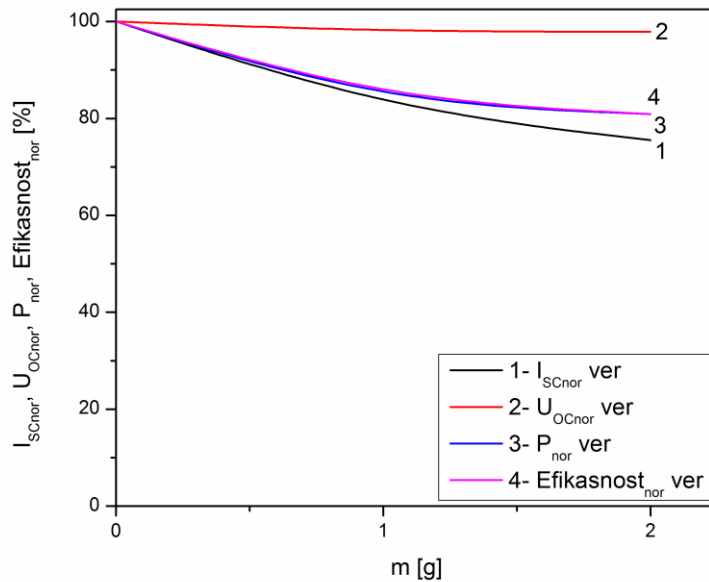


Slika 3.80. Strujno-naponske karakteristike optimalno postavljenih solarnih modula u zavisnosti od zaprljanosti njihove površine različitim masama kalcijum-karbonata

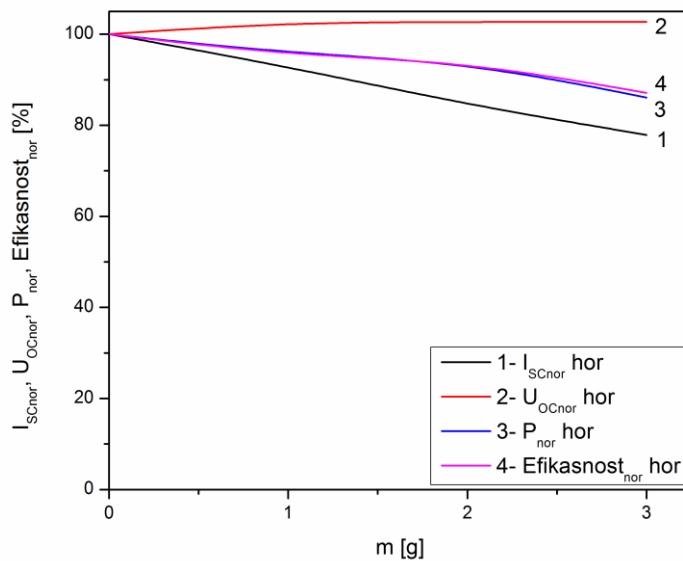
Na slikama 3.78, 3.79. i 3.80. se vidi da se sa povećanjem mase kalcijum-karbonata nanetog na vertikalno, horizontalno i optimalno postavljene solarne module smanjuje njihova struja. Usled zaprljavanja solarnih modula sve većom masom kalcijum-karbonata, intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na njihovu površinu se smanjuje, tako da se smanjuje i struja solarnih modula.

3.3.7. Uporedni prikaz parametara solarnih modula zaprljanih kalcijum-karbonatom

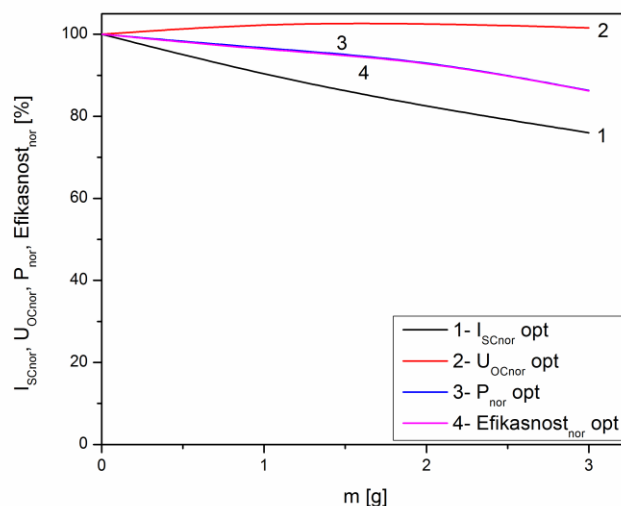
Zavisnost normalizovane I_{sc} , U_{oc} , P i efikasnosti vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula od zaprljanosti njihove površine različitim masama kalcijum-karbonata data je na slikama 3.81, 3.82. i 3.83, respektivno.



Slika 3.81. Zavisnost normalizovane I_{sc} , U_{oc} , P i efikasnosti vertikalno postavljenog solarnog modula od zaprljanosti njegove površine različitim masama kalcijum-karbonata



Slika 3.82. Zavisnost normalizovane I_{sc} , U_{oc} , P i efikasnosti horizontalno postavljenog solarnog modula od zaprljanosti njegove površine različitim masama kalcijum-karbonata



Slika 3.83. Zavisnost normalizovane I_{sc} , U_{oc} , P i efikasnosti optimalno postavljenog solarnog modula od zaprljanosti njegove površine različitim masama kalcijum-karbonata

Na slikama 3.81, 3.82. i 3.83. se vidi da se kod vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula usled njihovog zaprljanja kalcijum-karbonatom najviše smanjuje I_{sc} , zatim P i efikasnost, a U_{oc} se neznatno menja.

3.4. Rezultati ispitivanja energetske efikasnosti solarnih modula u zavisnosti od njihove zaprljanosti zemljom

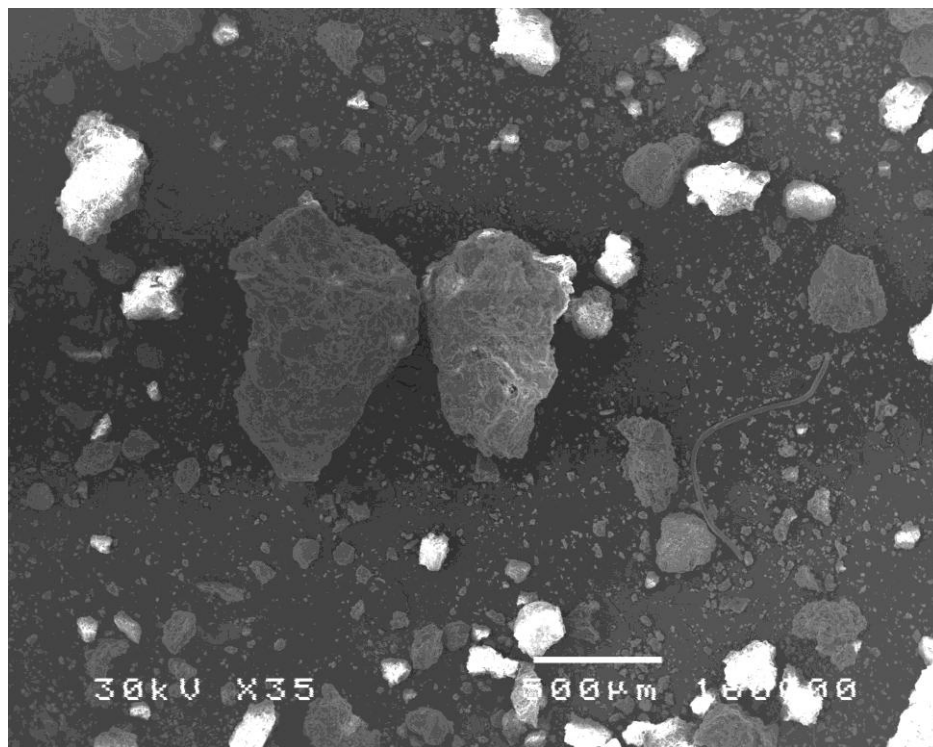
Dana 03.08.2017. godine ispitivan je uticaj različitih masa zemlje na energetske efikasnost solarnih modula postavljenih pod uglovima od 0° , 32° i 90° u odnosu na horizontalnu ravan.

Na dan merenja, 03.08.2017. godine, prvo je očišćeno svih šest solarnih modula kako bi se sa njih uklonila sva nečistoća. Tokom merenja solarni moduli 4, 5 i 6 su sve vreme bili čisti i nisu se zaprljavali. Moduli 1, 2 i 3 su uniformno zaprljavani rasprašivanjem određene količine vode koja sadrži 1 g zemlje nakon čega je u 12:20 h izvršeno prvo merenje. Površina svakog solarnog modula iznosi $S=0,514\text{ m}^2$ pa je koncentracija zemlje na svakom zaprljanom solarnom modulu pre prvog merenja iznosila $1,945\text{ g/m}^2$. Nakon izvršenog prvog merenja su moduli 1, 2 i 3 dodatno uniformno zaprljani rasprašivanjem određene količine vode koja sadrži 1 g zemlje,

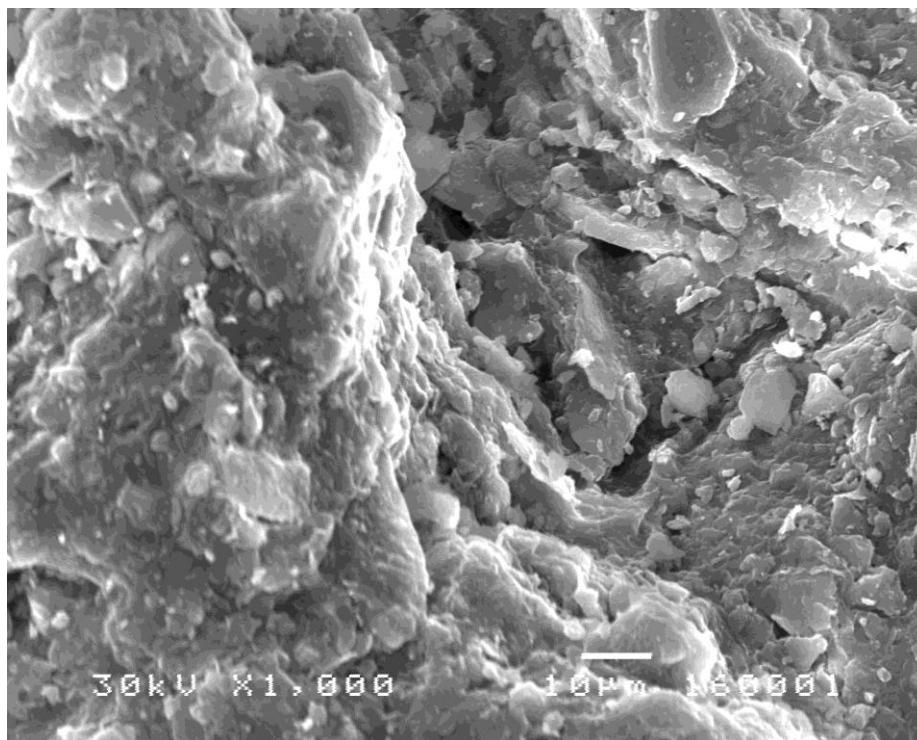
tako da je koncentracija zemlje na zaprljanim solarnim modulima (1, 2 i 3) pre drugog merenja iznosila $3,891 \text{ g/m}^2$, i u 12:30 h je izvršeno drugo merenje. Posle izvršenog drugog merenja su moduli 1, 2 i 3 dodatno uniformno zaprljani rasprašivanjem određene količine vode koja sadrži 1 g zemlje, tako da je koncentracija zemlje na zaprljanim solarnim modulima pre trećeg merenja iznosila $5,837 \text{ g/m}^2$, i u 12:40 h je izvršeno treće merenje.

3.4.1. Rezultati SEM ispitivanja zemlje

SEM fotografije čestica zemlje korišćenih u eksperimentu pri različitim uvećanjima date su na slikama 3.84. i 3.85.



Slika 3.84. SEM fotografija čestica zemlje pri uvećanju od 35 puta



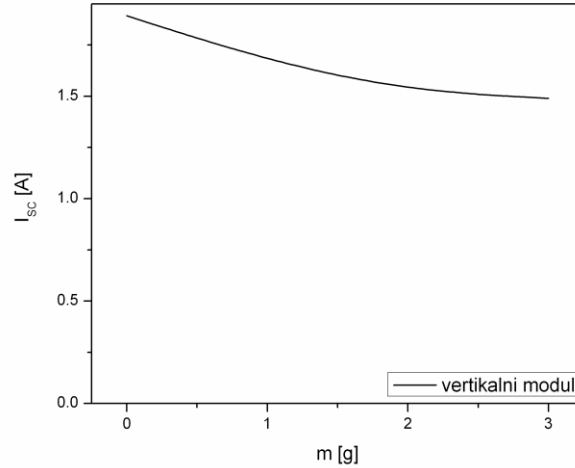
Slika 3.85. SEM fotografija čestica zemlje pri uvećanju od 1000 puta

Na slikama 3.84. i 3.85. se vidi da su dimenzije čestica zemlje veoma različite i imaju vrednost od 20-ak μm pa do 300 μm , a mali broj čestica ima prečnik i do 500 μm . Prostor između čestica zemlje kroz koji svetlost može da prođe veći je nego kod čestica ugljenika.

3.4.2. Rezultati merenja struje kratkog spoja čistih i zemljom zaprljanih solarnih modula postavljenih pod različitim uglovima u Nišu

Vertikalni modul

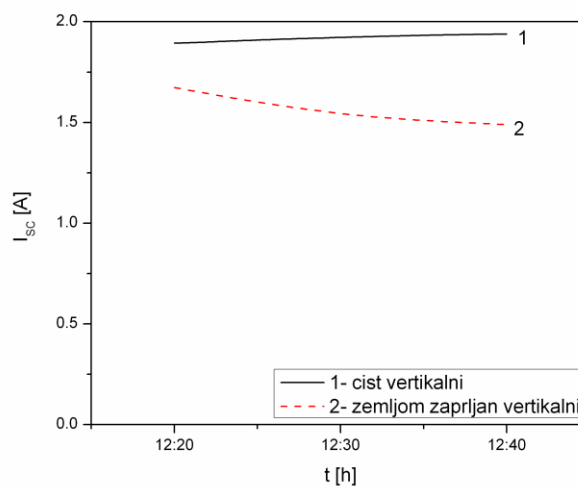
Zavisnost struje kratkog spoja (I_{sc}) od zaprljanosti površine vertikalno postavljenog solarnog modula različitim masama zemlje data je na slici 3.86.



Slika 3.86. Zavisnost I_{sc} od zaprljanosti površine vertikalno postavljenog solarnog modula različitim masama zemlje

Na slici 3.86. se vidi da se kod vertikalno postavljenog solarnog modula vrednosti I_{sc} smanjuju od 1,89 A za čist, do 1,49 A za modul zaprljan sa 3 g zemlje.

Uporedni prikaz I_{sc} za čist (1) i zemljom zaprljan (2) vertikalni solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.87.

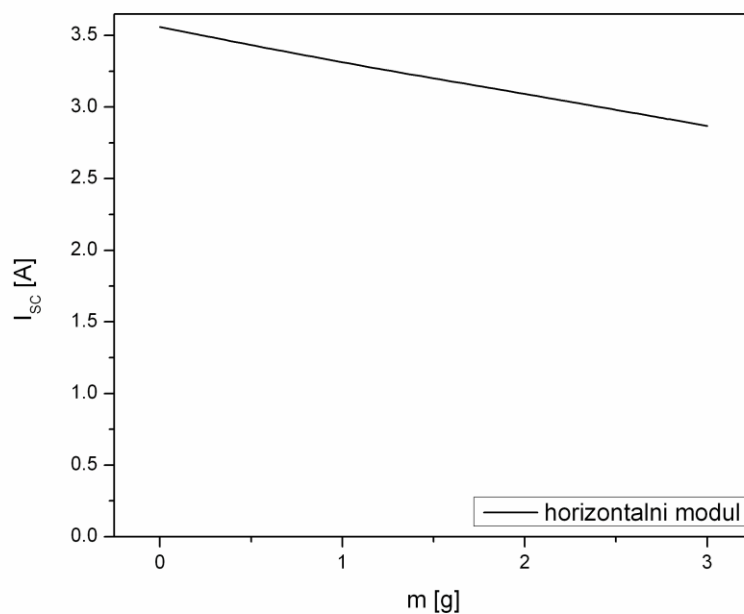


Slika 3.87. Uporedni prikaz I_{sc} za čist (1) i zemljom zaprljan (2) vertikalni solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.87. se vidi da se kod vertikalno postavljenih solarnih modula vrednosti I_{sc} kreću od 1,89 A do 1,94 A za čist, i od 1,67 A do 1,49 A za modul zaprljan različitim masama zemlje.

Horizontalni modul

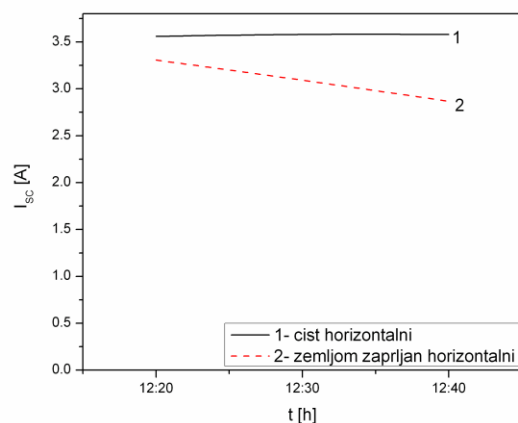
Zavisnost I_{sc} od zaprljanosti površine horizontalno postavljenog solarnog modula različitim masama zemlje data je na slici 3.88.



Slika 3.88. Zavisnost I_{sc} od zaprljanosti površine horizontalno postavljenog solarnog modula različitim masama zemlje

Na slici 3.88. se vidi da se kod horizontalno postavljenog solarnog modula vrednosti I_{sc} smanjuju od 3,56 A za čist, do 2,87 A za modul zaprljan sa 3 g zemlje.

Uporedni prikaz I_{sc} za čist (1) i zemljom zaprljan (2) horizontalni solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.89.

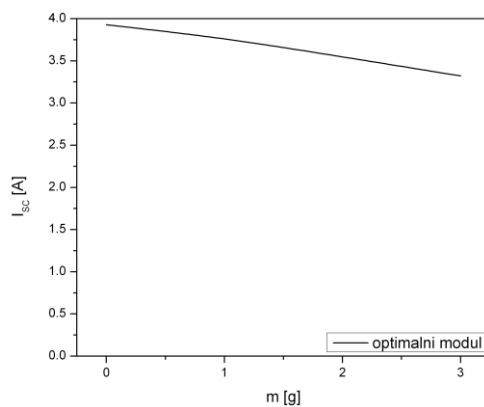


Slika 3.89. Uporedni prikaz I_{sc} za čist (1) i zemljom zaprljan (2) horizontalni solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.89. se vidi da se kod horizontalno postavljenih solarnih modula vrednosti I_{sc} kreću od 3,56 A do 3,58 A za čist, i od 3,31 A do 2,87 A za modul zaprljan različitim masama zemlje.

Optimalno postavljen modul

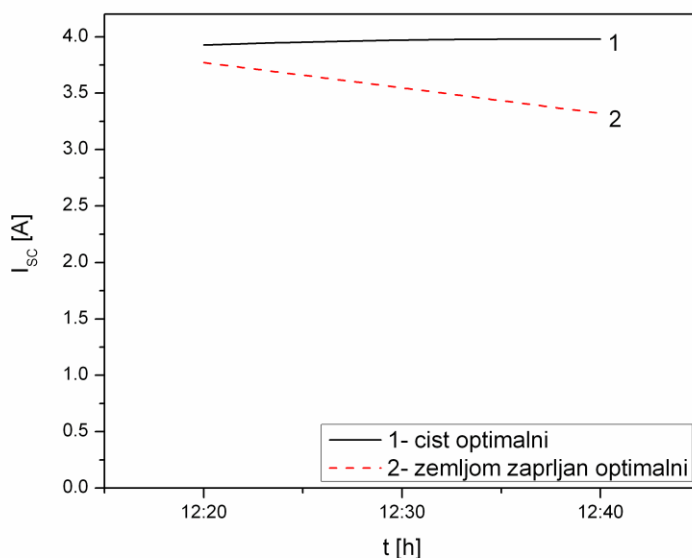
Zavisnost I_{sc} od zaprljanosti površine optimalno postavljenog solarnog modula različitim masama zemlje data je na slici 3.90.



Slika 3.90. Zavisnost I_{sc} od zaprljanosti površine optimalno postavljenog solarnog modula različitim masama zemlje

Na slici 3.90. se vidi da se kod optimalno postavljenog solarnog modula vrednosti I_{sc} smanjuju od 3,93 A za čist, do 3,32 A za modul zaprljan sa 3 g zemlje.

Uporedni prikaz I_{sc} za čist (1) i zemljom zaprljan (2) optimalno postavljen solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.91.

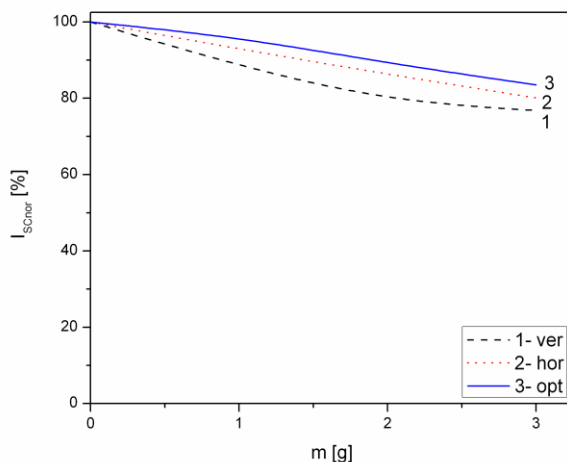


Slika 3.91. Uporedni prikaz I_{sc} za čist (1) i zemljom zaprljan (2) optimalno postavljen solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.91. se vidi da se kod optimalno postavljenih solarnih modula vrednosti I_{sc} kreću od 3,93 A do 3,98 A za čist, i od 3,77 A do 3,32 A za modul zaprljan različitim masama zemlje.

Uporedni prikaz

Zavisnost normalizovane struje kratkog spoja vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula od zaprljanosti njihove površine različitim masama zemlje data je na slici 3.92.



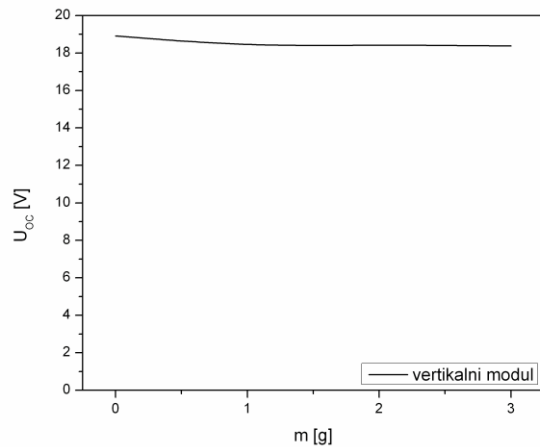
Slika 3.92. Zavisnost normalizovane struje kratkog spoja vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula od zaprljanosti njihove površine različitim masama zemlje

Na slici 3.92. se vidi da se struje kratkog spoja vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula smanjuju sa povećanjem mase nanete zemlje. Usled zaprljavanja solarnih modula, intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na njihovu površinu se smanjuje, tako da se smanjuje i struja kratkog spoja solarnih modula. U periodu merenja je intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na optimalno postavljene solarne module bio najveći, intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na horizontalne solarne module je bio malo manji, a intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na vertikalne solarne module je bio duplo manji, tako da je smanjenje struje kratkog spoja solarnih modula usled njihovog zaprljanja zemljom najmanje kod optimalno postavljenih solarnih modula, a najveće kod vertikalnih solarnih modula.

3.4.3. Rezultati merenja napona otvorenog kola čistih i zemljom zaprljanih solarnih modula postavljenih pod različitim uglovima u Nišu

Vertikalni modul

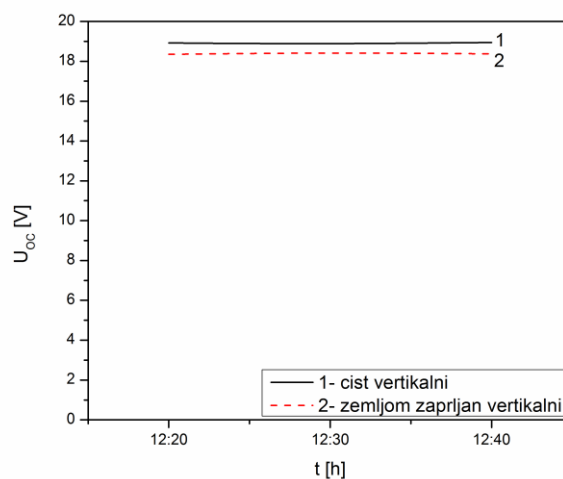
Zavisnost napona otvorenog kola (U_{oc}) od zaprljanosti površine vertikalno postavljenog solarnog modula različitim masama zemlje data je na slici 3.93.



Slika 3.93. Zavisnost U_{oc} od zaprljanosti površine vertikalno postavljenog solarnog modula različitim masama zemlje

Na slici 3.93. se vidi da se kod vertikalno postavljenog solarnog modula vrednosti U_{oc} smanjuju od 18,9 V za čist, do 18,4 V za modul zaprljan sa 3 g zemlje.

Uporedni prikaz U_{oc} za čist (1) i zemljom zaprljan (2) vertikalni solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.94.

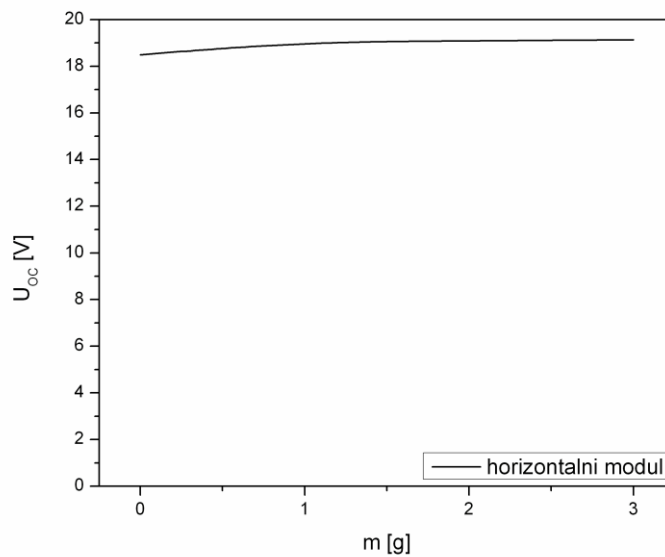


Slika 3.94. Uporedni prikaz U_{oc} za čist (1) i zemljom zaprljan (2) vertikalni solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.94. se vidi da je kod vertikalno postavljenih solarnih modula vrednost U_{oc} za čist solarni modul tokom merenja konstantna i iznosi 18,9 V, a da se vrednosti U_{oc} kreću od 18,3 V do 18,4 V za modul zaprljan različitim masama zemlje.

Horizontalni modul

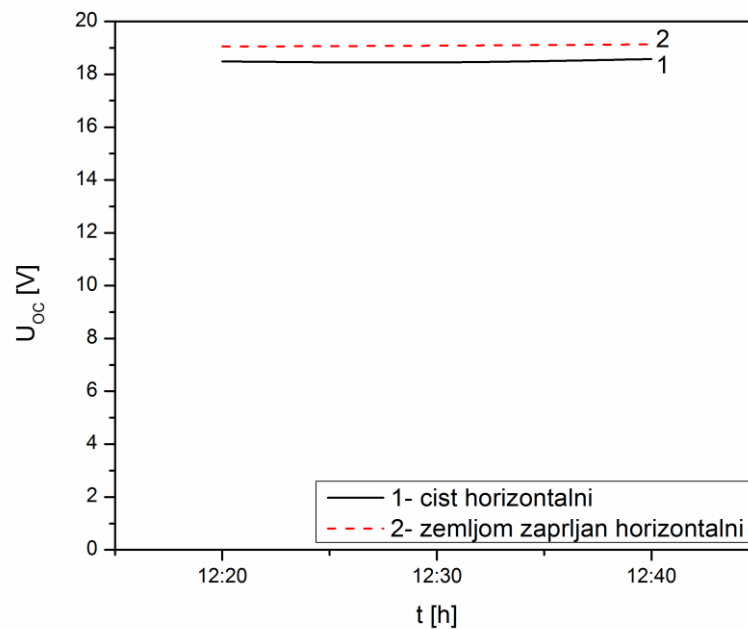
Zavisnost U_{oc} od zaprljanosti površine horizontalno postavljenog solarnog modula različitim masama zemlje data je na slici 3.95.



Slika 3.95. Zavisnost U_{oc} od zaprljanosti površine horizontalno postavljenog solarnog modula različitim masama zemlje

Na slici 3.95. se vidi da se kod horizontalno postavljenog solarnog modula vrednosti U_{oc} kreću od 18,5 V za čist, do 19,1 V za modul zaprljan sa 3 g zemlje. Do blagog porasta U_{oc} horizontalno postavljenog solarnog modula usled zaprljanja zemljom dolazi zbog smanjenja intenziteta Sunčevog zračenja koje dospeva na njegovu površinu, pri čemu se smanjuje i njegova temperatura, a sa smanjenjem temperature dolazi do blagog porasta U_{oc} .

Uporedni prikaz U_{oc} za čist (1) i zemljom zaprljan (2) horizontalni solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.96.

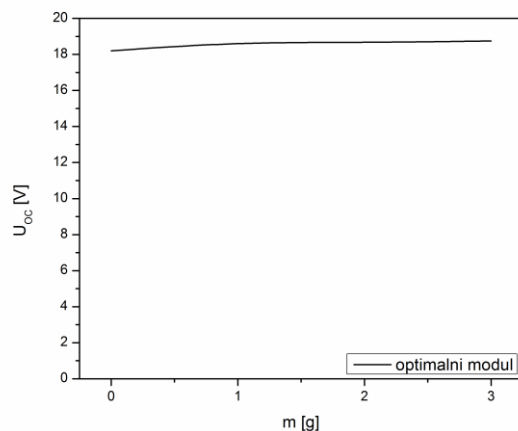


Slika 3.96. Uporedni prikaz U_{oc} za čist (1) i zemljom zaprljan (2) horizontalni solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.96. se vidi da se kod horizontalno postavljenih solarnih modula vrednosti U_{oc} kreću od 18,5 V do 18,6 V za čist, i od 19,0 V do 19,1 V za modul zaprljan različitim masama zemlje. Na slici 3.96. se vidi da su izmerene veće vrednosti U_{oc} za zaprljan nego za čist solarni modul. To se može objasniti činjenicom da se usled nanošenja zemlje na horizontalni solarni modul smanjuje intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na njegovu površinu, pri čemu se smanjuje i njegova temperatura, a sa smanjenjem temperature dolazi do blagog porasta U_{oc} .

Optimalno postavljen modul

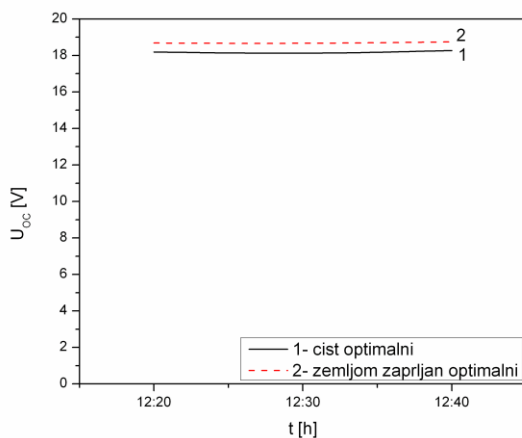
Zavisnost U_{oc} od zaprljanosti površine optimalno postavljenog solarnog modula različitim masama zemlje data je na slici 3.97.



Slika 3.97. Zavisnost U_{oc} od zaprljanosti površine optimalno postavljenog solarnog modula različitim masama zemlje

Na slici 3.97. se vidi da se kod optimalno postavljenog solarnog modula vrednosti U_{oc} kreću od 18,2 V za čist, do 18,7 V za modul zaprljan sa 3 g zemlje. Do blagog porasta U_{oc} optimalno postavljenog solarnog modula usled zaprljanja zemljom dolazi zbog smanjenja intenziteta Sunčevog zračenja koje dospeva na njegovu površinu, pri čemu se smanjuje i njegova temperatura, a sa smanjenjem temperature dolazi do blagog porasta U_{oc} .

Uporedni prikaz U_{oc} za čist (1) i zemljom zaprljan (2) optimalno postavljen solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.98.

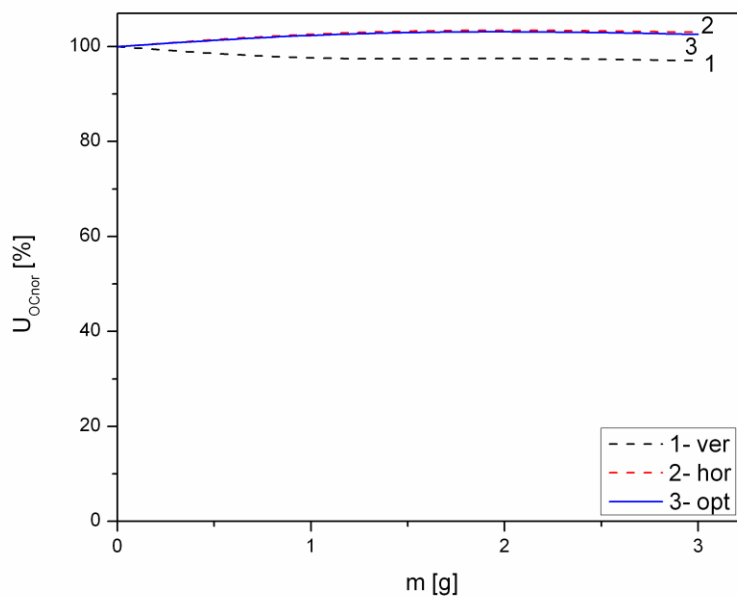


Slika 3.98. Uporedni prikaz U_{oc} za čist (1) i zemljom zaprljan (2) optimalno postavljen solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.98. se vidi da se kod optimalno postavljenih solarnih modula vrednosti U_{oc} kreću od 18,2 V do 18,3 V za čist solarni modul, i da U_{oc} ima vrednosti 18,6 V i 18,7 V za modul zaprljan različitim masama zemlje. Na slici 3.98. se vidi da su izmerene veće vrednosti U_{oc} za zaprljan nego za čist solarni modul. To se može objasniti činjenicom da se usled nanošenja zemlje na optimalni solarni modul smanjuje intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na njegovu površinu, pri čemu se smanjuje i njegova temperatura, a sa smanjenjem temperature dolazi do blagog porasta U_{oc} .

Uporedni prikaz

Zavisnost normalizovanog napona otvorenog kola vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula od zaprljanosti njihove površine različitim masama zemlje data je na slici 3.99.



Slika 3.99. Zavisnost normalizovanog napona otvorenog kola vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula od zaprljanosti njihove površine različitim masama zemlje

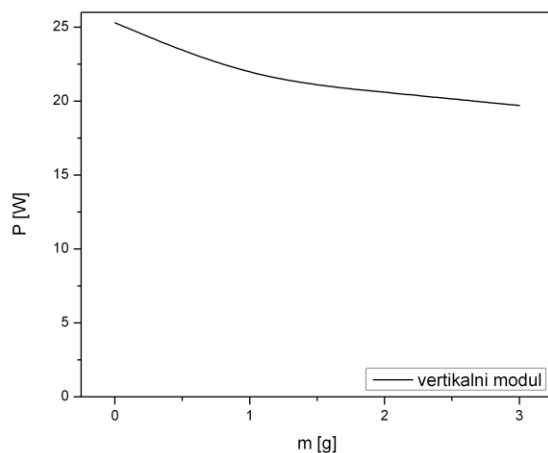
Na slici 3.99. se vidi da napon otvorenog kola horizontalno i optimalno postavljenih modula blago raste, a da napon otvorenog kola vertikalno postavljenog modula blago opada sa porastom mase nanete zemlje. Usled zaprljavanja solarnih modula, intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na njihovu površinu se smanjuje, a samim tim i temperatura solarnih modula, tako da se napon otvorenog kola solarnih modula vrlo malo povećava.

U periodu merenja je intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na optimalno postavljene solarne module bio najveći, a intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na horizontalne solarne module je bio malo manji, tako da se vrednosti napona otvorenog kola horizontalno i optimalno postavljenih modula usled zaprljavanja zemljom menjaju na isti način i usled smanjenja intenziteta Sunčevog zračenja vrlo blago rastu. Intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na vertikalne solarne module je u periodu merenja bio duplo manji od intenziteta Sunčevog zračenja koje dospeva na horizontalno i optimalno postavljene module, tako da se vrednosti napona otvorenog kola vertikalnih modula usled zaprljavanja zemljom veoma malo smanjuju.

3.4.4. Rezultati merenja maksimalne snage čistih i zemljom zaprljanih solarnih modula postavljenih pod različitim uglovima u Nišu

Vertikalni modul

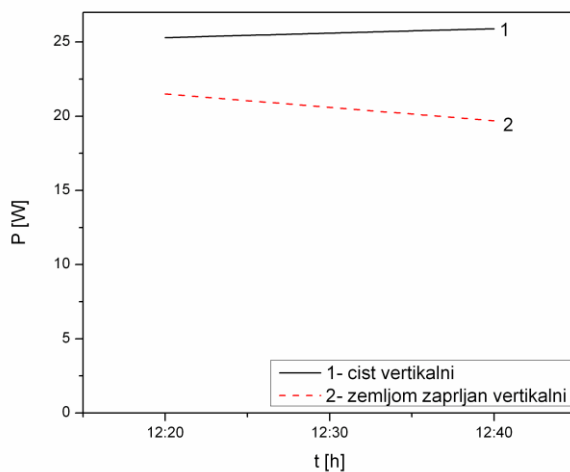
Zavisnost snage od zaprljanosti površine vertikalno postavljenog solarnog modula različitim masama zemlje data je na slici 3.100.



Slika 3.100. Zavisnost snage od zaprljanosti površine vertikalno postavljenog solarnog modula različitim masama zemlje

Na slici 3.100. se vidi da se kod vertikalno postavljenog solarnog modula vrednosti snage smanjuju od 25,3 W za čist, do 19,7 W za modul zaprljan sa 3 g zemlje.

Uporedni prikaz snage za čist (1) i zemljom zaprljan (2) vertikalni solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.101.

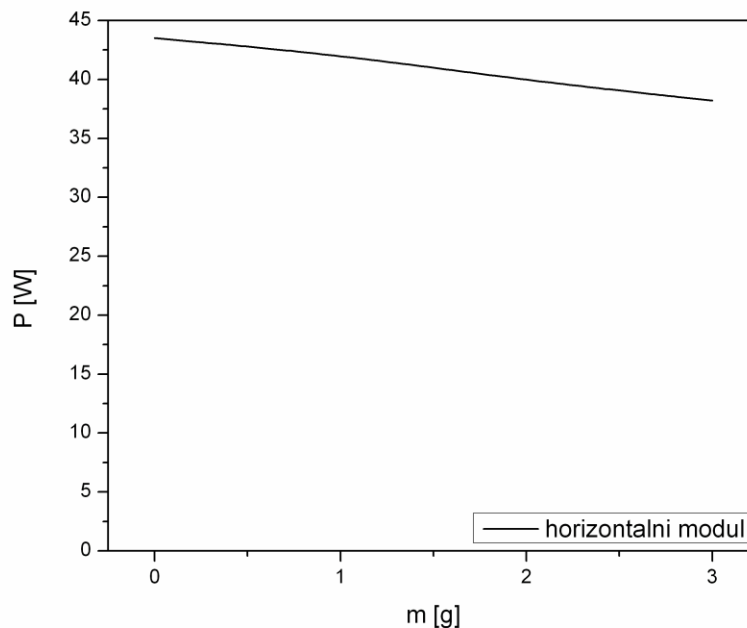


Slika 3.101. Uporedni prikaz snage za čist (1) i zemljom zaprljan (2) vertikalni solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.101. se vidi da se kod vertikalno postavljenih solarnih modula vrednosti snage kreću od 25,3 W do 25,9 W za čist, i od 21,5 W do 19,7 W za modul zaprljan različitim masama zemlje.

Horizontalni modul

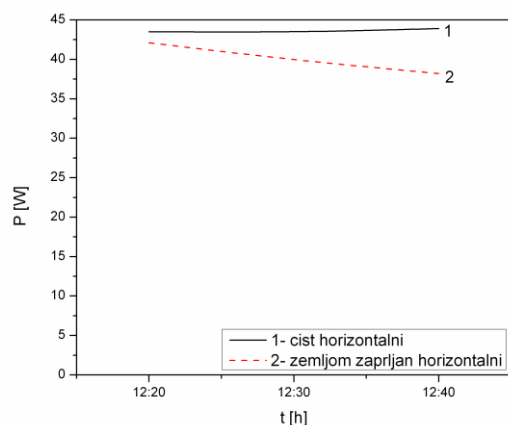
Zavisnost snage od zaprljanosti površine horizontalno postavljenog solarnog modula različitim masama zemlje data je na slici 3.102.



Slika 3.102. Zavisnost snage od zaprljanosti površine horizontalno postavljenog solarnog modula različitim masama zemlje

Na slici 3.102. se vidi da se kod horizontalno postavljenog solarnog modula vrednosti snage smanjuju od 43,5 W za čist, do 38,2 W za modul zaprljan sa 3 g zemlje.

Uporedni prikaz snage za čist (1) i zemljom zaprljan (2) horizontalni solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.103.

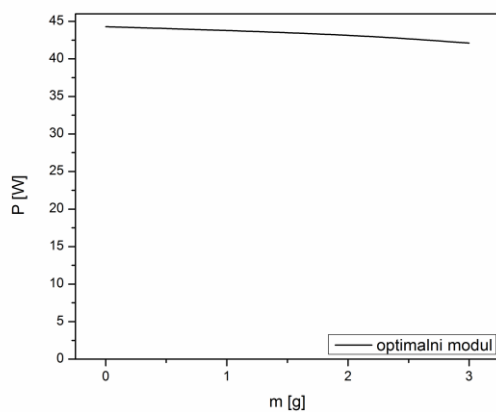


Slika 3.103. Uporedni prikaz snage za čist (1) i zemljom zaprljan (2) horizontalni solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.103. se vidi da se kod horizontalno postavljenih solarnih modula vrednosti snage kreću od 43,5 W do 43,9 W za čist, i od 42,1 W do 38,2 W za modul zaprljan različitim masama zemlje.

Optimalno postavljen modul

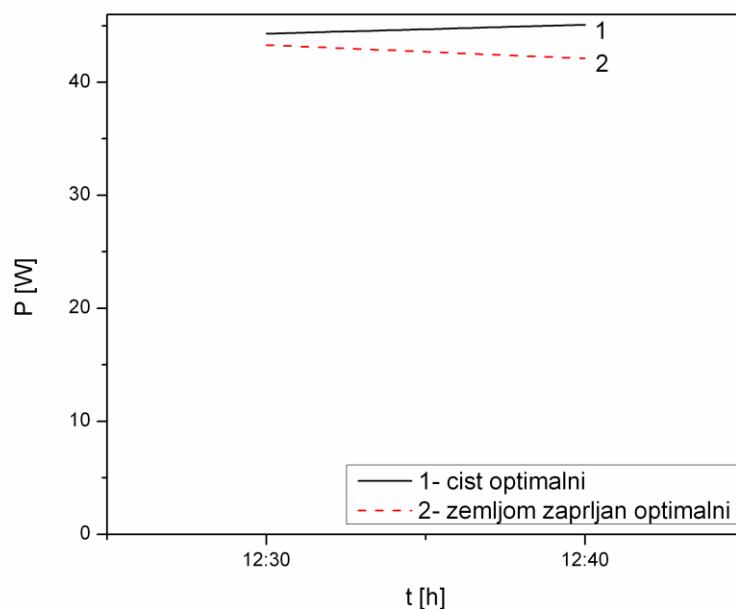
Zavisnost snage od zaprljanosti površine optimalno postavljenog solarnog modula različitim masama zemlje data je na slici 3.104.



Slika 3.104. Zavisnost snage od zaprljanosti površine optimalno postavljenog solarnog modula različitim masama zemlje

Na slici 3.104. se vidi da se kod optimalno postavljenog solarnog modula vrednosti snage smanjuju od 44,3 W za čist, do 42,1 W za modul zaprljan sa 3 g zemlje.

Uporedni prikaz snage za čist (1) i zemljom zaprljan (2) optimalno postavljen solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.105.

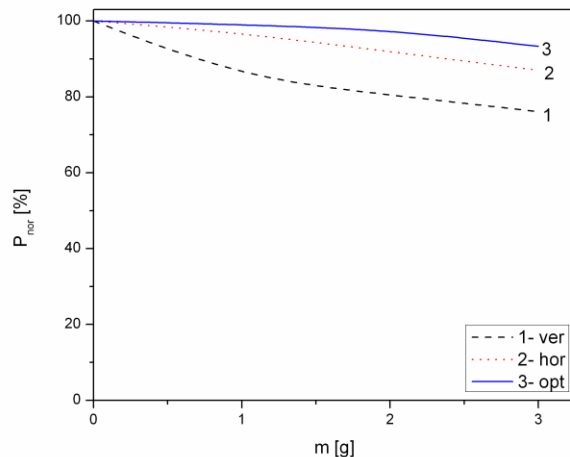


Slika 3.105. Uporedni prikaz snage za čist (1) i zemljom zaprljan (2) optimalno postavljen solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.105. se vidi da se kod optimalno postavljenih solarnih modula vrednosti snage kreću od 44,3 W do 45,1 W za čist, i od 43,3 W do 42,1 W za modul zaprljan različitim masama zemlje.

Uporedni prikaz

Zavisnost normalizovane snage vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula od zaprljanosti njihove površine različitim masama zemlje data je na slici 3.106.



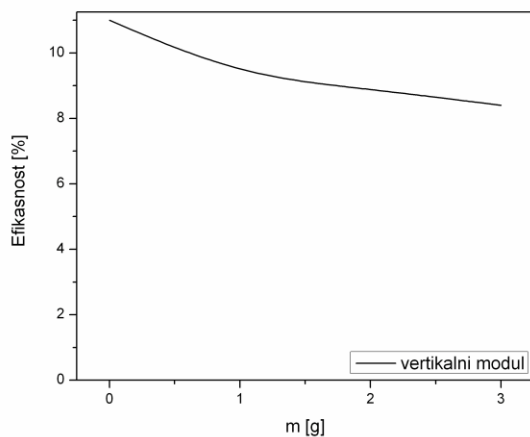
Slika 3.106. Zavisnost normalizovane snage vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula od zaprljanosti njihove površine različitim masama zemlje

Na slici 3.106. se vidi da se snage vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula smanjuju sa povećanjem mase nanete zemlje. Usled zaprljavanja solarnih modula, intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na njihovu površinu se smanjuje, tako da se smanjuje i snaga solarnih modula. U periodu merenja je intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na optimalno postavljene solarne module bio najveći, intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na horizontalne solarne module je bio malo manji, a intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na vertikalne solarne module je bio duplo manji, tako da je smanjenje snage usled zaprljanja zemljom najmanje kod optimalno postavljenih solarnih modula, a najveće kod vertikalnih solarnih modula.

3.4.5. Rezultati eksperimentalnog određivanja energetske efikasnosti čistih i zemljom zaprljanih solarnih modula postavljenih pod različitim uglovima u Nišu

Vertikalni modul

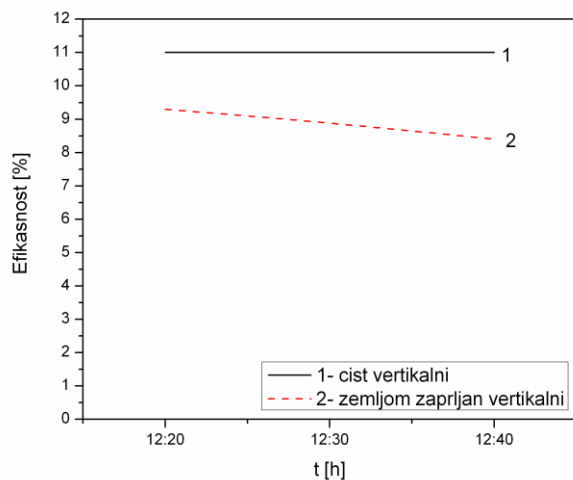
Zavisnost efikasnosti od zaprljanosti površine vertikalno postavljenog solarnog modula različitim masama zemlje data je na slici 3.107.



Slika 3.107. Zavisnost efikasnosti od zaprljanosti površine vertikalno postavljenog solarnog modula različitim masama zemlje

Na slici 3.107. se vidi da se kod vertikalno postavljenog solarnog modula vrednosti efikasnosti smanjuju od 11,0% za čist, do 8,4% za modul zaprljan sa 3 g zemlje.

Uporedni prikaz efikasnosti za čist (1) i zemljom zaprljan (2) vertikalni solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.108.

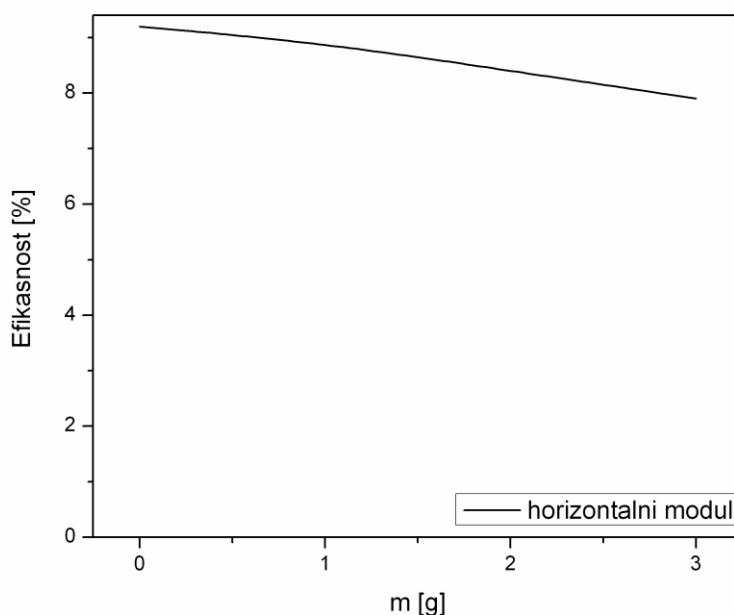


Slika 3.108. Uporedni prikaz efikasnosti za čist (1) i zemljom zaprljan (2) vertikalni solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.108. se vidi da je kod vertikalno postavljenih solarnih modula vrednost efikasnosti za čist solarni modul tokom merenja konstantna i iznosi 11,0%, a da se vrednosti efikasnosti kreću od 9,3% do 8,4% za modul zaprljan različitim masama zemlje.

Horizontalni modul

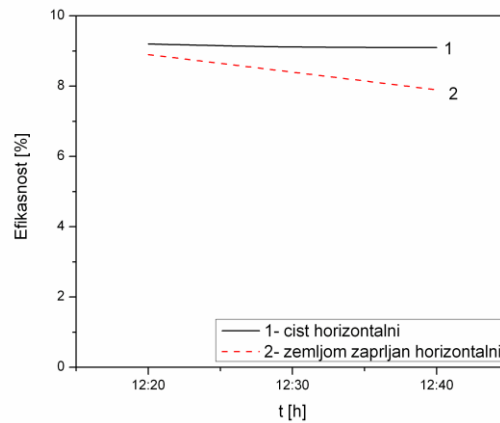
Zavisnost efikasnosti od zaprljanosti površine horizontalno postavljenog solarnog modula različitim masama zemlje data je na slici 3.109.



Slika 3.109. Zavisnost efikasnosti od zaprljanosti površine horizontalno postavljenog solarnog modula različitim masama zemlje

Na slici 3.109. se vidi da se kod horizontalno postavljenog solarnog modula vrednosti efikasnosti smanjuju od 9,2% za čist, do 7,9% za modul zaprljan sa 3 g zemlje.

Uporedni prikaz efikasnosti za čist (1) i zemljom zaprljan (2) horizontalni solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.110.

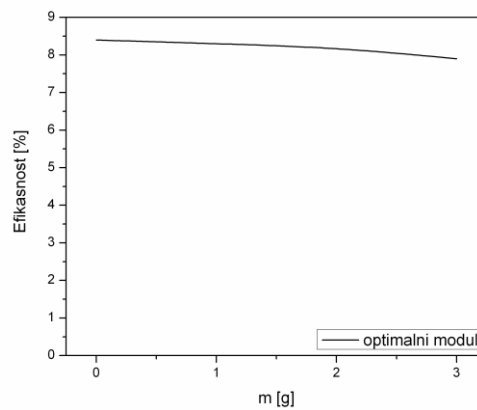


Slika 3.110. Uporedni prikaz efikasnosti za čist (1) i zemljom zaprljan (2) horizontalni solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.110. se vidi da se kod horizontalno postavljenih solarnih modula vrednosti efikasnosti kreću od 9,2% do 9,1% za čist, i od 8,9% do 7,9% za modul zaprljan različitim masama zemlje.

Optimalno postavljen modul

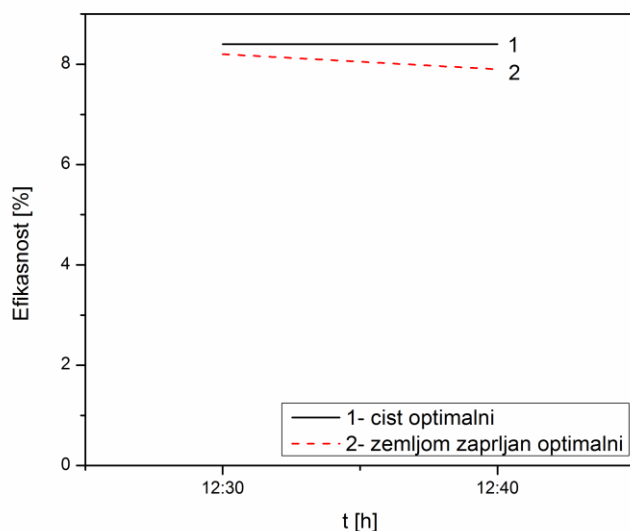
Zavisnost efikasnosti od zaprljanosti površine optimalno postavljenog solarnog modula različitim masama zemlje data je na slici 3.111.



Slika 3.111. Zavisnost efikasnosti od zaprljanosti površine optimalno postavljenog solarnog modula različitim masama zemlje

Na slici 3.111. se vidi da se kod optimalno postavljenog solarnog modula vrednosti efikasnosti smanjuju od 8,4% za čist, do 7,9% za modul zaprljan sa 3 g zemlje.

Uporedni prikaz efikasnosti za čist (1) i zemljom zaprljan (2) optimalno postavljen solarni modul od vremena u toku dana dat je na slici 3.112.

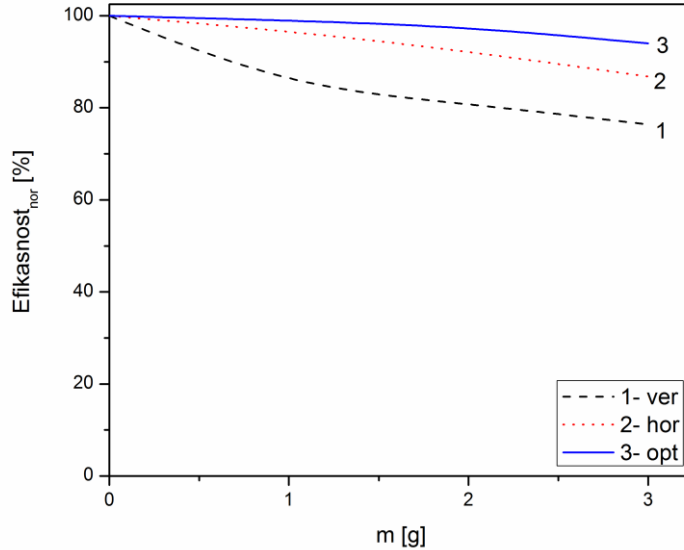


Slika 3.112. Uporedni prikaz efikasnosti za čist (1) i zemljom zaprljan (2) optimalno postavljen solarni modul od vremena u toku dana

Na slici 3.112. se vidi da je kod optimalno postavljenih solarnih modula vrednost efikasnosti za čist solarni modul tokom merenja konstantna i iznosi 8,4%, a da se vrednosti efikasnosti kreću od 8,2% do 7,9% za modul zaprljan različitim masama zemlje.

Uporedni prikaz

Zavisnost normalizovane efikasnosti vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula od zaprljanosti njihove površine različitim masama zemlje data je na slici 3.113.

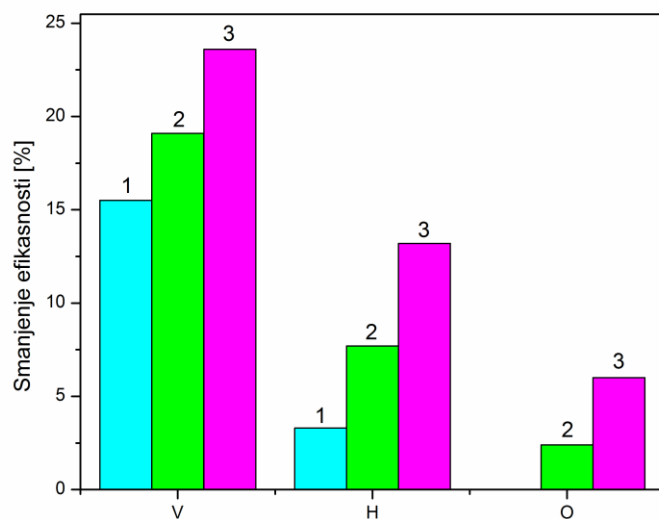


Slika 3.113. Zavisnost normalizovane efikasnosti vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula od zaprljanosti njihove površine različitim masama zemlje

Na slici 3.113. se vidi da se efikasnosti vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula smanjuju sa povećanjem mase nanete zemlje. Efikasnost solarnih modula je direktno proporcionalna izlaznoj snazi, tako da se efikasnost solarnih modula usled njihovog zaprljanja zemljom menja na isti način kao i snaga. Smanjenje efikasnosti solarnih modula usled njihovog zaprljanja zemljom je najmanje kod optimalno postavljenih solarnih modula, a najveće kod vertikalnih solarnih modula.

Tabela 3.5. Intenzitet Sunčevog zračenja koje pada na vertikalno, horizontalno i optimalno postavljene solarne module (I_{ver} , I_{hor} , I_{opt}), efikasnosti čistih (η_{cist}) i zemljom zaprljanih (η_{zemlja}) vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih modula, i smanjenje efikasnosti usled zaprljanja vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula ($\Delta\eta$) dana 03.08.2017. godine

t (h)	m (g)	ver				hor				opt			
		I_{ver} (W/m ²)	η_{cist} (%)	η_{zemlja} (%)	$\Delta\eta$ (%)	I_{hor} (W/m ²)	η_{cist} (%)	η_{zemlja} (%)	$\Delta\eta$ (%)	I_{opt} (W/m ²)	η_{cist} (%)	η_{zemlja} (%)	$\Delta\eta$ (%)
12:20	1,0	447,5	11,0	9,3	15,5	920,8	9,2	8,9	3,3	1018,0	/	/	/
12:30	2,0	451,4	11,0	8,9	19,1	928,9	9,1	8,4	7,7	1027,0	8,4	8,2	2,4
12:40	3,0	457,6	11,0	8,4	23,6	941,6	9,1	7,9	13,2	1041,0	8,4	7,9	6,0

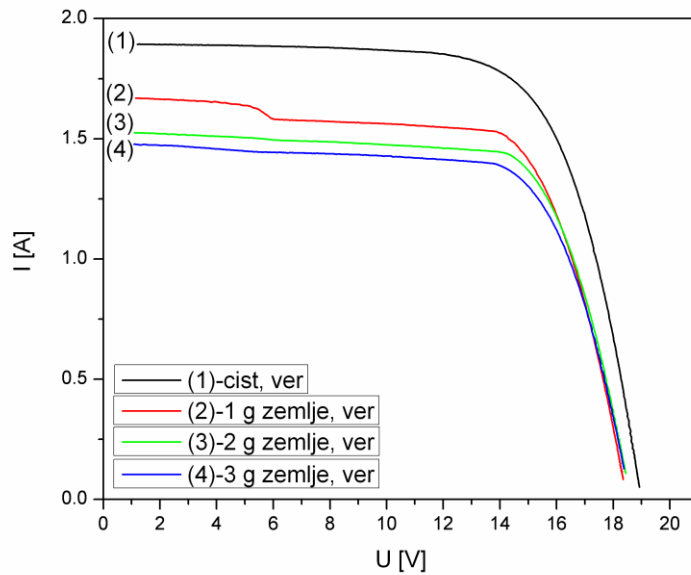


Slika 3.114. Smanjenje efikasnosti vertikalnog (V), horizontalnog (H) i optimalno postavljenog (O) solarnog modula u zavisnosti od mase nanete zemlje: 1. m=1 g, 2. m=2 g, 3. m=3 g

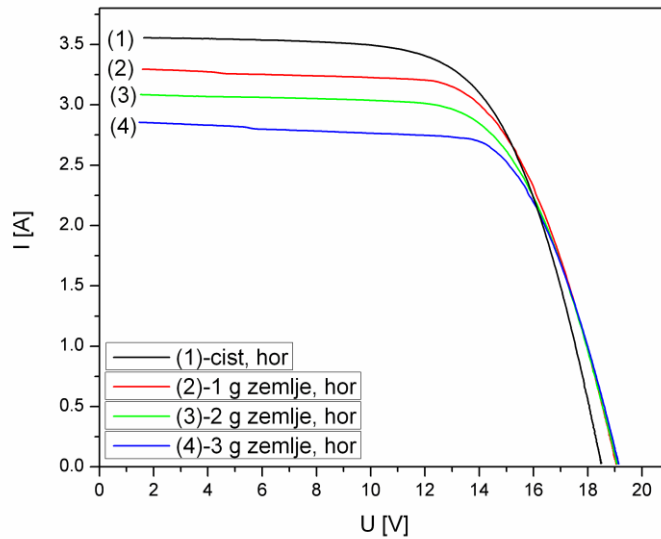
Na osnovu podataka u tabeli 3.5. i na slici 3.114. vidi se da se usled zaprljanja sa 1 g zemlje efikasnost vertikalno postavljenog modula smanjila za 15,5% i horizontalno postavljenog za 3,3%. Usled zaprljanja sa 2 g zemlje efikasnost vertikalno postavljenog modula smanjila se za 19,1%, horizontalno postavljenog za 7,7% i optimalno postavljenog za 2,4%. Usled zaprljanja sa 3 g zemlje efikasnost vertikalno postavljenog modula smanjila se za 23,6%, horizontalno postavljenog za 13,2% i optimalno postavljenog za 6,0%.

3.4.6. Rezultati eksperimentalnog određivanja strujno-naponskih karakteristika čistih i zemljom zaprljanih solarnih modula postavljenih pod različitim uglovima u Nišu

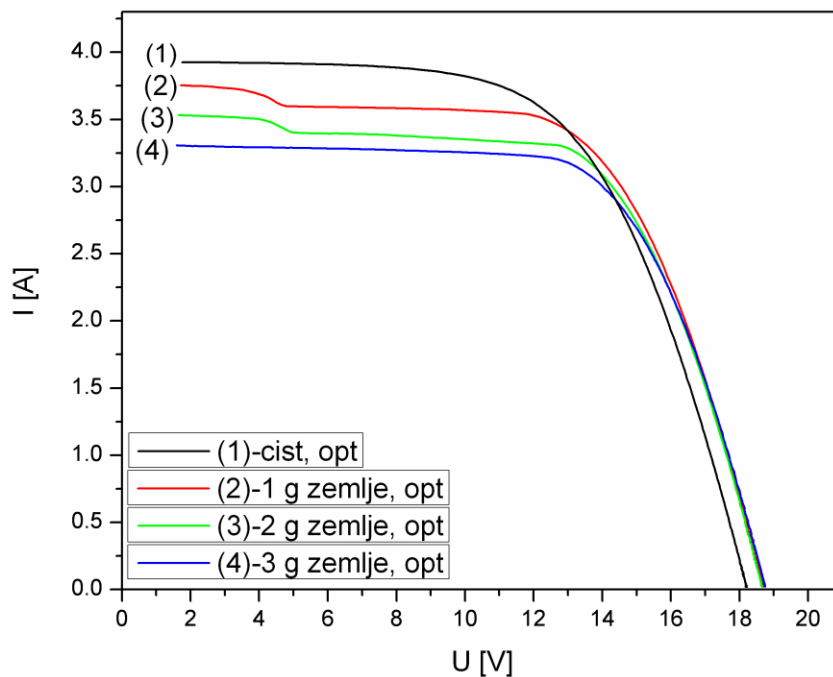
Strujno-naponske karakteristike vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula u zavisnosti od zaprljanosti njihove površine različitim masama zemlje date su na slikama 3.115, 3.116. i 3.117.



Slika 3.115. Strujno-naponske karakteristike vertikalno postavljenih solarnih modula u zavisnosti od zaprljanosti njihove površine različitim masama zemlje



Slika 3.116. Strujno-naponske karakteristike horizontalno postavljenih solarnih modula u zavisnosti od zaprljanosti njihove površine različitim masama zemlje

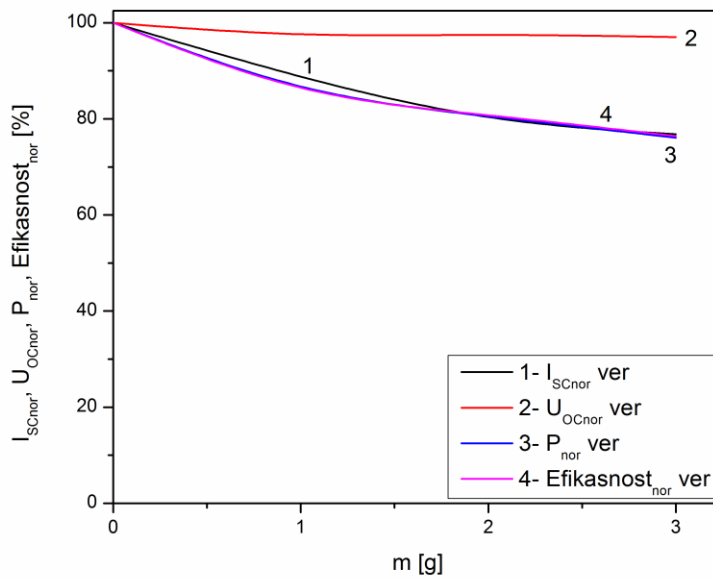


Slika 3.117. Strujno-naponske karakteristike optimalno postavljene solarnih modula u zavisnosti od zaprljanosti njihove površine različitim masama zemlje

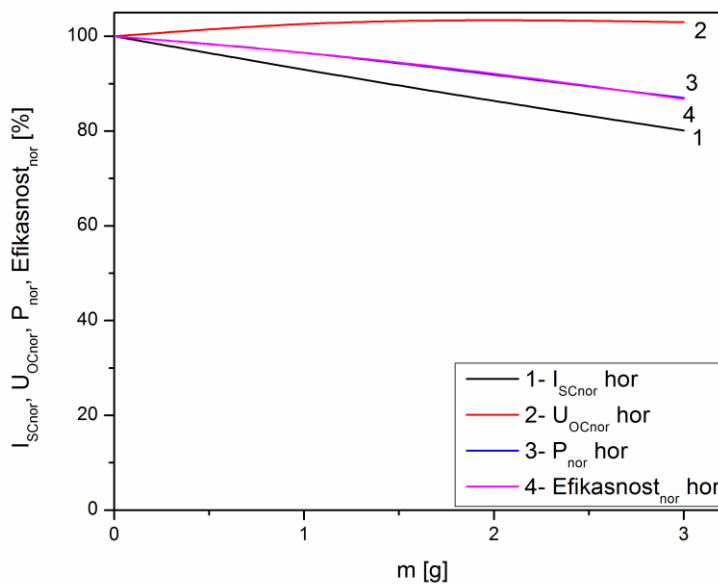
Na slikama 3.115, 3.116. i 3.117. se vidi da se sa povećanjem mase zemlje nanete na vertikalno, horizontalno i optimalno postavljene solarne module smanjuje njihova struja. Usled zaprljavanja solarnih modula sve većom masom zemlje, intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na njihovu površinu se smanjuje, tako da se smanjuje i struja solarnih modula.

3.4.7. Uporedni prikaz parametara solarnih modula zaprljanih zemljom

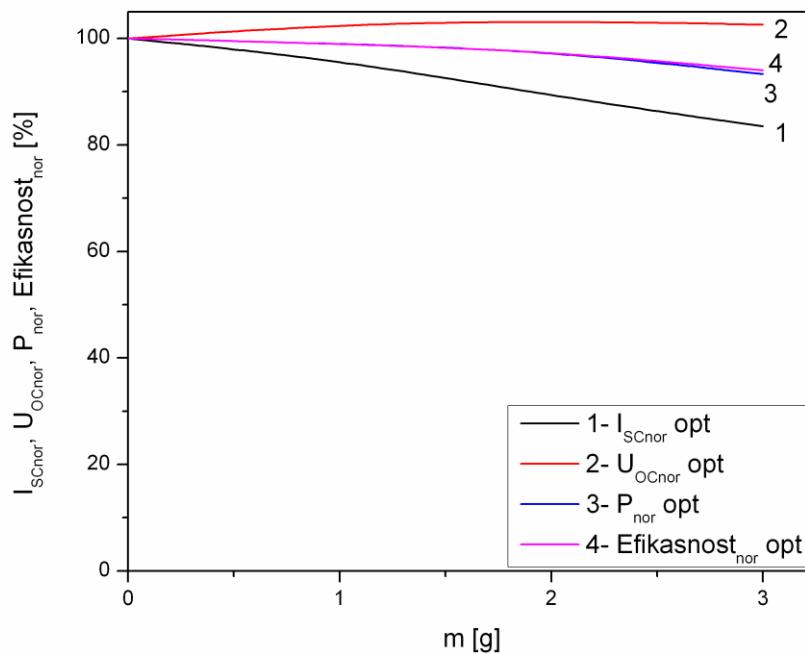
Zavisnost normalizovane I_{sc} , U_{oc} , P i efikasnosti vertikalno, horizontalno i optimalno postavljene solarnih modula od zaprljanosti njihove površine različitim masama zemlje data je na slikama 3.118, 3.119. i 3.120, respektivno.



Slika 3.118. Zavisnost normalizovane I_{sc} , U_{oc} , P i efikasnosti vertikalno postavljenog solarnog modula od zaprljanosti njegove površine različitim masama zemlje



Slika 3.119. Zavisnost normalizovane I_{sc} , U_{oc} , P i efikasnosti horizontalno postavljenog solarnog modula od zaprljanosti njegove površine različitim masama zemlje



Slika 3.120. Zavisnost normalizovane I_{sc} , U_{oc} , P i efikasnosti optimalno postavljenog solarnog modula od zaprljanosti njegove površine različitim masama zemlje

Na slici 3.118. se vidi da se kod vertikalno postavljenog solarnog modula usled njegovog zaprljanja zemljom jednako smanjuju I_{sc} , P i efikasnost, a U_{oc} se smanjuje neznatno. Na slikama 3.119. i 3.120. se vidi da se kod horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula usled njihovog zaprljanja zemljom najviše smanjuje I_{sc} , zatim P i efikasnost, a U_{oc} se neznatno menja.

3.5. Uporedni prikaz rezultata ispitivanja energetske efikasnosti solarnih modula u zavisnosti od njihove zaprljanosti ugljenikom, kalcijum-karbonatom i zemljom

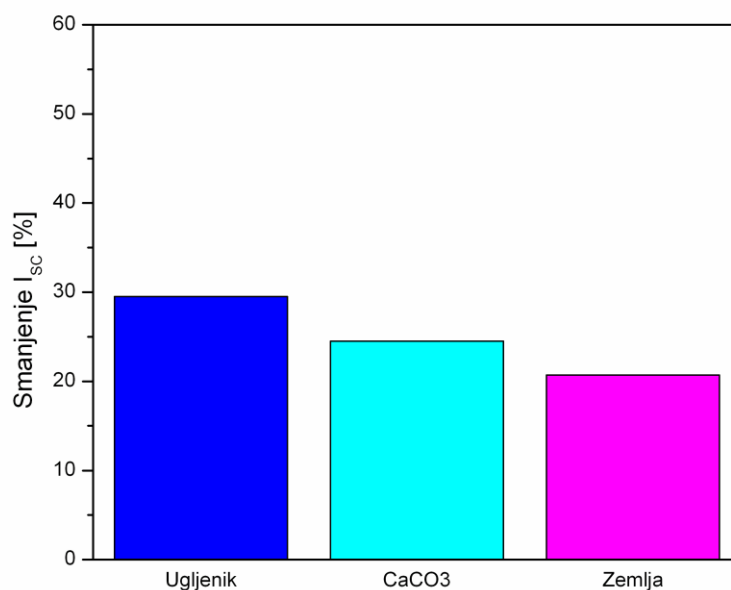
U daljem je dat uporedni prikaz rezultata ispitivanja energetske efikasnosti vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula u zavisnosti od njihove zaprljanosti sa 2 g ugljenika, kalcijum-karbonata i zemlje.

Vertikalni modul

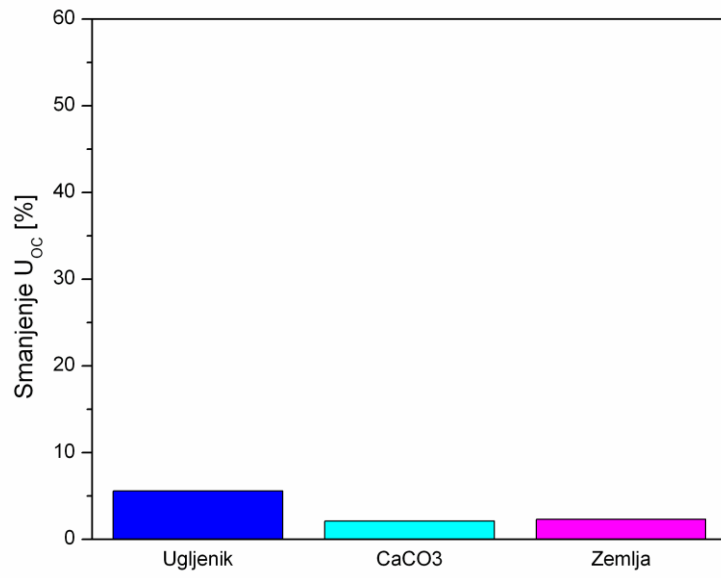
Smanjenje struje kratkog spoja (ΔI_{sc}), napona otvorenog kola (ΔU_{oc}), snage (ΔP) i efikasnosti ($\Delta \eta$) usled zaprljanja vertikalnog solarnog modula sa 2 g ugljenika, kalcijum-karbonata i zemlje dato je u tabeli 3.6.

Tabela 3.6. Smanjenje struje kratkog spoja (ΔI_{sc}), napona otvorenog kola (ΔU_{oc}), snage (ΔP) i efikasnosti ($\Delta \eta$) usled zaprljanja vertikalnog solarnog modula sa 2 g ugljenika, kalcijum-karbonata i zemlje

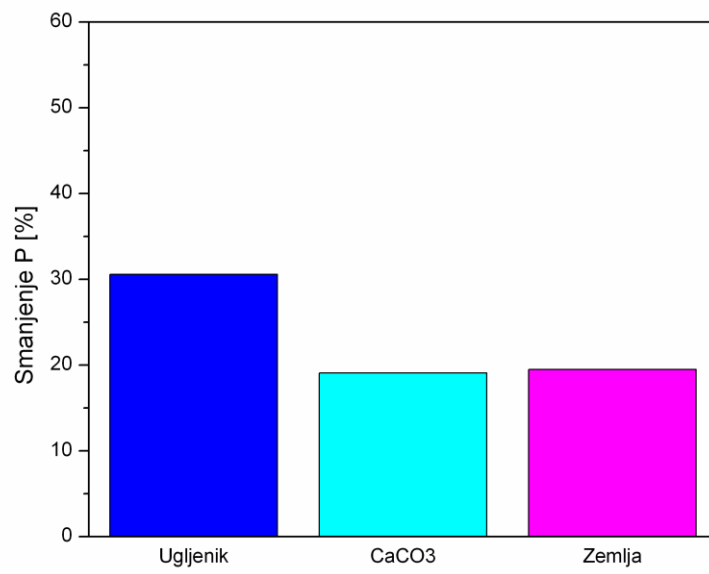
	ΔI_{sc} (%)	ΔU_{oc} (%)	ΔP (%)	$\Delta \eta$ (%)
Ugljenik	29,5	5,6	30,6	30,8
CaCO₃	24,5	2,1	19,1	19,1
Zemlja	20,7	2,3	19,5	19,1



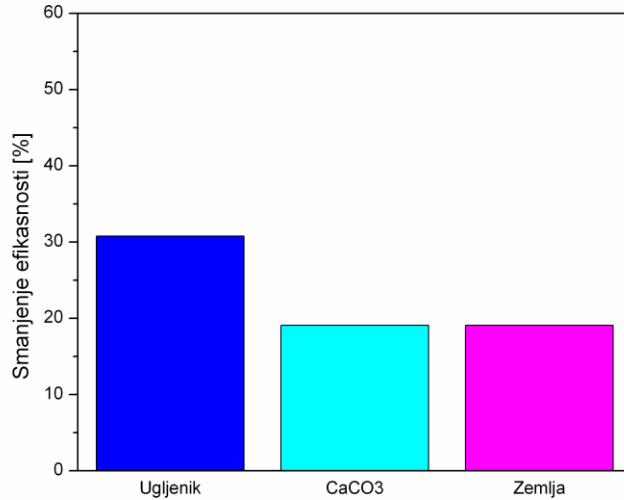
(a)



(b)



(c)



(d)

Slika 3.121. Smanjenje struje kratkog spoja (a), napona otvorenog kola (b), snage (c) i efikasnosti (d) usled zaprljanja vertikalnog solarnog modula sa 2 g ugljenika, kalcijum-karbonata i zemlje

Na osnovu podataka u tabeli 3.6. i na slici 3.121. vidi se da se:

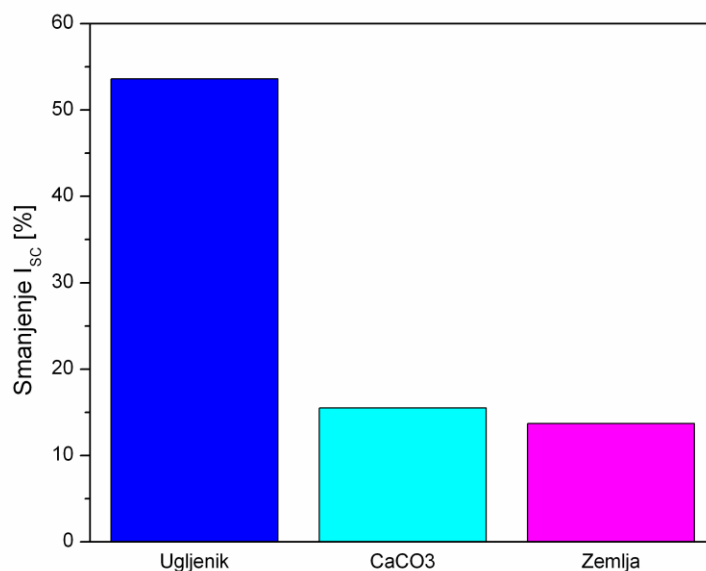
- I_{sc} vertikalno postavljenog solarnog modula najviše smanjuje usled njegovog zaprljanja ugljenikom (za 29,5%), zatim kalcijum-karbonatom (za 24,5%) i najmanje zemljom (za 20,7%);
- U_{oc} vertikalno postavljenog solarnog modula najviše smanjuje usled njegovog zaprljanja ugljenikom (za 5,6%), a smanjenje U_{oc} usled zaprljanja kalcijum-karbonatom (za 2,1%) i zemljom (za 2,3%) je slično;
- snaga vertikalno postavljenog solarnog modula najviše smanjuje usled njegovog zaprljanja ugljenikom (za 30,6%), a smanjenje snage usled zaprljanja kalcijum-karbonatom (za 19,1%) i zemljom (za 19,5%) je slično;
- efikasnost vertikalno postavljenog solarnog modula najviše smanjuje usled njegovog zaprljanja ugljenikom (za 30,8%), a smanjenje efikasnosti usled zaprljanja kalcijum-karbonatom (za 19,1%) i zemljom je isto (za 19,1%).

Horizontalni modul

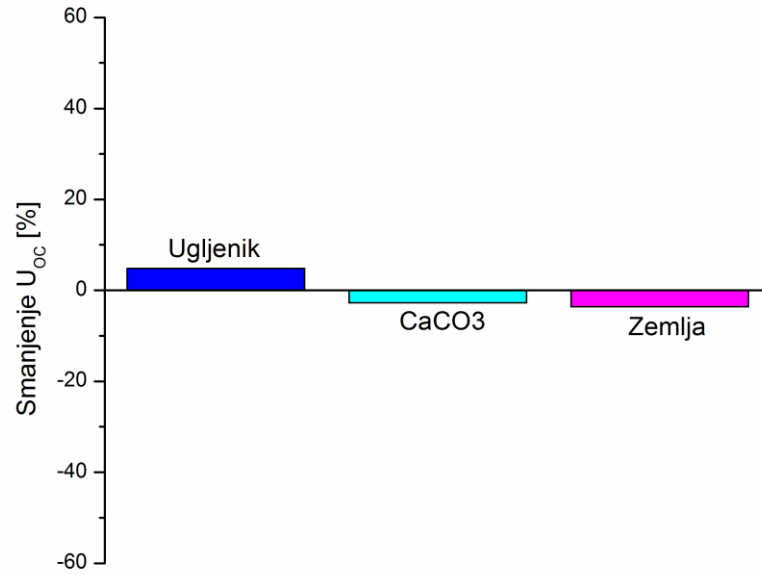
Smanjenje struje kratkog spoja (ΔI_{sc}), napona otvorenog kola (ΔU_{oc}), snage (ΔP) i efikasnosti ($\Delta \eta$) usled zaprljanja horizontalnog solarnog modula sa 2 g ugljenika, kalcijum-karbonata i zemlje dato je u tabeli 3.7.

Tabela 3.7. Smanjenje struje kratkog spoja (ΔI_{sc}), napona otvorenog kola (ΔU_{oc}), snage (ΔP) i efikasnosti ($\Delta \eta$) usled zaprljanja horizontalnog solarnog modula sa 2 g ugljenika, kalcijum-karbonata i zemlje

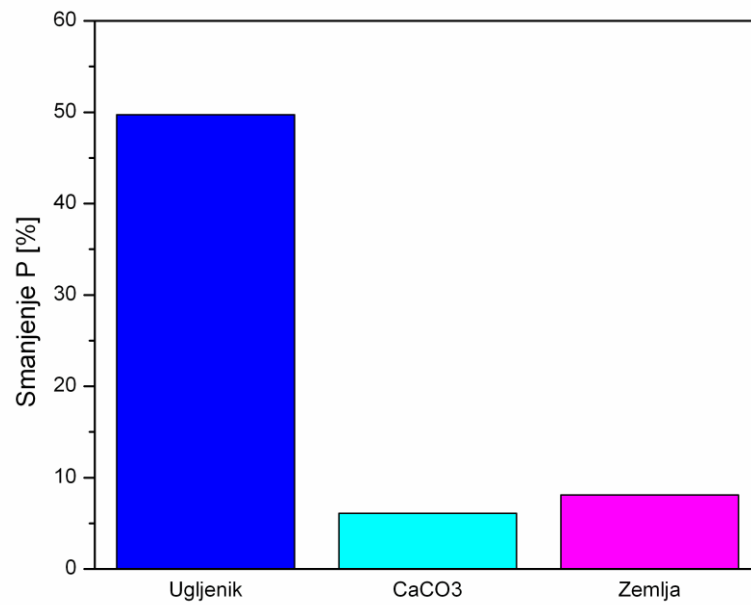
	ΔI_{sc} (%)	ΔU_{oc} (%)	ΔP (%)	$\Delta \eta$ (%)
Ugljenik	53,6	4,8	49,7	49,6
CaCO₃	15,5	-2,7	6,1	6,0
Zemlja	13,7	-3,6	8,1	7,7



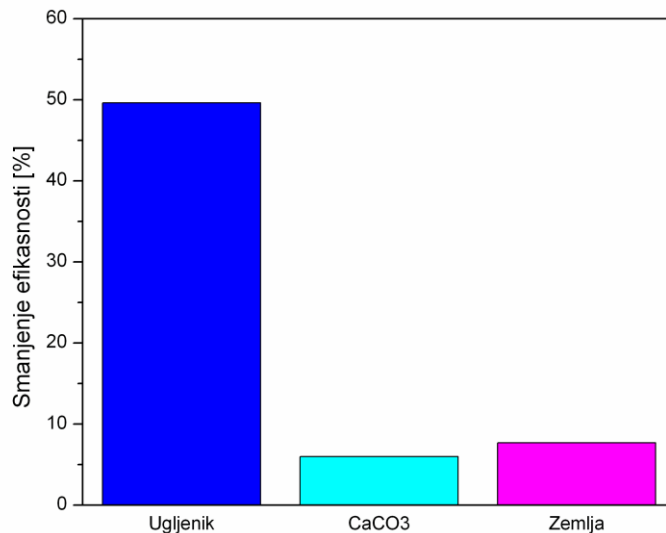
(a)



(b)



(c)



(d)

Slika 3.122. Smanjenje struje kratkog spoja (a), napona otvorenog kola (b), snage (c) i efikasnosti (d) usled zaprljanja horizontalnog solarnog modula sa 2 g ugljenika, kalcijum-karbonata i zemlje

Na osnovu podataka u tabeli 3.7. i na slici 3.122. vidi se da se:

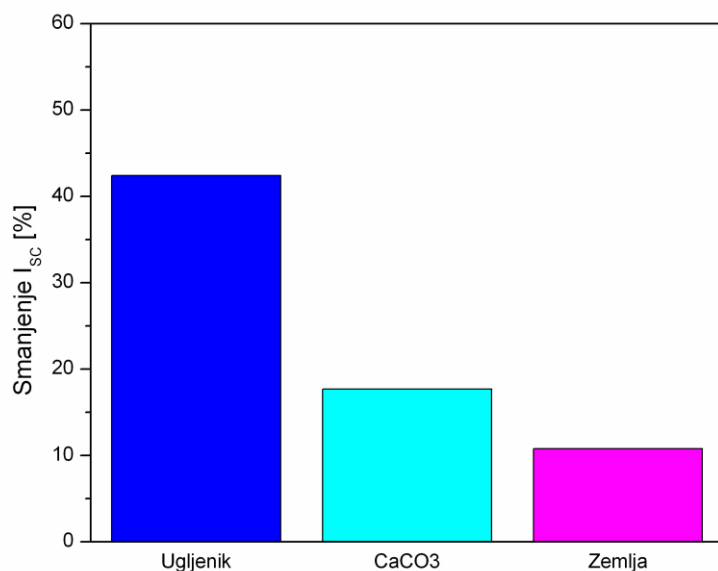
- I_{sc} horizontalno postavljenog solarnog modula najviše smanjuje usled njegovog zaprljanja ugljenikom (za 53,6%), a smanjenje I_{sc} usled zaprljanja kalcijum-karbonatom (za 15,5%) i zemljom (za 13,7%) je slično;
- U_{oc} horizontalno postavljenog solarnog modula malo smanjuje usled njegovog zaprljanja ugljenikom (za 4,8%), i malo povećava usled zaprljanja kalcijum-karbonatom (za 2,7%) i zemljom (za 3,6%);
- snaga horizontalno postavljenog solarnog modula najviše smanjuje usled njegovog zaprljanja ugljenikom (za 49,7%), zatim zemljom (za 8,1%) i najmanje kalcijum-karbonatom (za 6,1%);
- efikasnost horizontalno postavljenog solarnog modula najviše smanjuje usled njegovog zaprljanja ugljenikom (za 49,6%), zatim zemljom (za 7,7%) i najmanje kalcijum-karbonatom (za 6,0%).

Optimalno postavljen modul

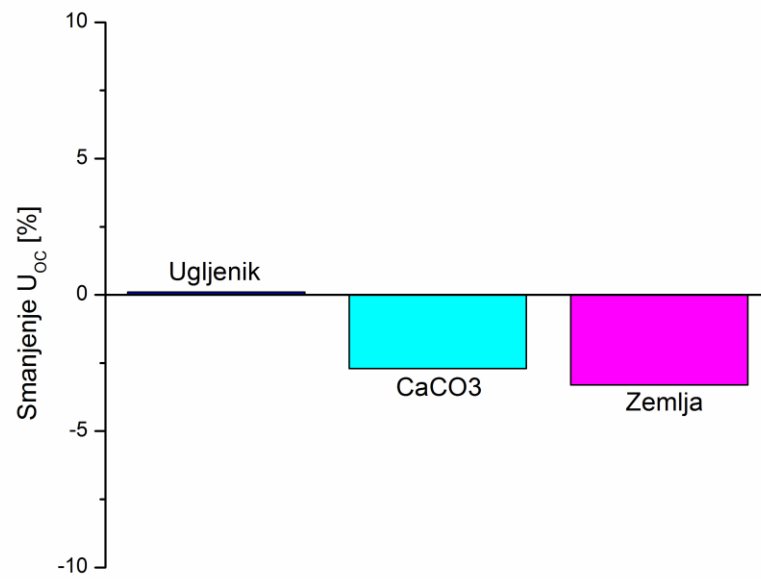
Smanjenje struje kratkog spoja (ΔI_{sc}), napona otvorenog kola (ΔU_{oc}), snage (ΔP) i efikasnosti ($\Delta \eta$) usled zaprljanja optimalno postavljenog solarnog modula sa 2 g ugljenika, kalcijum-karbonata i zemlje dato je u tabeli 3.8.

Tabela 3.8. Smanjenje struje kratkog spoja (ΔI_{sc}), napona otvorenog kola (ΔU_{oc}), snage (ΔP) i efikasnosti ($\Delta \eta$) usled zaprljanja optimalno postavljenog solarnog modula sa 2 g ugljenika, kalcijum-karbonata i zemlje

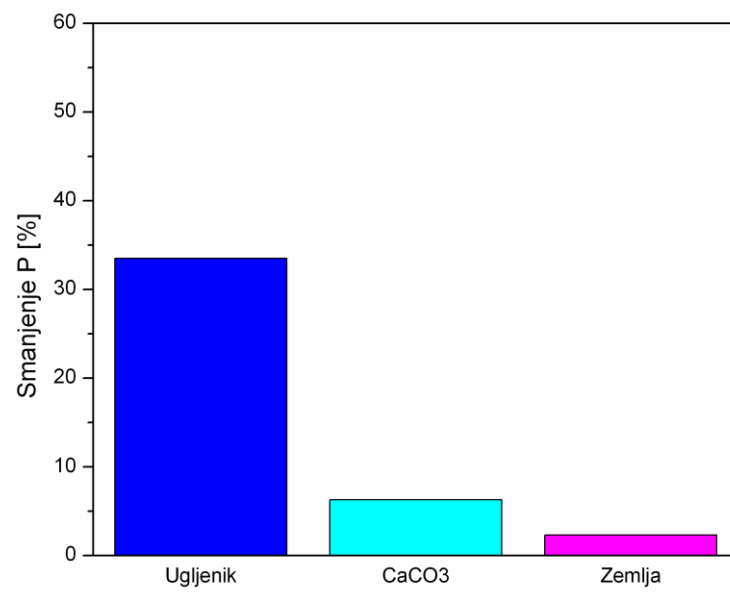
	ΔI_{sc} (%)	ΔU_{oc} (%)	ΔP (%)	$\Delta \eta$ (%)
Ugljenik	42,4	0,1	33,5	33,0
CaCO₃	17,7	-2,7	6,3	6,4
Zemlja	10,8	-3,3	2,3	2,4



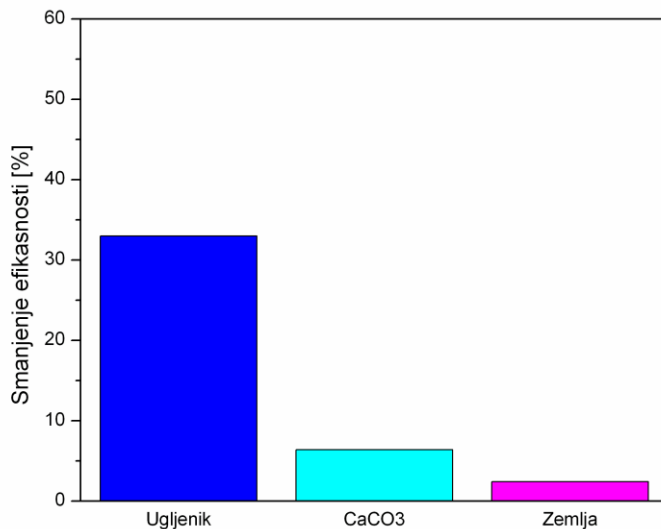
(a)



(b)



(c)



(d)

Slika 3.123. Smanjenje struje kratkog spoja (a), napona otvorenog kola (b), snage (c) i efikasnosti (d) usled zaprljanja optimalno postavljenog solarnog modula sa 2 g ugljenika, kalcijum-karbonata i zemlje

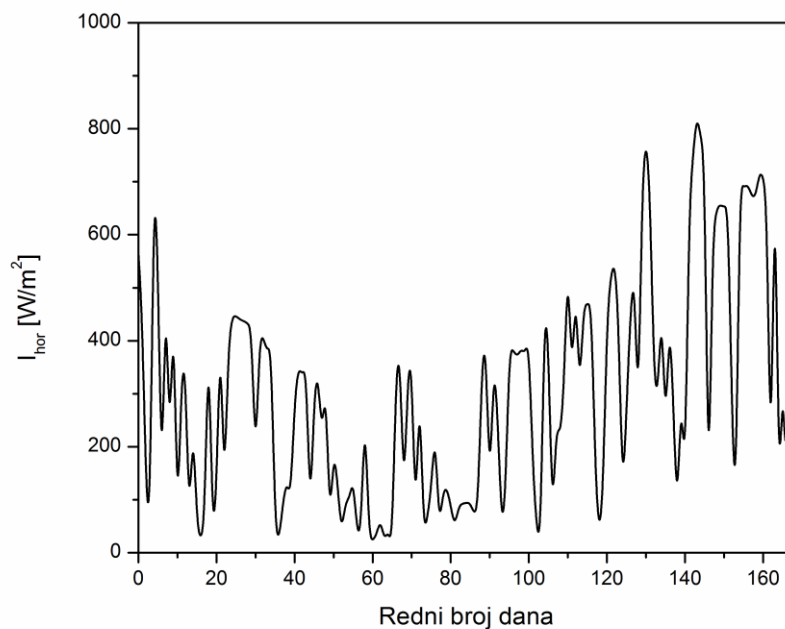
Na osnovu podataka u tabeli 3.8. i na slici 3.123. vidi se da se:

- I_{sc} optimalno postavljenog solarnog modula najviše smanjuje usled njegovog zaprljanja ugljenikom (za 42,4%), zatim kalcijum-karbonatom (za 17,7%) i najmanje zemljom (za 10,8%);
- U_{oc} optimalno postavljenog solarnog modula neznatno smanjuje usled njegovog zaprljanja ugljenikom (za 0,1%), i malo povećava usled zaprljanja kalcijum-karbonatom (za 2,7%) i zemljom (za 3,3%);
- snaga optimalno postavljenog solarnog modula najviše smanjuje usled njegovog zaprljanja ugljenikom (za 33,5%), zatim kalcijum-karbonatom (za 6,3%) i najmanje zemljom (za 2,3%);
- efikasnost optimalno postavljenog solarnog modula najviše smanjuje usled njegovog zaprljanja ugljenikom (za 33,0%), zatim kalcijum-karbonatom (za 6,4%) i najmanje zemljom (za 2,4%).

3.6. Rezultati merenja klimatskih parametara u toku grejne sezone 2016/2017.

U periodu od 24.10.2016. do 10.04.2017. godine vršeno je ispitivanje uticaja čađi na energetska efikasnost solarnih modula i merenje sledećih meteoroloških parametara: intenziteta Sunčevog zračenja, temperature ambijenta, količine padavina i relativne vlažnosti vazduha. Merenje je trajalo 168 dana, tako da 24.10.2016. godine predstavlja nulti dan merenja, a 10.04.2017. godine predstavlja 168. dan merenja.

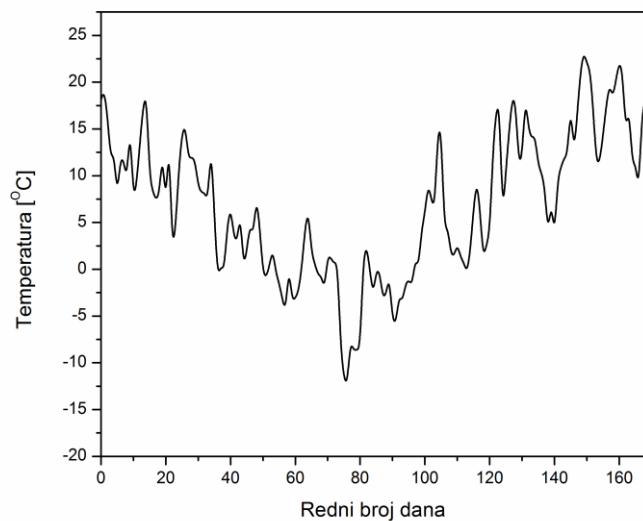
Intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na horizontalnu površinu meren je svakog dana u 12:10 h (slika 3.124).



Slika 3.124. Intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva na horizontalnu površinu u periodu od 24.10.2016. do 10.04.2017. godine

Vrednost intenziteta Sunčevog zračenja bila je najmanja 65. dana merenja i iznosila je 8 W/m^2 , a najveća 163. dana i iznosila je 834 W/m^2 .

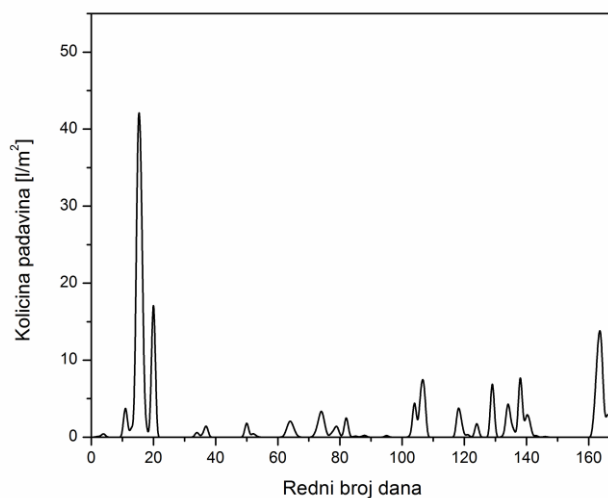
Temperatura ambijenta merena je svakog dana u 12:10 h (slika 3.125).



Slika 3.125. Temperatura ambijenta u periodu od 24.10.2016. do 10.04.2017. godine

Vrednost temperature ambijenta bila je najmanja 76. dana merenja i iznosila je $-12,5^{\circ}\text{C}$, a najveća 149. dana i iznosila je $23,3^{\circ}\text{C}$.

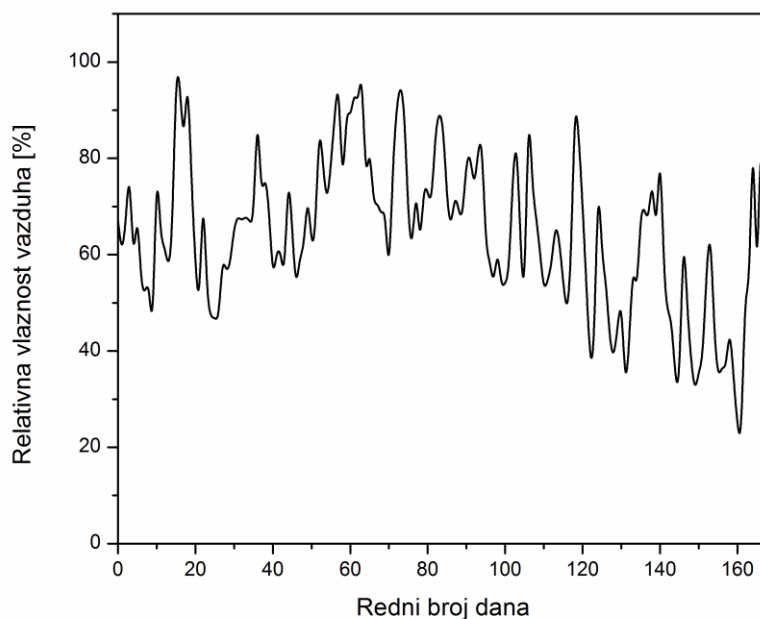
Vrednosti količine padavina merene su svakog dana u 07:00 h ujutru, a odnose se na prethodna 24 h (slika 3.126).



Slika 3.126. Količina padavina u periodu od 24.10.2016. do 10.04.2017. godine

Najveća vrednost količine padavina izmerena je 15. dana i iznosila je 47,9 l/m². Značajnije padavine (>5 l/m²) zabeležene su 11, 15, 16, 20, 104, 106, 107, 129, 134, 138, 163. i 164. dana merenja.

Relativna vlažnost vazduha merena je svakog dana u 12:10 h (slika 3.127).



Slika 3.127. Relativna vlažnost vazduha u periodu od 24.10.2016. do 10.04.2017. godine

Relativna vlažnost bila je najmanja 161. dana merenja i iznosila je 20%, a najveća 15, 18. i 63. dana i iznosila je 100%.

3.7. Rezultati ispitivanja energetske efikasnosti solarnih modula u zavisnosti od njihove zaprljanosti nataloženom čađi

U toku grejne sezone 2016/2017, tačnije u periodu od 24.10.2016. do 10.04.2017. godine, ispitivan je uticaj čađi na energetske efikasnost solarnih modula postavljenih pod uglovima od 0°

i 32° u odnosu na horizontalnu ravan. Eksperiment je trajao 168 dana, tako da 24.10.2016. godine predstavlja nulti dan merenja, a 10.04.2017. godine predstavlja 168. dan merenja. Dana 24.10.2016. godine očišćena su četiri solarna modula (2, 3, 5 i 6) kako bi se sa njih uklonila sva nečistoća i taj dan predstavlja početak merenja (nulti dan merenja). Kako bi merenja bila što preciznija, vršena su samo pri vedrom vremenu i uvek u isto vreme, u 12:10 h po letnjem vremenu, odnosno u 10:10 h po Griniču. Svi solarni moduli su tokom celog perioda merenja bili izloženi spoljašnjim uticajima (kiša, sneg, vetar, čađ, itd.). Na dan svakog merenja su čišćeni solarni moduli 2 i 3 radi uklanjanja nečistoća, a na modulima 5 i 6 se nalazila čađ koja se taložila od 24.10.2016. godine.



Slika 3.128. Čisti (levo) i solarni moduli zaprljani nataloženom čađi (desno)

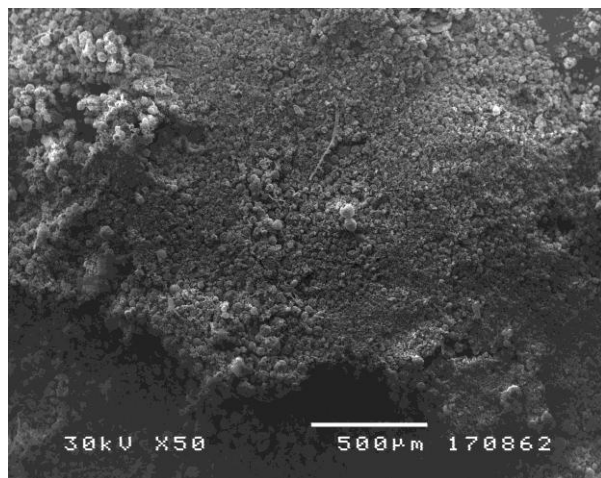
Čađ nataložena na solarnim modulima nije uvek uniformno raspoređena. Neuniformna zaprljanost se naročito primećuje kod horizontalnog solarnog modula. Na horizontalnom solarnom modulu se zadržava voda usled padavina, tako da kada se modul osuši na njemu se često vide slojevi čađi uz ivice modula, po sredini, itd. Kada je kiša slaba i kratkotrajna ona ne opere solarne module, već se na njima mogu videti tragovi kapljica kiše.



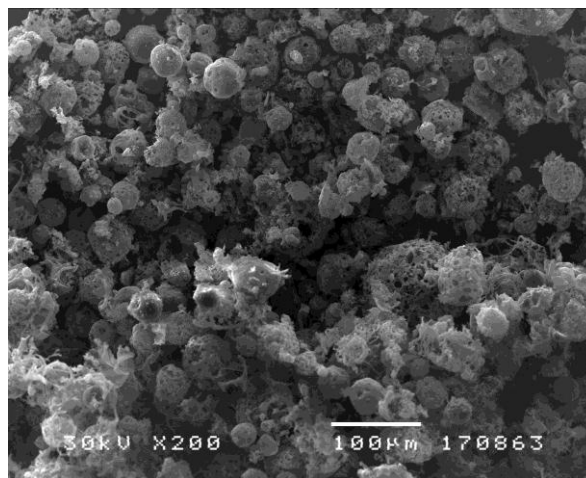
Slika 3.129. Horizontalni solarni modul (desno) zaprljan nataloženom čađi nakon slabe i kratkotrajne kiše

3.7.1. Rezultati SEM ispitivanja nataložene čađi

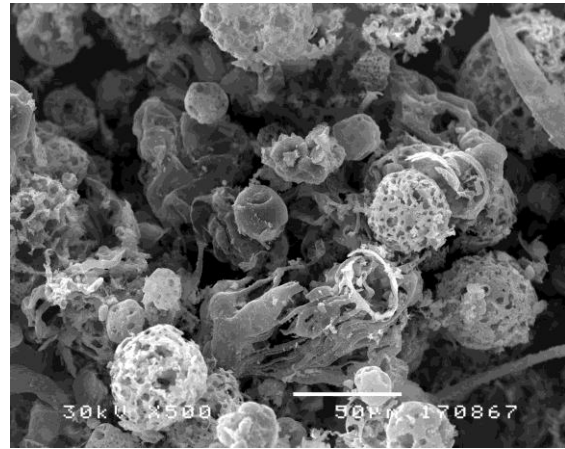
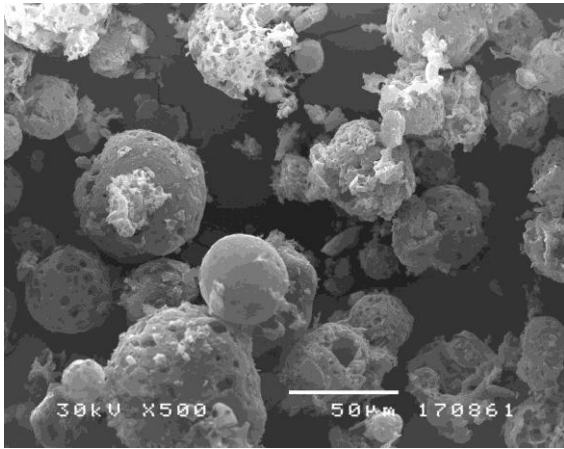
SEM fotografije čestica čađi sa solarnih modula 5 i 6 pri različitim uvećanjima date su na slikama 3.130-3.132.



Slika 3.130. SEM fotografija čestica čađi pri uvećanju od 50 puta



Slika 3.131. SEM fotografija čestica čađi pri uvećanju od 200 puta



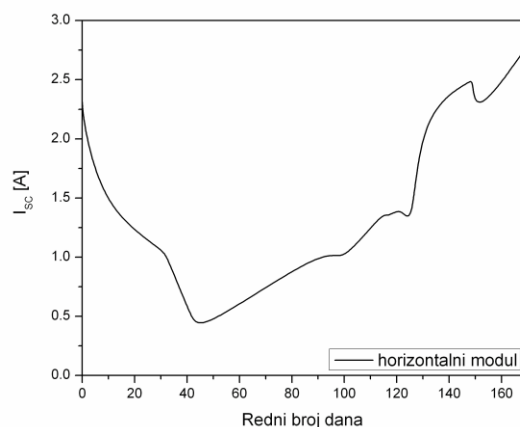
Slika 3.132. SEM fotografije čestica čađi pri uvećanju od 500 puta

Na slici 3.130. se vidi da su čestice čađi raspoređene homogeno i gusto tako da je prostor između čestica kroz koji svetlost može da prođe veoma mali. Na slikama 3.131. i 3.132. se vidi da su čestice čađi uglavnom sfernog oblika, da imaju poroznu strukturu i da najveći broj čestica ima prečnike od 20 μm do 50 μm .

3.7.2. Rezultati merenja struje kratkog spoja čistih i solarnih modula zaprljanih nataloženom čađi postavljenih pod različitim uglovima u Nišu

Horizontalni modul

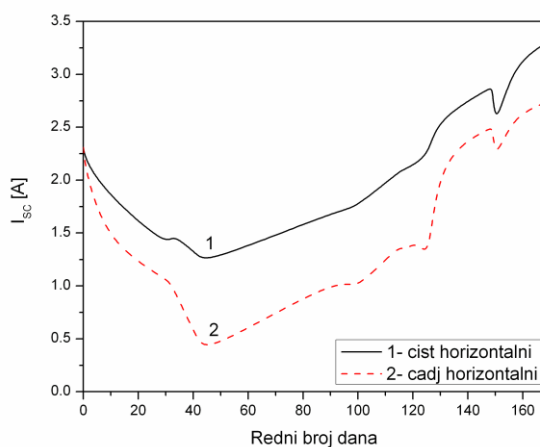
Zavisnost struje kratkog spoja (I_{sc}) horizontalno postavljenog solarnog modula od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017. data je na slici 3.133.



Slika 3.133. Zavisnost I_{sc} horizontalno postavljenog solarnog modula od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017.

Na slici 3.133. se vidi da se u toku grejne sezone 2016/2017. kod horizontalno postavljenog solarnog modula vrednosti I_{sc} kreću od 2,31 A nultog dana merenja do 2,73 A 168. dana merenja.

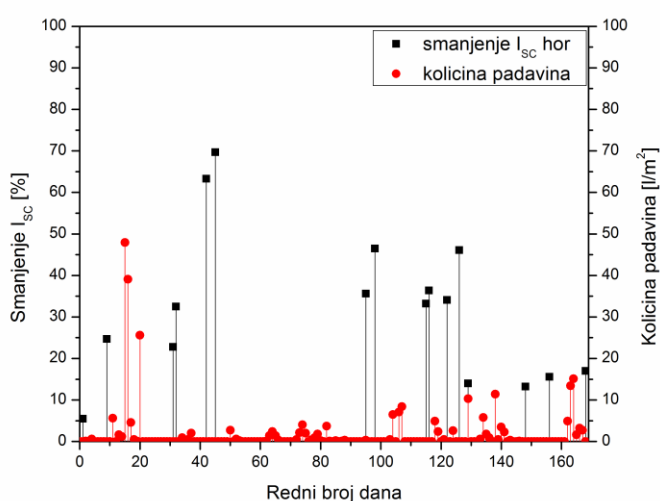
Uporedni prikaz I_{sc} za horizontalni čist (1) i horizontalni solarni modul sa nataloženom čađi (2) u zavisnosti od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017. dat je na slici 3.134.



Slika 3.134. Uporedni prikaz I_{sc} za horizontalni čist (1) i horizontalni solarni modul sa nataloženom čađi (2) u zavisnosti od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017.

Na slici 3.134. se vidi da se u toku grejne sezone 2016/2017. kod horizontalno postavljenih solarnih modula vrednosti I_{sc} kreću od 2,31 A nultog dana do 3,29 A 168. dana merenja za čist, i od 2,31 A nultog dana do 2,73 A 168. dana merenja za modul zaprljan nataloženom čađi.

Smanjenje I_{sc} horizontalno postavljenog solarnog modula usled taloženja čađi u zavisnosti od količine padavina u toku grejne sezone 2016/2017. dato je na slici 3.135.

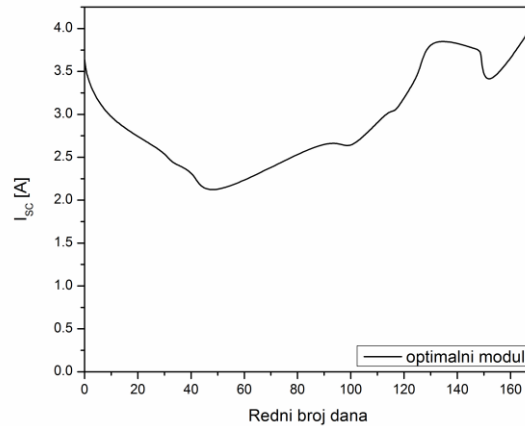


Slika 3.135. Smanjenje I_{sc} horizontalno postavljenog solarnog modula usled taloženja čađi u zavisnosti od količine padavina u toku grejne sezone 2016/2017.

Na slici 3.135. se vidi da je u toku grejne sezone 2016/2017. kod horizontalno postavljenog solarnog modula smanjenje I_{sc} usled taloženja čađi bilo najmanje prvog dana i iznosilo je 5,5%, a najveće 45. dana i iznosilo je 69,7%. Na slici 3.135. se takođe vidi da je smanjenje I_{sc} horizontalno postavljenog solarnog modula usled taloženja čađi veće u periodima bez padavina.

Optimalno postavljen modul

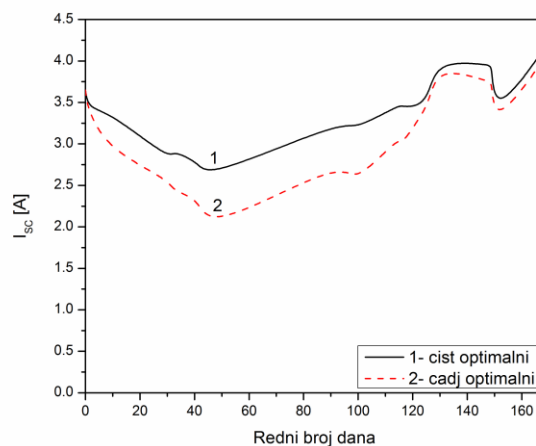
Zavisnost struje kratkog spoja (I_{sc}) optimalno postavljenog solarnog modula od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017. data je na slici 3.136.



Slika 3.136. Zavisnost I_{sc} optimalno postavljenog solarnog modula od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017.

Na slici 3.136. se vidi da se u toku grejne sezone 2016/2017. kod optimalno postavljenog solarnog modula vrednosti I_{sc} kreću od 3,65 A nultog dana merenja do 4,02 A 168. dana merenja.

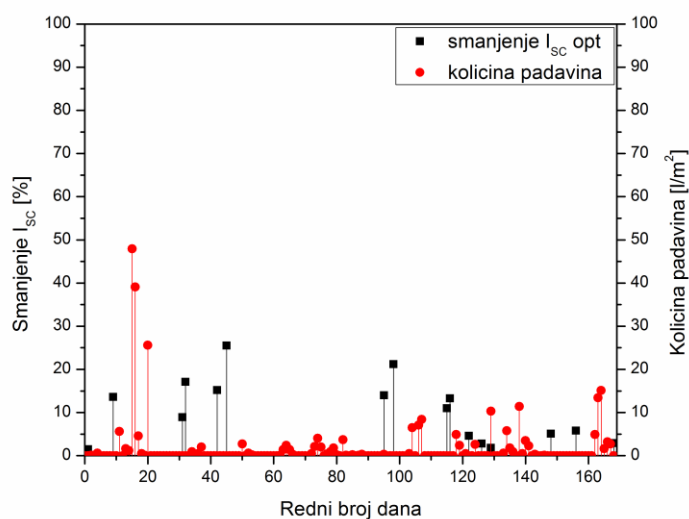
Uporedni prikaz I_{sc} za optimalno postavljen čist (1) i optimalno postavljen solarni modul sa nataloženom čađi (2) u zavisnosti od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017. dat je na slici 3.137.



Slika 3.137. Uporedni prikaz I_{sc} za optimalno postavljen čist (1) i optimalno postavljen solarni modul sa nataloženom čađi (2) u zavisnosti od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017.

Na slici 3.137. se vidi da se u toku grejne sezone 2016/2017. kod optimalno postavljenih solarnih modula vrednosti I_{sc} kreću od 3,65 A nultog dana do 4,14 A 168. dana merenja za čist, i od 3,65 A nultog dana do 4,02 A 168. dana merenja za modul zaprljan nataloženom čađi.

Smanjenje I_{sc} optimalno postavljenog solarnog modula usled taloženja čađi u zavisnosti od količine padavina u toku grejne sezone 2016/2017. dato je na slici 3.138.

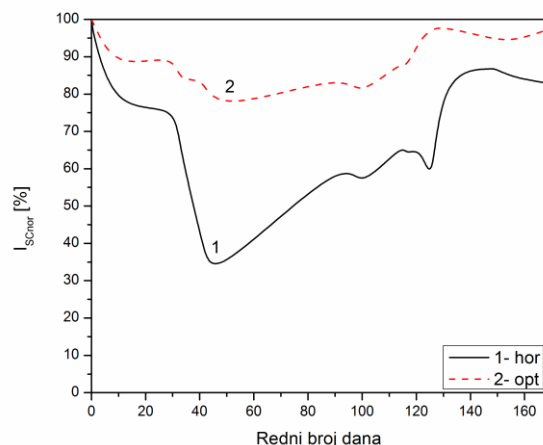


Slika 3.138. Smanjenje I_{sc} optimalno postavljenog solarnog modula usled taloženja čađi u zavisnosti od količine padavina u toku grejne sezone 2016/2017.

Na slici 3.138. se vidi da je u toku grejne sezone 2016/2017. kod optimalno postavljenog solarnog modula smanjenje I_{sc} usled taloženja čađi bilo najmanje prvog dana i iznosilo je 1,5%, a najveće 45. dana i iznosilo je 25,5%. Na slici 3.138. se takođe vidi da je smanjenje I_{sc} optimalno postavljenog solarnog modula usled taloženja čađi veće u periodima bez padavina.

Uporedni prikaz

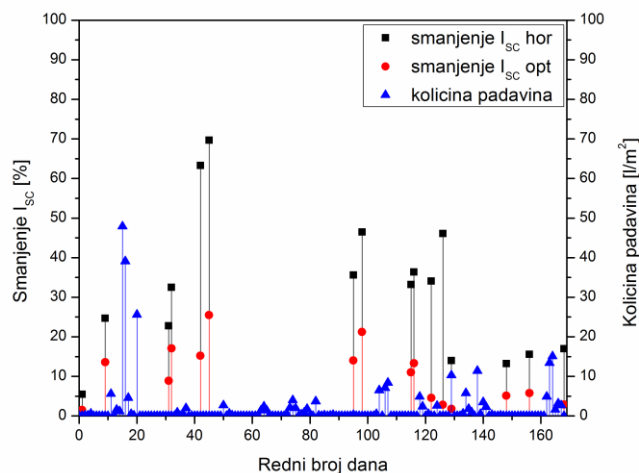
Zavisnost normalizovane struje kratkog spoja horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017. data je na slici 3.139.



Slika 3.139. Zavisnost normalizovane struje kratkog spoja horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017.

Na slici 3.139. se vidi da je u toku grejne sezone 2016/2017. smanjenje struje kratkog spoja horizontalnog solarnog modula uvek veće od smanjenja struje kratkog spoja optimalno postavljenog modula zato što se na horizontalnom modulu taloži više čađi.

Smanjenje I_{sc} horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula usled taloženja čađi u zavisnosti od količine padavina u toku grejne sezone 2016/2017. dato je na slici 3.140.



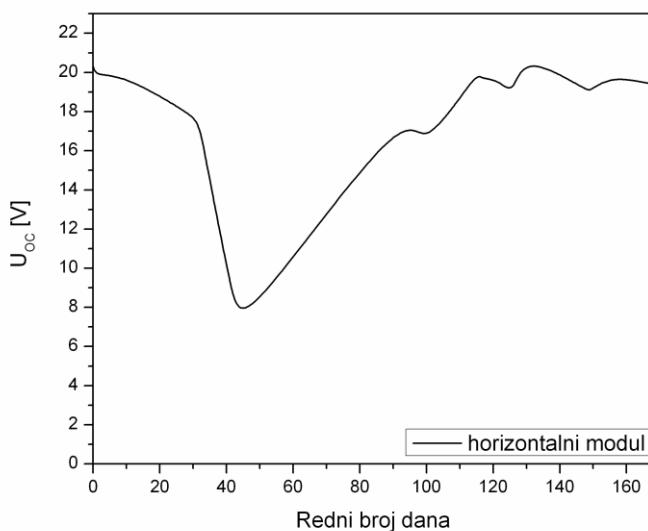
Slika 3.140. Smanjenje I_{sc} horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula usled taloženja čađi u zavisnosti od količine padavina u toku grejne sezone 2016/2017.

Na slici 3.140. se vidi da je u toku grejne sezone 2016/2017. smanjenje struje kratkog spoja horizontalnog uvek veće od smanjenja struje kratkog spoja optimalno postavljenog solarnog modula. Na slici 3.140. se takođe vidi da je smanjenje I_{sc} horizontalno i optimalno postavljenog solarnog modula usled taloženja čađi veće u periodima bez padavina.

3.7.3. Rezultati merenja napona otvorenog kola čistih i solarnih modula zaprljanih nataloženom čađi postavljenih pod različitim uglovima u Nišu

Horizontalni modul

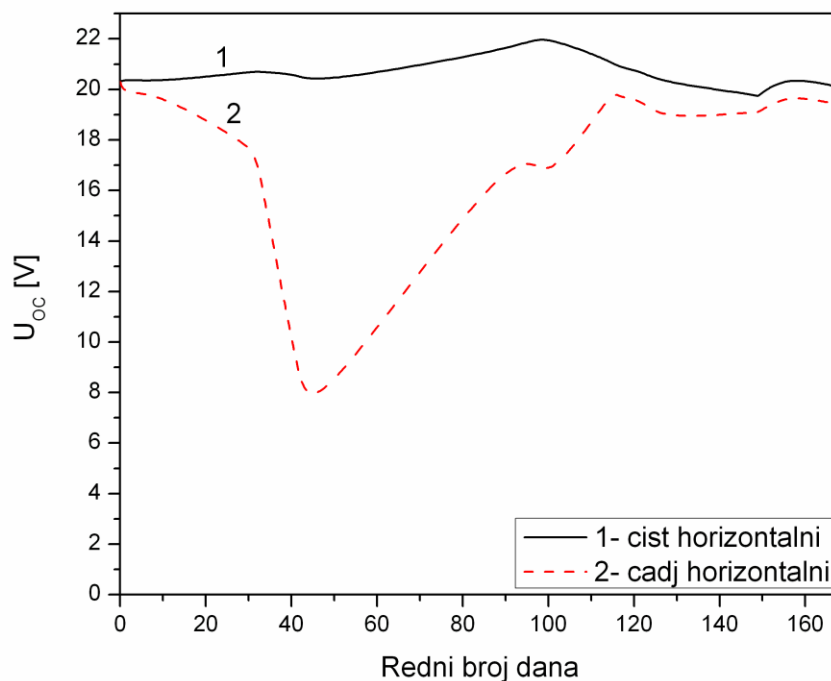
Zavisnost napona otvorenog kola (U_{oc}) horizontalno postavljenog solarnog modula od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017. data je na slici 3.141.



Slika 3.141. Zavisnost U_{oc} horizontalno postavljenog solarnog modula od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017.

Na slici 3.141. se vidi da se u toku grejne sezone 2016/2017. kod horizontalnog solarnog modula vrednosti U_{oc} kreću od 20,3 V nultog dana merenja do 19,4 V 168. dana merenja.

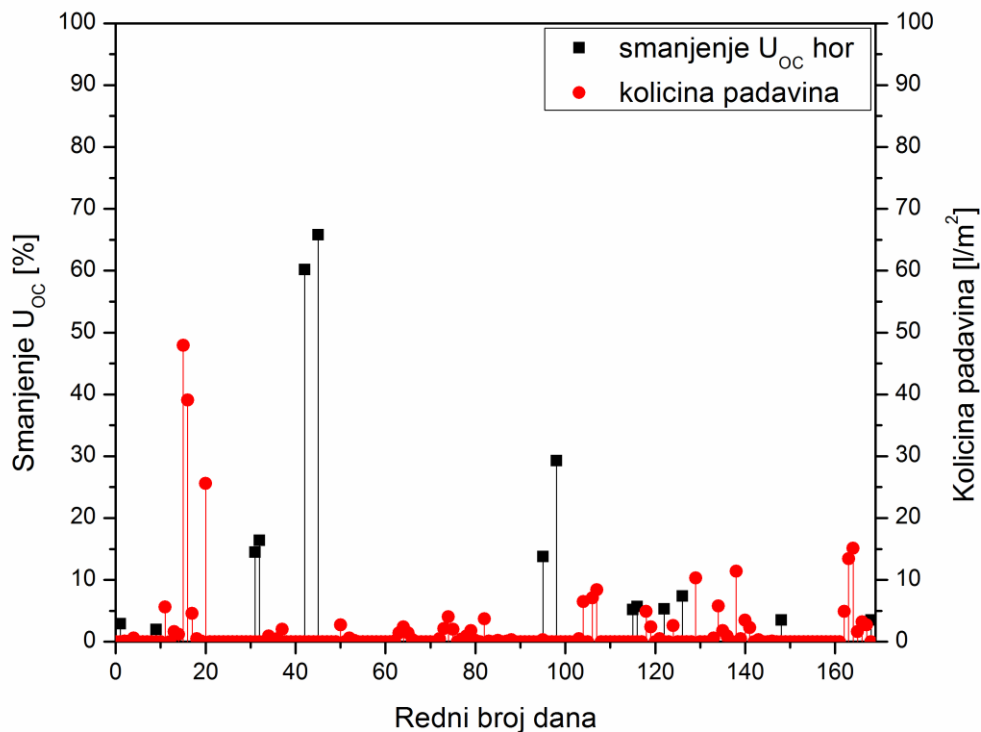
Uporedni prikaz U_{oc} za horizontalni čist (1) i horizontalni solarni modul sa nataloženom čađi (2) u zavisnosti od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017. dat je na slici 3.142.



Slika 3.142. Uporedni prikaz U_{oc} za horizontalni čist (1) i horizontalni solarni modul sa nataloženom čađi (2) u zavisnosti od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017.

Na slici 3.142. se vidi da se u toku grejne sezone 2016/2017. kod horizontalnih solarnih modula vrednosti U_{oc} kreću od 20,3 V nultog dana do 20,1 V 168. dana merenja za čist, i od 20,3 V nultog dana do 19,4 V 168. dana merenja za modul zaprljan nataloženom čađi.

Smanjenje U_{oc} horizontalnog solarnog modula usled taloženja čađi u zavisnosti od količine padavina u toku grejne sezone 2016/2017. dato je na slici 3.143.

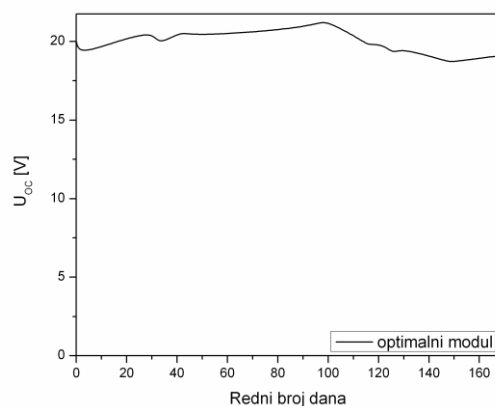


Slika 3.143. Smanjenje U_{oc} horizontalnog solarnog modula usled taloženja čađi u zavisnosti od količine padavina u toku grejne sezone 2016/2017.

Na slici 3.143. se vidi da je u toku grejne sezone 2016/2017. kod horizontalnog solarnog modula smanjenje U_{oc} usled taloženja čađi bilo najmanje 9. dana i iznosilo je 2,0%, a najveće 45. dana i iznosilo je 65,8%. Na slici 3.143. se takođe vidi da je smanjenje U_{oc} horizontalnog solarnog modula usled taloženja čađi veće u periodima bez padavina.

Optimalno postavljen modul

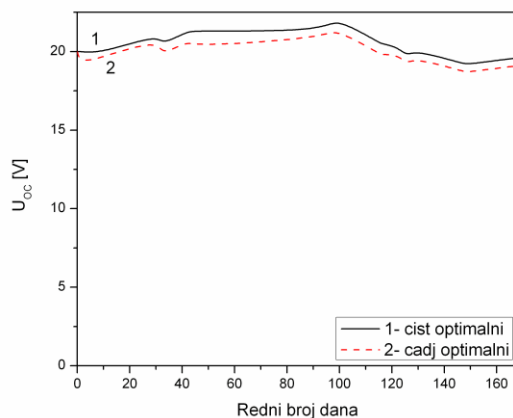
Zavisnost napona otvorenog kola (U_{oc}) optimalno postavljenog solarnog modula od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017. data je na slici 3.144.



Slika 3.144. Zavisnost U_{oc} optimalno postavljenog solarnog modula od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017.

Na slici 3.144. se vidi da se u toku grejne sezone 2016/2017. kod optimalno postavljenog solarnog modula vrednosti U_{oc} kreću od 20,0 V nultog dana merenja do 19,1 V 168. dana merenja.

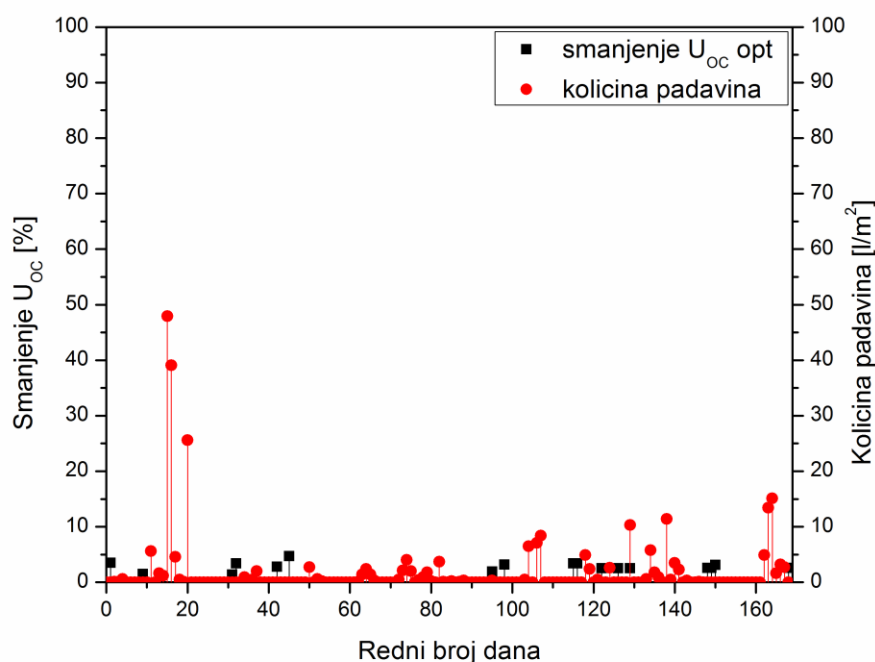
Uporedni prikaz U_{oc} za optimalno postavljen čist (1) i optimalno postavljen solarni modul sa nataloženom čađi (2) u zavisnosti od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017. dat je na slici 3.145.



Slika 3.145. Uporedni prikaz U_{oc} za optimalno postavljen čist (1) i optimalno postavljen solarni modul sa nataloženom čađi (2) u zavisnosti od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017.

Na slici 3.145. se vidi da se u toku grejne sezone 2016/2017. kod optimalno postavljenih solarnih modula vrednosti U_{oc} kreću od 20,0 V nultog dana do 19,6 V 168. dana merenja za čist, i od 20,0 V nultog dana do 19,1 V 168. dana merenja za modul zaprljan nataloženom čađi. Na slici 3.145. se takođe vidi da je kod optimalno postavljenog solarnog modula smanjenje U_{oc} usled taloženja čađi vrlo malo.

Smanjenje U_{oc} kod optimalno postavljenog solarnog modula usled taloženja čađi u zavisnosti od količine padavina u toku grejne sezone 2016/2017. dato je na slici 3.146.

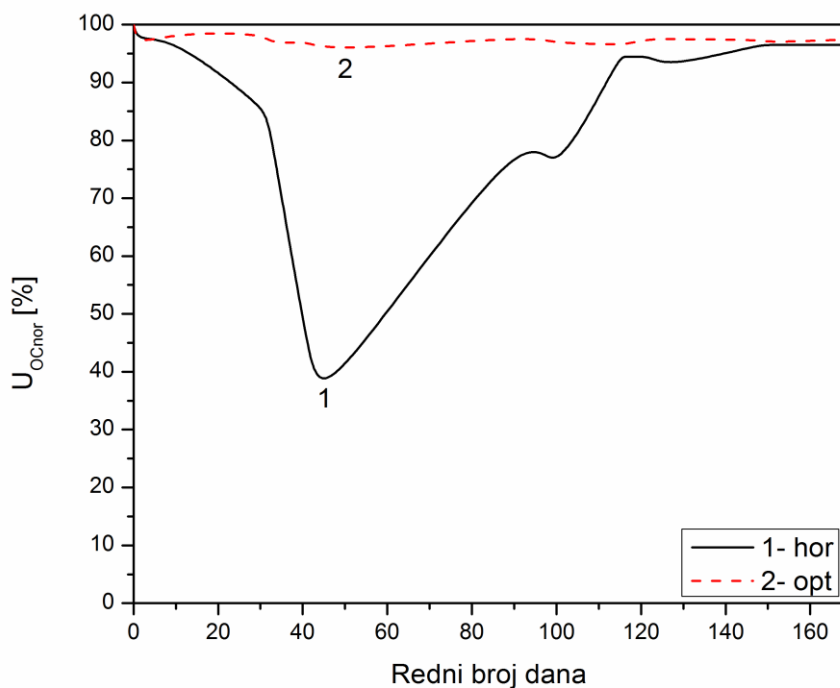


Slika 3.146. Smanjenje U_{oc} kod optimalno postavljenog solarnog modula usled taloženja čađi u zavisnosti od količine padavina u toku grejne sezone 2016/2017.

Na slici 3.146. se vidi da je u toku grejne sezone 2016/2017. kod optimalno postavljenog solarnog modula smanjenje U_{oc} usled taloženja čađi bilo najmanje 31. dana i iznosilo je 1,4%, a najveće 45. dana i iznosilo je 4,7%. Na slici 3.146. se takođe vidi da je bez obzira na količinu padavina smanjenje U_{oc} kod optimalno postavljenog solarnog modula usled taloženja čađi vrlo malo.

Uporedni prikaz

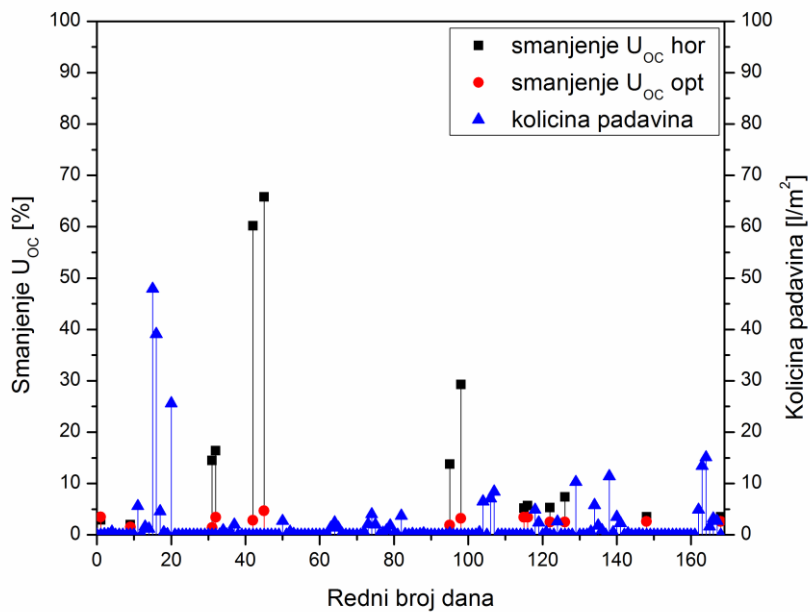
Zavisnost normalizovanog napona otvorenog kola horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017. data je na slici 3.147.



Slika 3.147. Zavisnost normalizovanog napona otvorenog kola horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017.

Na slici 3.147. se vidi da je u toku grejne sezone 2016/2017. smanjenje napona otvorenog kola horizontalnog solarnog modula uvek veće od smanjenja napona otvorenog kola optimalno postavljenog modula zato što se na horizontalnom modulu taloži više čađi.

Smanjenje U_{oc} kod horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula usled taloženja čađi u zavisnosti od količine padavina u toku grejne sezone 2016/2017. dato je na slici 3.148.



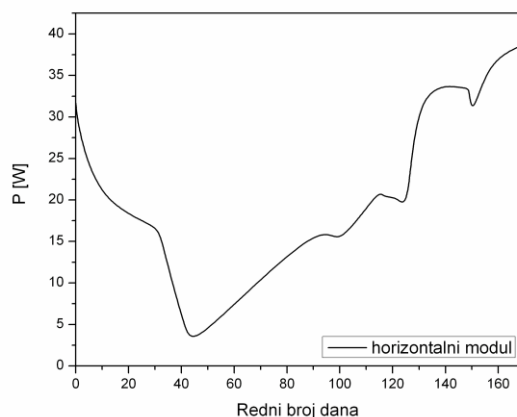
Slika 3.148. Smanjenje U_{oc} kod horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula usled taloženja čađi u zavisnosti od količine padavina u toku grejne sezone 2016/2017.

Na slici 3.148. se vidi da je u toku grejne sezone 2016/2017. smanjenje U_{oc} horizontalnog solarnog modula uvek veće od smanjenja U_{oc} optimalno postavljenog solarnog modula. Na slici 3.148. se vidi da je smanjenje U_{oc} horizontalnog solarnog modula usled taloženja čađi veće u periodima bez padavina, a da količina padavina ne utiče značajno na smanjenje U_{oc} optimalno postavljenog solarnog modula.

3.7.4. Rezultati merenja maksimalne snage čistih i solarnih modula zaprljanih nataloženom čađi postavljenih pod različitim uglovima u Nišu

Horizontalni modul

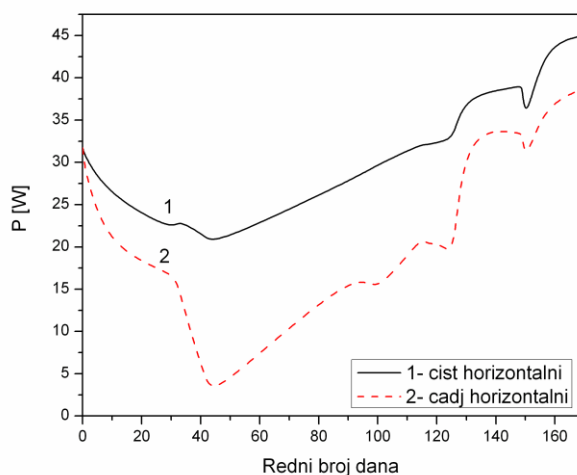
Zavisnost snage horizontalno postavljenog solarnog modula od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017. data je na slici 3.149.



Slika 3.149. Zavisnost snage horizontalno postavljenog solarnog modula od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017.

Na slici 3.149. se vidi da se u toku grejne sezone 2016/2017. kod horizontalnog solarnog modula vrednosti snage kreću od 31,7 W nultog dana merenja do 38,5 W 168. dana merenja.

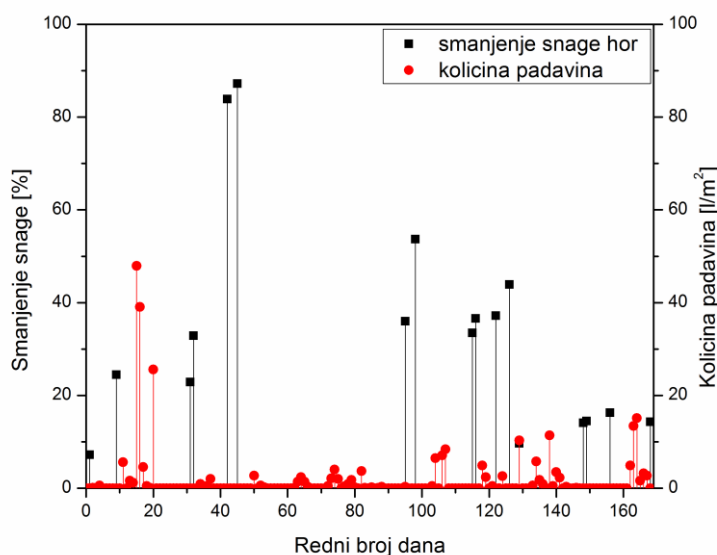
Uporedni prikaz snage za horizontalni čist (1) i horizontalni solarni modul sa nataloženom čađi (2) u zavisnosti od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017. dat je na slici 3.150.



Slika 3.150. Uporedni prikaz snage za horizontalni čist (1) i horizontalni solarni modul sa nataloženom čađi (2) u zavisnosti od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017.

Na slici 3.150. se vidi da se u toku grejne sezone 2016/2017. kod horizontalnih solarnih modula vrednosti snage kreću od 31,7 W nultog dana do 44,9 W 168. dana merenja za čist, i od 31,7 W nultog dana do 38,5 W 168. dana merenja za modul zaprljan nataloženom čađi.

Smanjenje snage horizontalnog solarnog modula usled taloženja čađi u zavisnosti od količine padavina u toku grejne sezone 2016/2017. dato je na slici 3.151.

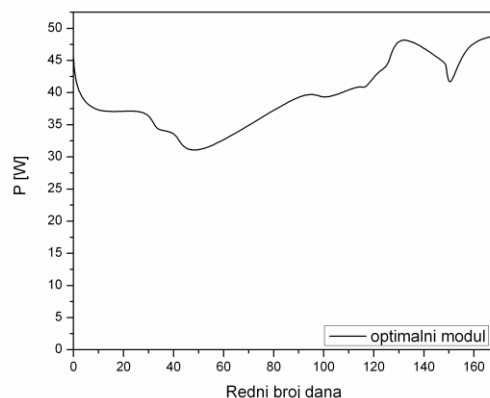


Slika 3.151. Smanjenje snage horizontalnog solarnog modula usled taloženja čađi u zavisnosti od količine padavina u toku grejne sezone 2016/2017.

Na slici 3.151. se vidi da je u toku grejne sezone 2016/2017. kod horizontalnog solarnog modula smanjenje snage usled taloženja čađi bilo najmanje prvog dana i iznosilo je 7,2%, a najveće 45. dana i iznosilo je 87,2%. Na slici 3.151. se takođe vidi da je smanjenje snage horizontalnog solarnog modula usled taloženja čađi veće u periodima bez padavina.

Optimalno postavljen modul

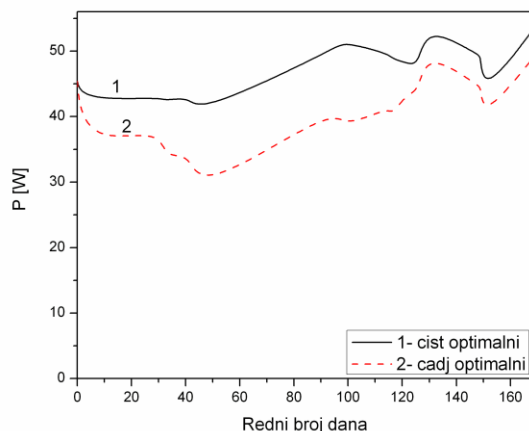
Zavisnost snage optimalno postavljenog solarnog modula od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017. data je na slici 3.152.



Slika 3.152. Zavisnost snage optimalno postavljeneog solarnog modula od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017.

Na slici 3.152. se vidi da se u toku grejne sezone 2016/2017. kod optimalno postavljeneog solarnog modula vrednosti snage kreću od 45,4 W nultog dana merenja do 48,8 W 168. dana merenja.

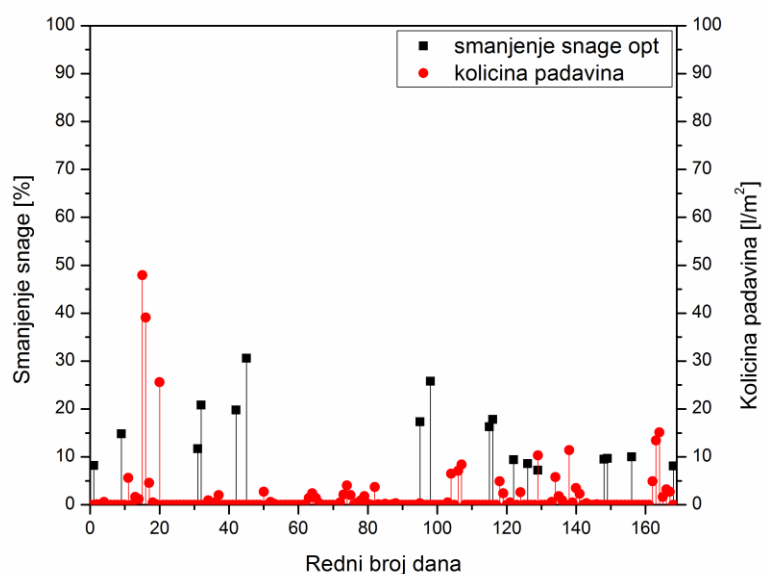
Uporedni prikaz snage za optimalno postavljene čist (1) i optimalno postavljene solarni modul sa nataloženom čađi (2) u zavisnosti od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017. dat je na slici 3.153.



Slika 3.153. Uporedni prikaz snage za optimalno postavljene čist (1) i optimalno postavljene solarni modul sa nataloženom čađi (2) u zavisnosti od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017.

Na slici 3.153. se vidi da se u toku grejne sezone 2016/2017. kod horizontalnih solarnih modula vrednosti snage kreću od 45,4 W nultog dana do 53,1 W 168. dana merenja za čist, i od 45,4 W nultog dana do 48,8 W 168. dana merenja za modul zaprljan nataloženom čađi.

Smanjenje snage optimalno postavljenog solarnog modula usled taloženja čađi u zavisnosti od količine padavina u toku grejne sezone 2016/2017. dato je na slici 3.154.

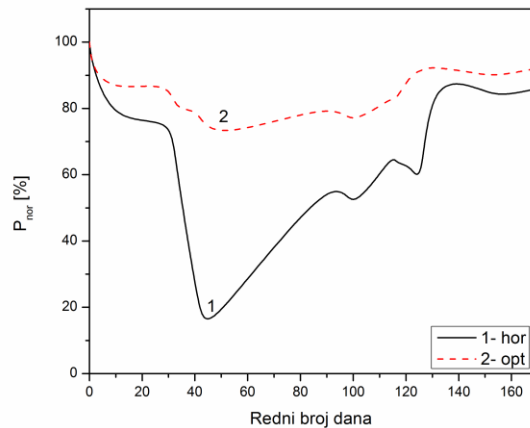


Slika 3.154. Smanjenje snage optimalno postavljenog solarnog modula usled taloženja čađi u zavisnosti od količine padavina u toku grejne sezone 2016/2017.

Na slici 3.154. se vidi da je u toku grejne sezone 2016/2017. kod optimalno postavljenog solarnog modula smanjenje snage usled taloženja čađi bilo najmanje 129. dana i iznosilo je 7,2%, a najveće 45. dana i iznosilo je 30,6%. Na slici 3.154. se takođe vidi da je smanjenje snage optimalno postavljenog solarnog modula usled taloženja čađi veće u periodima bez padavina.

Uporedni prikaz

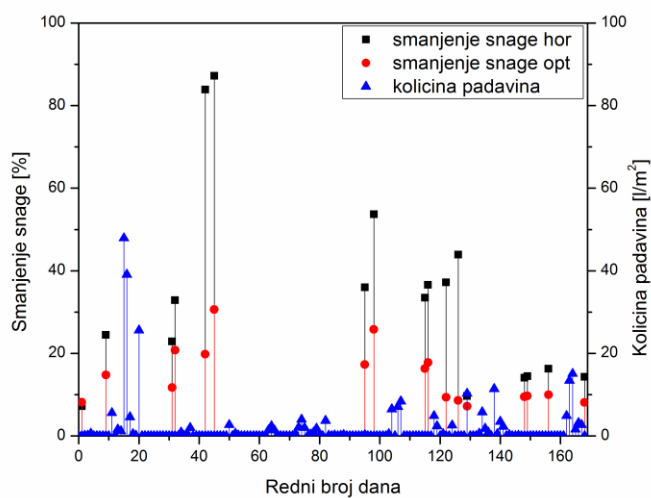
Zavisnost normalizovane snage horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017. data je na slici 3.155.



Slika 3.155. Zavisnost normalizovane snage horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017.

Na slici 3.155. se vidi da je u toku grejne sezone 2016/2017. smanjenje snage horizontalnog solarnog modula uvek veće od smanjenja snage optimalno postavljenog modula zato što se na horizontalnom modulu taloži više čađi.

Smanjenje snage horizontalnog i optimalno postavljenog solarnog modula usled taloženja čađi u zavisnosti od količine padavina u toku grejne sezone 2016/2017. dato je na slici 3.156.



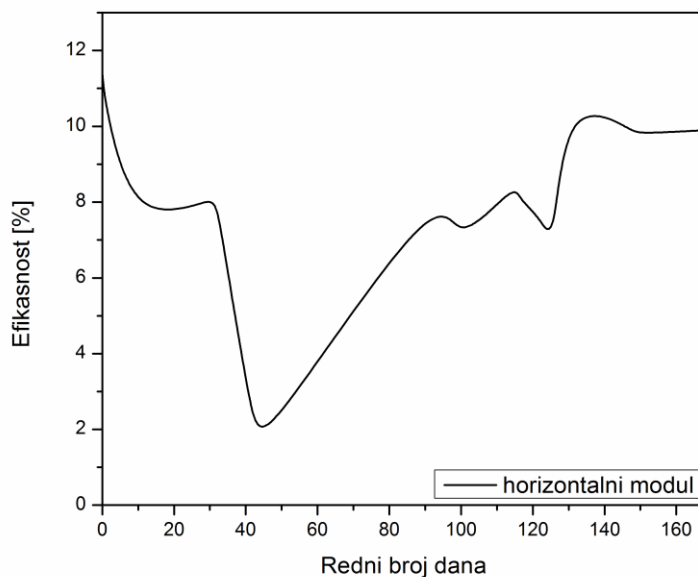
Slika 3.156. Smanjenje snage horizontalnog i optimalno postavljenog solarnog modula usled taloženja čađi u zavisnosti od količine padavina u toku grejne sezone 2016/2017.

Na slici 3.156. se vidi da je u toku grejne sezone 2016/2017. smanjenje snage horizontalnog solarnog modula uvek veće od smanjenja snage optimalno postavljenog solarnog modula. Na slici 3.156. se takođe vidi da je smanjenje snage horizontalnog i optimalno postavljenog solarnog modula usled taloženja čađi veće u periodima bez padavina.

3.7.5. Rezultati eksperimentalnog određivanja energetske efikasnosti čistih i solarnih modula zaprljanih nataloženom čađi postavljenih pod različitim uglovima u Nišu

Horizontalni modul

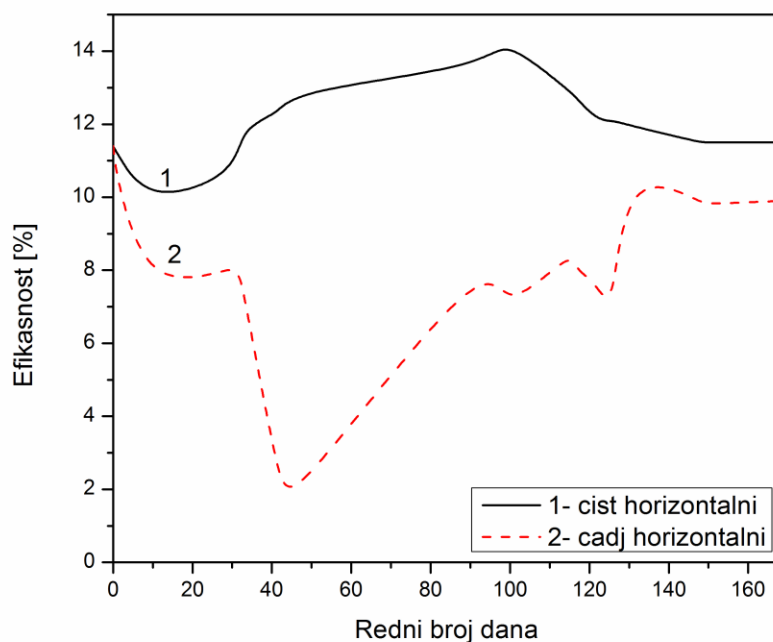
Zavisnost efikasnosti horizontalno postavljenog solarnog modula od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017. data je na slici 3.157.



Slika 3.157. Zavisnost efikasnosti horizontalno postavljenog solarnog modula od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017.

Na slici 3.157. se vidi da se u toku grejne sezone 2016/2017. kod horizontalno postavljenog solarnog modula vrednosti efikasnosti kreću od 11,4% nultog dana merenja do 9,9% 168. dana merenja.

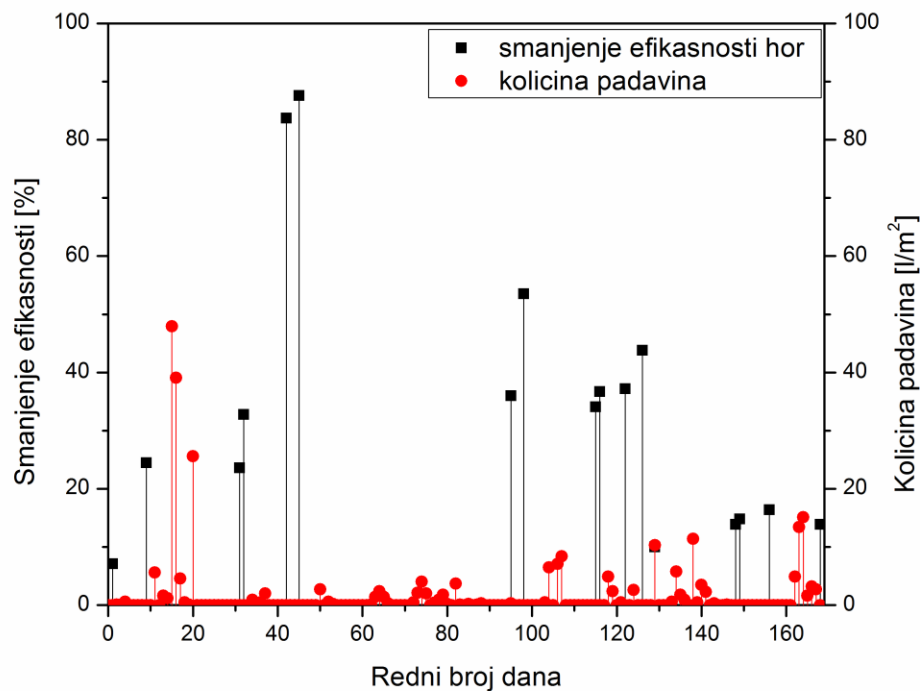
Uporedni prikaz efikasnosti za horizontalni čist (1) i horizontalni solarni modul sa nataloženom čađi (2) u zavisnosti od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017. dat je na slici 3.158.



Slika 3.158. Uporedni prikaz efikasnosti za horizontalni čist (1) i horizontalni solarni modul sa nataloženom čađi (2) u zavisnosti od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017.

Na slici 3.158. se vidi da se u toku grejne sezone 2016/2017. kod horizontalno postavljenih solarnih modula vrednosti efikasnosti kreću od 11,4% nultog dana do 11,5% 168. dana merenja za čist, i od 11,4% nultog dana do 9,9% 168. dana merenja za solarni modul zaprljan nataloženom čađi.

Smanjenje efikasnosti horizontalno postavljenog solarnog modula usled taloženja čađi u zavisnosti od količine padavina u toku grejne sezone 2016/2017. dato je na slici 3.159.

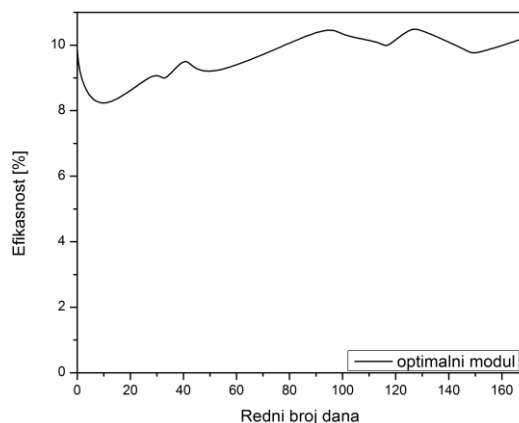


Slika 3.159. Smanjenje efikasnosti horizontalno postavljenog solarnog modula usled taloženja čađi u zavisnosti od količine padavina u toku grejne sezone 2016/2017.

Na slici 3.159. se vidi da je u toku grejne sezone 2016/2017. kod horizontalno postavljenog solrnog modula smanjenje efikasnosti usled taloženja čađi bilo najmanje prvog dana i iznosilo je 7,1%, a najveće 45. dana i iznosilo je 87,6%. Na slici 3.159. se takođe vidi da je smanjenje efikasnosti horizontalno postavljenog solarnog modula usled taloženja čađi veće u periodima bez padavina.

Optimalno postavljen modul

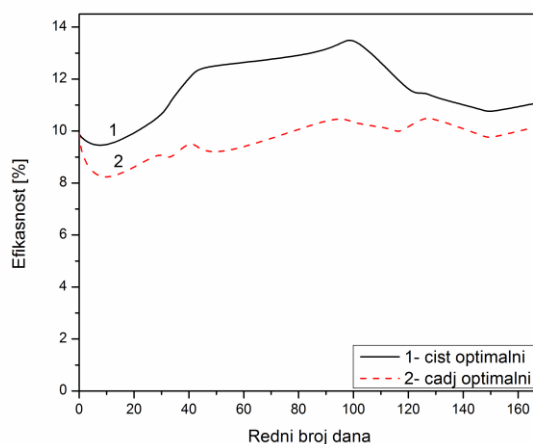
Zavisnost efikasnosti optimalno postavljenog solarnog modula od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017. data je na slici 3.160.



Slika 3.160. Zavisnost efikasnosti optimalno postavljenog solarnog modula od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017.

Na slici 3.160. se vidi da se u toku grejne sezone 2016/2017. kod optimalno postavljenog solarnog modula vrednosti efikasnosti kreću od 9,9% nultog dana merenja do 10,2% 168. dana merenja.

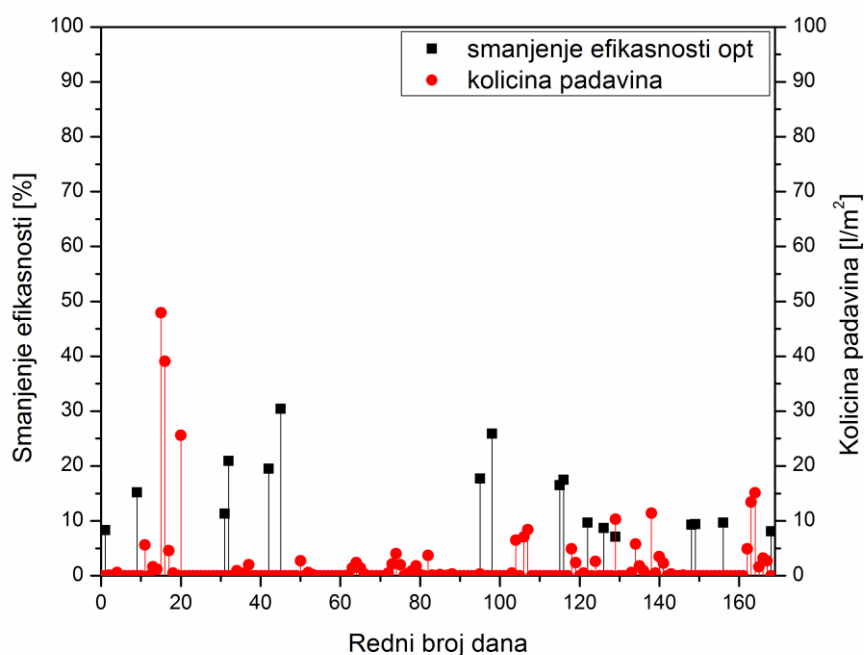
Uporedni prikaz efikasnosti za optimalno postavljen čist (1) i optimalno postavljen solarni modul sa nataloženom čađi (2) u zavisnosti od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017. dat je na slici 3.161.



Slika 3.161. Uporedni prikaz efikasnosti za optimalno postavljen čist (1) i optimalno postavljen solarni modul sa nataloženom čađi (2) u zavisnosti od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017.

Na slici 3.161. se vidi da se u toku grejne sezone 2016/2017. kod optimalno postavljenih solarnih modula vrednosti efikasnosti kreću od 9,9% nultog dana do 11,1% 168. dana merenja za čist, i od 9,9% nultog dana do 10,2% 168. dana merenja za solarni modul zaprljan nataloženom čađi.

Smanjenje efikasnosti optimalno postavljenog solarnog modula usled taloženja čađi u zavisnosti od količine padavina u toku grejne sezone 2016/2017. dato je na slici 3.162.

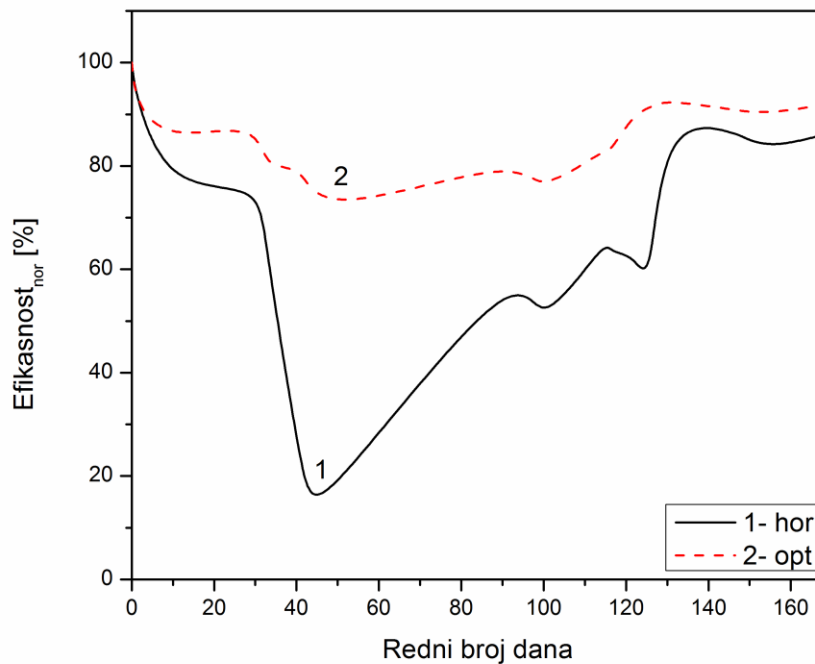


Slika 3.162. Smanjenje efikasnosti optimalno postavljenog solarnog modula usled taloženja čađi u zavisnosti od količine padavina u toku grejne sezone 2016/2017.

Na slici 3.162. se vidi da je u toku grejne sezone 2016/2017. kod optimalno postavljenog solarnog modula smanjenje efikasnosti usled taloženja čađi bilo najmanje 129. dana i iznosilo je 7,1%, a najveće 45. dana i iznosilo je 30,4%. Na slici 3.162. se takođe vidi da je smanjenje efikasnosti optimalno postavljenog solarnog modula usled taloženja čađi veće u periodima bez padavina.

Uporedni prikaz

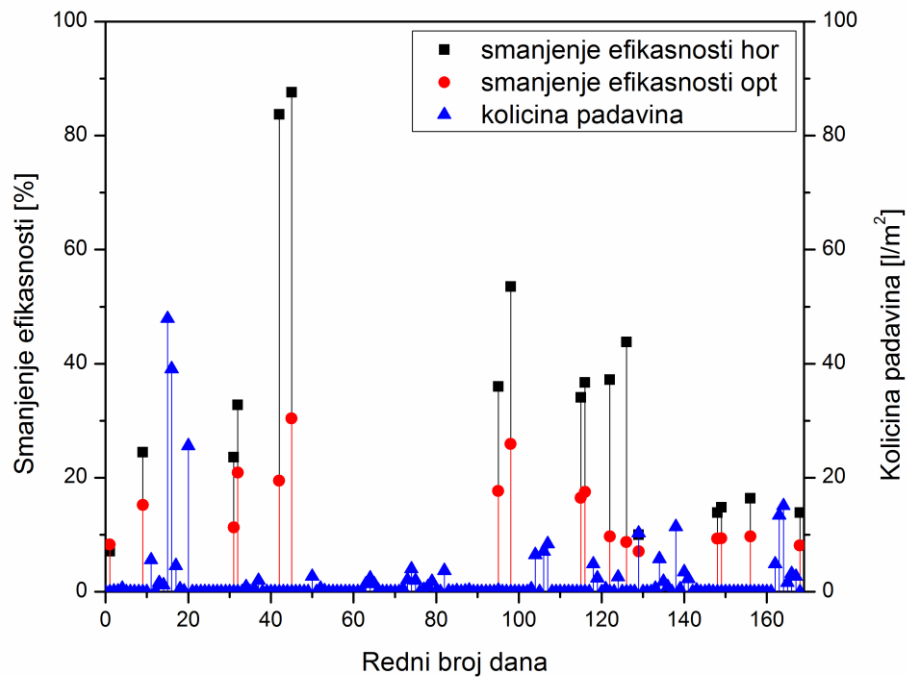
Zavisnost normalizovane efikasnosti horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017. data je na slici 3.163.



Slika 3.163. Zavisnost normalizovane efikasnosti horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017.

Na slici 3.163. se vidi da je u toku grejne sezone 2016/2017. smanjenje efikasnosti horizontalnog solarnog modula uvek veće od smanjenja efikasnosti optimalno postavljenog modula zato što se na horizontalnom modulu taloži više čađi.

Smanjenje efikasnosti horizontalnog i optimalno postavljenog solarnog modula usled taloženja čađi u zavisnosti od količine padavina u toku grejne sezone 2016/2017. dato je na slici 3.164.

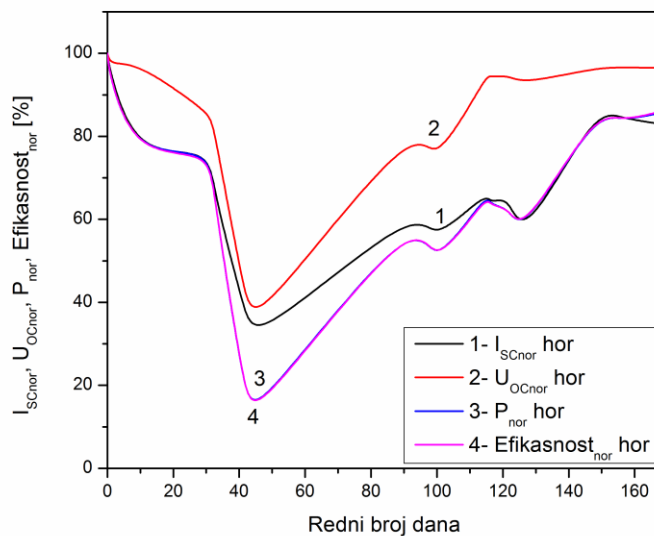


Slika 3.164. Smanjenje efikasnosti horizontalnog i optimalno postavljenog solarnog modula usled taloženja čađi u zavisnosti od količine padavina u toku grejne sezone 2016/2017.

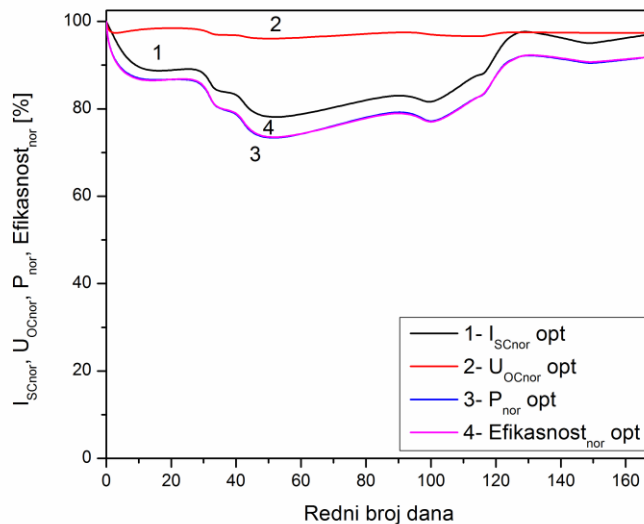
Na slici 3.164. se vidi da je u toku grejne sezone 2016/2017. smanjenje efikasnosti horizontalnog solarnog modula uvek veće od smanjenja efikasnosti optimalnog solarnog modula. Na slici 3.164. se takođe vidi da je smanjenje efikasnosti horizontalnog i optimalno postavljenog solarnog modula usled taloženja čađi veće u periodima bez padavina.

3.7.6. Uporedni prikaz parametara solarnih modula zaprljanih nataloženom čađi

Zavisnost normalizovane I_{sc} , U_{oc} , P i efikasnosti horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula zaprljanih nataloženom čađi od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017. data je na slikama 3.165. i 3.166.



Slika 3.165. Zavisnost normalizovane I_{sc} , U_{oc} , P i efikasnosti horizontalno postavljenog solarnog modula zaprljanog nataloženom čađi od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017.



Slika 3.166. Zavisnost normalizovane I_{sc} , U_{oc} , P i efikasnosti optimalno postavljenog solarnog modula zaprljanog nataloženom čađi od rednog broja dana merenja u toku grejne sezone 2016/2017.

Na slici 3.165. se vidi da se kod horizontalno postavljenog solarnog modula usled taloženja čađi u toku grejne sezone 2016/2017. najviše smanjuju snaga i efikasnost, zatim I_{sc} i najmanje U_{oc} .

Na slici 3.166. se vidi da se kod optimalno postavljenog solarnog modula usled taloženja čađi u toku grejne sezone 2016/2017. najviše smanjuju snaga i efikasnost, zatim I_{sc} , a smanjenje U_{oc} je neznatno.

LITERATURA

- [1] I. S. Radonjić et al., *Investigation of the impact of atmospheric pollutants on solar module energy efficiency*, Thermal Science, Volume 21, No. 5, 2017, pp. 2021-2030, <http://thermalscience.vinca.rs/pdfs/papers-2016/TSCI160408176R.pdf>
- [2] I. S. Radonjić et al., *Investigation of solar module energy efficiency depending on their surface soiling degree*, Proceedings of Scientific Conference UNITECH 2016, 18-19 November 2016, Gabrovo, Volume I, pp. 147-151.
- [3] I. S. Radonjić, T. M. Pavlović, *Investigation of the energy efficiency of horizontally mounted solar module soiled with $CaCO_3$* , Facta Universitatis: Series Physics, Chemistry and Technology, Volume 15, No. 2, 2017, pp. 57-69.
- [4] I. S. Radonjić et al., *Investigation of the energy efficiency of soiled solar module mounted at the optimal angle*, Proceedings of International Scientific Conference UNITECH 2017, 17-18 November 2017, Gabrovo, Volume I, pp. 84-88.

ZAKLJUČAK

Na osnovu iznetog mogu da se izvedu zaključci koji se odnose na opšti deo, eksperiment, generalne konstatacije i praktičnu primenu dobijenih rezultata.

Opšti deo

- Intenzitet Sunčevog zračenja koje dospeva do Zemlje zavisi od apsorpcije, rasejanja, prelamanja i scintilacije Sunčevog zračenja u atmosferi;
- konverzija Sunčevog zračenja u električnu energiju odvija se na solarnim ćelijama koje se karakterišu sledećim parametrima: strujom kratkog spoja, naponom otvorenog kola, maksimalnom snagom, fil faktorom i efikasnošću;
- prašina predstavlja mešavinu različitih polutanata koji su karakteristični za određeno geografsko područje;
- čestice prašine se prema veličini svog prečnika mogu podeliti na: fine, odnosno sitnije (sa prečnikom manjim od $2,5 \mu\text{m}$) i grube, odnosno krupnije (sa prečnikom većim od $2,5 \mu\text{m}$);
- u sastav prašine najčešće ulaze organski minerali (uglavnom pesak (kvarc) i erodirani krečnjak (kalcit), a nešto manje dolomit i glina, itd.) i čestice koje nastaju usled sagorevanja fosilnih goriva, pri čemu prašina može da sadrži i male količine polena i gljiva, bakterija, vegetacije, mikrovlakana, itd;
- najefikasnije sredstvo za čišćenje solarnih modula je voda.

Eksperiment

Na osnovu rezultata eksperimentalnog određivanja energetske efikasnosti solarnih modula u zavisnosti od njihove zaprljanosti u realnim klimatskim ulovima u Nišu može se zaključiti sledeće:

Zaprljanost ugljenikom

- Čestice ugljenika imaju listastu strukturu, male su debljine, imaju prečnik oko 30 μm i raspoređene su homogeno i gusto tako da je prostor između njih kroz koji svetlost može da prođe veoma mali;
- struja kratkog spoja vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula se smanjuje sa povećanjem mase nanetog ugljenika;
- smanjenje struje kratkog spoja usled zaprljanja ugljenikom najveće je kod horizontalno postavljenog, zatim kod optimalno postavljenog i najmanje kod vertikalno postavljenog solarnog modula;
- napon otvorenog kola vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula blago opada sa povećanjem mase nanetog ugljenika;
- pad napona otvorenog kola usled zaprljavanja ugljenikom je najmanji kod optimalno postavljenog modula, nešto veći kod vertikalnog modula i najveći kod horizontalnog modula;
- snaga vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula smanjuje sa povećanjem mase nanetog ugljenika;
- smanjenje snage usled zaprljanja ugljenikom najveće je kod horizontalnog, zatim kod optimalno postavljenog i najmanje kod vertikalnog solarnog modula;

- efikasnost vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula smanjuje se sa povećanjem mase nanetog ugljenika;
- smanjenje efikasnosti solarnih modula usled njihovog zaprljanja ugljenikom je najveće kod horizontalnog, zatim kod optimalno postavljenog i najmanje kod vertikalnog solarnog modula;
- usled zaprljanja sa 1 g ugljenika efikasnost vertikalno postavljenog modula smanjila za 18,0%, horizontalno postavljenog za 20,0% i optimalno postavljenog za 11,8%;
- usled zaprljanja sa 2 g ugljenika efikasnost vertikalno postavljenog modula smanjila se za 30,8%, horizontalno postavljenog za 49,6% i optimalno postavljenog za 33,0%;
- usled zaprljanja sa 3,3 g ugljenika efikasnost vertikalno postavljenog modula smanjila se za 44,2%, horizontalno postavljenog za 56,9% i optimalno postavljenog za 52,4%;
- kod vertikalno postavljenog solarnog modula usled njegovog zaprljanja ugljenikom jednako se smanjuju struja kratkog spoja, snaga i efikasnost, a napon otvorenog kola se smanjuje neznatno;
- kod horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula usled njihovog zaprljanja ugljenikom najviše se smanjuje struja kratkog spoja, zatim snaga i efikasnost, a smanjenje napona otvorenog kola je malo.

Zaprljanost kalcijum-karbonatom

- Čestice kalcijum-karbonata imaju kubičnu strukturu, prečnik im je oko 30 μm , raspoređene su homogeno, ali je prostor između čestica kroz koji svetlost može da prođe veći nego kod čestica ugljenika;

- struja kratkog spoja vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenog solarnog modula smanjuje se sa povećanjem mase nanetog kalcijum-karbonata;
- smanjenje struje kratkog spoja solarnih modula usled njihovog zaprljanja kalcijum-karbonatom manje je kod optimalno postavljenog i horizontalnog, a veće kod vertikalnog solarnog modula;
- napon otvorenog kola horizontalno i optimalno postavljenih modula blago raste, a napon otvorenog kola vertikalno postavljenog modula blago opada sa porastom mase nanetog kalcijum-karbonata;
- snaga vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula smanjuje se sa povećanjem mase nanetog kalcijum-karbonata;
- smanjenje snage solarnih modula usled njihovog zaprljanja kalcijum-karbonatom je manje kod optimalno postavljenog i horizontalnog, a veće kod vertikalnog solarnog modula;
- efikasnosti vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula se smanjuju sa povećanjem mase nanetog kalcijum-karbonata;
- smanjenje efikasnosti solarnih modula usled njihovog zaprljanja kalcijum-karbonatom je manje kod optimalno postavljenog i horizontalnog solarnog modula nego kod vertikalnog solarnog modula;
- usled zaprljanja sa 1 g kalcijum-karbonata efikasnost vertikalnog modula smanjila se za 16,2%, horizontalnog za 4,6% i optimalno postavljenog za 3,8%;
- usled zaprljanja sa 2 g kalcijum-karbonata efikasnost vertikalnog modula smanjila se za 19,1%, horizontalnog za 6,0% i optimalno postavljenog za 6,4%;

- usled zaprljanja sa 3 g kalcijum-karbonata efikasnost vertikalnog modula smanjila se za 23,2%, horizontalnog za 12,9% i optimalno postavljenog za 13,8%;
- kod vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula usled njihovog zaprljanja kalcijum-karbonatom najviše se smanjuje struja kratkog spoja, zatim snaga i efikasnost, a napon otvorenog kola se neznatno menja.

Zaprljanost zemljom

- Dimenzije čestica zemlje su veoma različite i imaju vrednost od 20-300 μm , a mali broj čestica ima prečnik i do 500 μm , pri čemu je prostor između njih kroz koji svetlost može da prođe veći nego kod čestica ugljenika;
- struja kratkog spoja vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula smanjuje se sa povećanjem mase nanete zemlje;
- smanjenje struje kratkog spoja solarnih modula usled njihovog zaprljanja zemljom najmanje je kod optimalno postavljenih, zatim kod horizontalnih, a najveće kod vertikalnih solarnih modula;
- napon otvorenog kola horizontalnog i optimalno postavljenog modula blago raste, a napon otvorenog kola vertikalnog modula blago opada sa porastom mase nanete zemlje;
- snaga vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula smanjuje sa povećanjem mase nanete zemlje;
- smanjenje snage usled zaprljanja zemljom najmanje je kod optimalno postavljenog, zatim kod horizontalnog, a najveće kod vertikalnog solarnog modula;
- efikasnost vertikalno, horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula smanjuje se sa povećanjem mase nanete zemlje;

- smanjenje efikasnosti solarnih modula usled njihovog zaprljanja zemljom je najmanje kod optimalno postavljenog, zatim kod horizontalnog, a najveće kod vertikalnog solarnog modula;
- usled zaprljanja sa 1 g zemlje efikasnost vertikalno postavljenog modula smanjila se za 15,5% i horizontalno postavljenog za 3,3%;
- usled zaprljanja sa 2 g zemlje efikasnost vertikalno postavljenog modula smanjila se za 19,1%, horizontalno postavljenog za 7,7% i optimalno postavljenog za 2,4%;
- usled zaprljanja sa 3 g zemlje efikasnost vertikalno postavljenog modula smanjila se za 23,6%, horizontalno postavljenog za 13,2% i optimalno postavljenog za 6,0%;
- kod vertikalno postavljenog solarnog modula usled njegovog zaprljanja zemljom jednako se smanjuju struja kratkog spoja, snaga i efikasnost, a napon otvorenog kola se smanjuje neznatno;
- kod horizontalno i optimalno postavljenih solarnih modula usled njihovog zaprljanja zemljom najviše se smanjuje struja kratkog spoja, zatim snaga i efikasnost, a napon otvorenog kola se neznatno menja.

Zaključci u vezi uporednog prikaza zaprljanosti ugljenikom, kalcijum-karbonatom i zemljom

- Struja kratkog spoja vertikalno postavljenog solarnog modula najviše se smanjuje usled njegovog zaprljanja ugljenikom (za 29,5%), zatim kalcijum-karbonatom (za 24,5%) i najmanje zemljom (za 20,7%);
- napon otvorenog kola vertikalno postavljenog solarnog modula najviše se smanjuje usled njegovog zaprljanja ugljenikom (za 5,6%), a smanjenje napona otvorenog kola usled zaprljanja kalcijum-karbonatom (za 2,1%) i zemljom (za 2,3%) je slično;

- snaga vertikalno postavljenog solarnog modula najviše se smanjuje usled njegovog zaprljanja ugljenikom (za 30,6%), a smanjenje snage usled zaprljanja kalcijum-karbonatom (za 19,1%) i zemljom (za 19,5%) je slično;
- efikasnost vertikalno postavljenog solarnog modula najviše se smanjuje usled njegovog zaprljanja ugljenikom (za 30,8%), a smanjenje efikasnosti usled zaprljanja kalcijum-karbonatom (za 19,1%) i zemljom je isto (za 19,1%);
- struja kratkog spoja horizontalno postavljenog solarnog modula najviše se smanjuje usled njegovog zaprljanja ugljenikom (za 53,6%), a smanjenje struje kratkog spoja usled zaprljanja kalcijum-karbonatom (za 15,5%) i zemljom (za 13,7%) je slično;
- napon otvorenog kola horizontalno postavljenog solarnog modula malo se smanjuje usled njegovog zaprljanja ugljenikom (za 4,8%), i malo povećava usled zaprljanja kalcijum-karbonatom (za 2,7%) i zemljom (za 3,6%);
- snaga horizontalno postavljenog solarnog modula najviše se smanjuje usled njegovog zaprljanja ugljenikom (za 49,7%), zatim zemljom (za 8,1%) i najmanje kalcijum-karbonatom (za 6,1%);
- efikasnost horizontalno postavljenog solarnog modula najviše se smanjuje usled njegovog zaprljanja ugljenikom (za 49,6%), zatim zemljom (za 7,7%) i najmanje kalcijum-karbonatom (za 6,0%);
- struja kratkog spoja optimalno postavljenog solarnog modula najviše se smanjuje usled njegovog zaprljanja ugljenikom (za 42,4%), zatim kalcijum-karbonatom (za 17,7%) i najmanje zemljom (za 10,8%);

- napon otvorenog kola optimalno postavljenog solarnog modula neznatno se smanjuje usled njegovog zaprljanja ugljenikom (za 0,1%), i malo povećava usled zaprljanja kalcijum-karbonatom (za 2,7%) i zemljom (za 3,3%);
- snaga optimalno postavljenog solarnog modula najviše se smanjuje usled njegovog zaprljanja ugljenikom (za 33,5%), zatim kalcijum-karbonatom (za 6,3%) i najmanje zemljom (za 2,3%);
- efikasnost optimalno postavljenog solarnog modula najviše se smanjuje usled njegovog zaprljanja ugljenikom (za 33,0%), zatim kalcijum-karbonatom (za 6,4%) i najmanje zemljom (za 2,4%).

Klimatski parametri

- U periodu od 24.10.2016. do 10.04.2017. godine najmanja vrednost intenziteta Sunčevog zračenja izmerena je 65. dana merenja od 8 W/m², a najveća 163. dana od 834 W/m²;
- u periodu od 24.10.2016. do 10.04.2017. godine najmanja vrednost temperature ambijenta izmerena je 76. dana merenja od -12,5°C, a najveća 149. dana od 23,3°C;
- u periodu od 24.10.2016. do 10.04.2017. godine najveća vrednost količine padavina izmerena je 15. dana merenja od 47,9 l/m²;
- u periodu od 24.10.2016. do 10.04.2017. godine najmanja vrednost relativne vlažnosti vazduha izmerena je 161. dana merenja od 20%, a najveća 15, 18. i 63. dana od 100%.

Zaprljanost nataloženom čađi

- Čestice čađi su uglavnom sfernog oblika, imaju poroznu strukturu, najveći broj čestica čađi ima prečnik od 20 μm do 50 μm i raspoređene su homogeno i gusto tako da je prostor između njih kroz koji svetlost može da prođe veoma mali;

- struja kratkog spoja, napon otvorenog kola, snaga i efikasnost horizontalnog i optimalno postavljenog solarnog modula smanjuju se usled taloženja čađi na njima;
- smanjenje struje kratkog spoja, napona otvorenog kola, snage i efikasnosti horizontalnog solarnog modula uvek je veće od smanjenja struje kratkog spoja, napona otvorenog kola, snage i efikasnosti optimalno postavljenog modula usled taloženja čađi na njima;
- smanjenje struje kratkog spoja horizontalnog i optimalno postavljenog modula usled taloženja čađi je veće u periodima bez padavina;
- smanjenje napona otvorenog kola horizontalnog modula usled taloženja čađi je veće u periodima bez padavina, a količina padavina ne utiče značajno na smanjenje napona otvorenog kola optimalno postavljenog modula;
- smanjenje snage i efikasnosti horizontalnog i optimalno postavljenog modula usled taloženja čađi je veće u periodima bez padavina;
- kod horizontalnog solarnog modula usled taloženja čađi se najviše smanjuju snaga i efikasnost, zatim struja kratkog spoja i najmanje napon otvorenog kola;
- kod optimalno postavljenog solarnog modula usled taloženja čađi se najviše smanjuju snaga i efikasnost, zatim struja kratkog spoja, a smanjenje napona otvorenog kola je neznatno.

Generalne konstatacije

- Struja kratkog spoja vertikalnog, horizontalnog i optimalno postavljenog solarnog modula najviše se smanjuje usled zaprljanja ugljenikom, zatim kalcijum-karbonatom i najmanje zemljom;

- napon otvorenog kola vertikalnog, horizontalnog i optimalno postavljenog solarnog modula se smanjuje usled zaprljanja ugljenikom;
- napon otvorenog kola vertikalnog solarnog modula se smanjuje usled zaprljanja kalcijum-karbonatom i zemljom, a napon otvorenog kola horizontalnog i optimalno postavljenog solarnog modula se usled zaprljanja kalcijum-karbonatom i zemljom malo povećava;
- snaga i efikasnost vertikalnog solarnog modula najviše se smanjuju usled zaprljanja ugljenikom, a smanjenje snage i efikasnosti usled zaprljanja kalcijum-karbonatom i zemljom je slično;
- snaga i efikasnost horizontalnog solarnog modula najviše se smanjuju usled zaprljanja ugljenikom, zatim zemljom i najmanje kalcijum-karbonatom;
- snaga i efikasnost optimalno postavljenog solarnog modula najviše se smanjuju usled zaprljanja ugljenikom, zatim kalcijum-karbonatom i najmanje zemljom;
- smanjenje struje kratkog spoja, napona otvorenog kola, snage i efikasnosti horizontalnog solarnog modula uvek je veće od smanjenja struje kratkog spoja, napona otvorenog kola, snage i efikasnosti optimalno postavljenog modula usled taloženja čađi na njima;
- smanjenje struje kratkog spoja, snage i efikasnosti horizontalnog i optimalno postavljenog modula usled taloženja čađi je veće u periodima bez padavina;
- smanjenje napona otvorenog kola horizontalnog modula usled taloženja čađi je veće u periodima bez padavina, a količina padavina ne utiče značajno na smanjenje napona otvorenog kola optimalno postavljenog modula;
- zbog zaprljavanja solarnih modula mora se vršiti njihovo povremeno čišćenje.

Primena dobijenih rezultata

- Rezultati proučavanja energetske efikasnosti solarnih modula u zavisnosti od zaprljanosti njihove površine u realnim klimatskim uslovima u Srbiji mogu se primeniti za planiranje i projektovanje fotonaponskih solarnih elektrana i fotonaponskih sistema u privatnim domaćinstvima i drugim objektima u Srbiji;
- dobijeni rezultati se mogu primeniti i za planiranje i sprovođenje čišćenja i održavanja solarnih modula kako bi se na optimalan način vršila fotonaponska konverzija Sunčevog zračenja na postojećim i novim PV sistemima u Srbiji;
- rezultati dobijeni u doktorskoj disertaciji su od značaja za povećano korišćenje solarne energetike u Srbiji i smanjenje opterećenja postojećih izvora električne energije.

PUBLIKOVANI RADOVI KANDIDATA

a) Radovi u vrhunskom međunarodnom časopisu M21a (10 poena)

a1. T. Pavlović, I. Radonjić, D. Milosavljević, L. Pantić, *A review of concentrating solar power plants in the world and their potential use in Serbia*, Renewable and Sustainable energy Reviews, Vol. 16 (2012), Issue 6, pp. 3891-3902, doi:10.1016/j.rser.2012.03.042, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112002250>

a2. T. Pavlović, D. Milosavljević, D. Mirjanić, L. Pantić, I. Radonjić, D. Piršl, *Assessments and perspectives of PV solar power engineering in the Republic of Srpska (Bosnia and Herzegovina)*, Renewable and Sustainable energy Reviews, Vol.18 (2013), pp.119-133, doi:10.1016/j.rser.2012.10.007, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112005497>

a3. T. Pavlović, D. Milosavljević, I. Radonjić, L. Pantić, A. Radivojević, M. Pavlović, *Possibility of electricity generation using PV solar plants in Serbia*, Renewable and Sustainable energy Reviews, Vol. 20 (2013), pp. 201-218, doi: 10.1016/j.rser.2012.11.070, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112006843>

b) Rad u vrhunskom međunarodnom časopisu M21 (8 poena)

b1. L. S. Pantić, T. M. Pavlović, D. D. Milosavljević, I. S. Radonjić, M. K. Radović, G. Sazhko, *The assessment of different models to predict solar module temperature, output power and efficiency for Nis, Serbia*, Energy, 109 (2016), pp. 38-48, doi:10.1016/j.energy.2016.04.090, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544216305035>

c) Radovi u međunarodnom časopisu M23 (3 poena)

c1. T. Pavlović, I. Radonjić, D. Milosavljević, L. Pantić, D. Piršl, *Assessment and potential use of concentrating solar power plants in Serbia and Republic of Srpska*, Thermal Science, Vol. 16 (2012), No. 3, pp. 931-945, doi:10.2298/TSCI111027100P, <http://thermalscience.vinca.rs/pdfs/papers-2012/ThSci-DOYIYJ3D19.pdf>

c2. L. S. Pantić, T. M. Pavlović, D. D. Milosavljević, D. Lj. Mirjanić, I. S. Radonjić, M. K. Radović, *Electrical energy generation with differently oriented PV modules as façade elements*, Thermal Science, Volume 20, No. 4, 2016, pp. 1377-1386 doi:10.2298/TSCI150123157P, <http://thermalscience.vinca.rs/pdfs/papers-2015/TSCI150123157P.pdf>

c3. I. S. Radonjić, T. M. Pavlović, D. Lj. Mirjanić, M. K. Radović, D. D. Milosavljević, L. S. Pantić, *Investigation of the impact of atmospheric pollutants on solar module energy efficiency*, Thermal Science, Volume 21, No. 5, 2017, pp. 2021-2030, doi: 10.2298/TSCI160408176R, <http://thermalscience.vinca.rs/pdfs/papers-2016/TSCI160408176R.pdf>

d) Radovi u zbornicima sa međunarodnih naučnih skupova M33 (1 poen)

d1. I. Radonjić, T. Pavlović, D. Milosavljević, D. Mirjanić, L. Pantić, D. Piršl, *Influence of Different Types of Dust on PV Modules Energy Efficiency*, Proceedings of 1st Virtual International Conference on Science, Technology and Management in Energy “eNergetics 2015”, Research and Development Center “ALFATEC”, Niš, Serbia, pp. 94-99, 2015, ISBN: 978-86-80593-54-8

d2. I. S. Radonjić, T. M. Pavlović, D. Lj. Mirjanić, M. K. Radović, *Investigation of solar module energy efficiency depending on their surface soiling degree*, Proceedings of Scientific Conference UNITECH 2016, 18-19 November 2016, Gabrovo, Volume I, pp. 147-151, ISSN: 1313-230X

d3. I. S. Radonjić, T. M. Pavlović, D. Lj. Mirjanić, M. K. Radović, *Investigation of the energy efficiency of soiled solar module mounted at the optimal angle*, Proceedings of International Scientific Conference UNITECH 2017, 17-18 November 2017, Gabrovo, Volume I, pp. 84-88.

e) Nacionalne monografije i tematski zbornici M44 (2 poena)

e1. T. Pavlović, D. Milosavljević, I. Radonjić, D. Piršl, *Savremene mogućnosti korišćenja Sunčevog zračenja*, Monografija Energetika i životna sredina, Srpska akademija nauka i umetnosti, Naučni skupovi, Knjiga CXLIII, Odeljenje hemijskih i bioloških nauka, Knjiga 4, Beograd, 2013, str. 259-299, ISBN 978-86-7025-607-1

f) Rad u vodećem časopisu nacionalnog značaja M51 (2 poena)

f1. I. S. Radonjić, T. M. Pavlović, *Investigation of the energy efficiency of horizontally mounted solar module soiled with CaCO₃*, Facta Universitatis: Series Physics, Chemistry and Technology, Volume 15, No. 2, 2017, pp. 57-69, doi.org/10.2298/FUPCT1702057R, <http://casopisi.junis.ni.ac.rs/index.php/FUPhysChemTech/article/viewFile/2938/2148>

g) Radovi u časopisu Contemporary Materials M51 (2 poena)

g1. T. Pavlović, D. Milosavljević, D. Mirjanić, I. Radonjić, L. Pantić, D. Piršl, *Analyses of PV systems of 1 kW electricity generation in Bosnia and Herzegovina*, Contemporary Materials (Renewable energy sources), II-2, 2011, pp. 123-138, doi:10.5767/anurs.cmat.110202.en.123P, UDK 620.92:621.313.5.025.4, http://www.savremenimaterijali.info/sajt/doc/file/casopisi/2_2/3_pavlovic.pdf

g2. T. Pavlović, D. Milosavljević, I. Radonjić, L. Pantić, A. Radivojević, *Application of solar cells of different materials in PV solar plants of 1 MW in Banjaluka*, Contemporary Materials (Renewable energy sources), II-2, 2011, pp. 155-163, doi:10.5767/anurs.cmat.110202.en.155P, UDK 620.92:523.9(497.6 BANJA LUKA), http://savremenimaterijali.info/sajt/doc/file/casopisi/2_2/6_pavlovic.pdf

UČEŠĆE NA PROJEKTIMA

A) Projekti koje finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije

A1. *Ispitivanje energetske efikasnosti fotonaponske solarne elektrane od 2 kW*, TR 33009, 2011-, Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, rukovodilac: prof. dr Tomislav M. Pavlović, istraživač: Ivana S. Radonjić

A2. *Dielektrične, optičke i transportne osobine protonskih provodnika*, 141030G, 2005-2010, Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, rukovodilac: dr Aco Janićijević, istraživač: Ivana S. Radonjić

B) Međunarodni projekti

B1. *Ispitivanje energetske efikasnosti fotonaponske solarne elektrane od 2 kW*, 2011-2015, Ministarstvo nauke i tehnologije Republike Srpske, rukovodilac projekta: akademik prof. dr Dragoljub Mirjanić, Akademija nauka i umjetnosti Republike Srpske, istraživač: Ivana S. Radonjić

BIOGRAFIJA

IVANE S. RADONJIĆ MITIĆ

istraživača-saradnika na Prirodno-matematičkom fakultetu Univerziteta u Nišu

Ivana S. Radonjić Mitić rođena je u Nišu, 2. maja 1982. godine, gde je završila osnovnu školu i prirodno-matematički smer gimnazije Bora Stanković sa odličnim uspehom.

Osnovne akademske studije fizike upisala je školske 2001/2002. godine na Departmanu za fiziku (smer: primenjena fizika) Prirodno-matematičkog fakulteta u Nišu, gde je diplomirala 18. septembra 2009. godine sa prosečnom ocenom 9,17 i ocenom 10 na diplomskom ispitu.

Doktorske akademske studije fizike (oblast: *Fizika obnovljivih izvora energije*), na Departmanu za fiziku, na Prirodno-matematičkom fakultetu u Nišu, upisala je školske 2009/2010. godine. Na doktorskim studijama položila je sve ispite sa prosečnom ocenom 10,0.

U zvanje istraživač-saradnik na Prirodno-matematičkom fakultetu u Nišu izabrana je 10. jula 2013. godine i reizabrana 26.04.2017. godine.

Ugovor o stipendiranju i angažovanju na projektu Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije u 2010. godini, sa Ministarstvom prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, potpisala je 15. aprila 2010. godine.

Kao stipendista Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, Ivana S. Radonjić Mitić je u 2009-2010. godini bila angažovana na projektu IO 141030 Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Ugovor o radu i angažovanju na projektu Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije TR 33009 sa Prirodno-matematičkim fakultetom u Nišu I. S. Radonjić Mitić je potpisala 02. februara 2011. godine.

U toku 2011/2012, 2012/2013, 2013/2014. i 2016/2017. godine I. S. Radonjić Mitić je na Departmanu za fiziku Prirodno-matematičkog fakulteta u Nišu bila angažovana za izvođenje vežbi iz predmeta Fizika površina i tankih slojeva. U toku 2016/2017. i 2017/2018. godine bila je angažovana za izvođenje vežbi iz predmeta Fizika atmosfere.

U toku osnovnih studija I. S. Radonjić Mitić je učestvovala na Međunarodnom naučnom kursu RENEWABLE ENERGY SOURCES AND THE ENVIRONMENT,

MULTIDISCIPLINARY APPROACH, koji je u organizaciji Francuske Akademije Nauka, Instituta za nuklearne nauke „Vinča” i Univerziteta „Pjer i Marija Kiri” iz Pariza, održan u Vrnjačkoj Banji od 17-24. oktobra 2006. godine.

I. S. Radonjić Mitić je učestvovala na međunarodnoj konferenciji SAVREMENI MATERIJALI 2011, koja je u organizaciji Akademije nauka i umjetnosti Republike Srpske održana u Banjoj Luci.

U februaru 2011. godine I. S. Radonjić Mitić učestvovala je na festivalu „Nauk nije bauk“ u organizaciji gimnazije „Svetozar Marković“ iz Niša, sa ciljem promocije nauke i fizike.

U junu 2013. godine I. S. Radonjić Mitić je učestvovala na međunarodnom naučno-stručnom skupu pod nazivom INFLUENCE OF ENERGY EFFICIENCY OF SOLAR ENERGY ON ECONOMIC AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT FOR THE WESTERN BALKAN REGION koji je održan na Univerzitetu u Nišu u organizaciji Prirodno-matematičkog fakulteta u Nišu u okviru UNESCO projekta, koji je realizovan pod rukovodstvom akademika Dragoljuba Mirjanića.

I. S. Radonjić Mitić je do sada objavila 14 radova na SCI listi od kojih su tri rada objavljena u vrhunskom časopisu međunarodnog značaja kategorije M21a, jedan rad u vrhunskom časopisu međunarodnog značaja kategorije M21, tri rada u međunarodnom časopisu kategorije M23, tri rada u zbornicima radova sa međunarodnih konferencija kategorije M33, jedan rad u istaknutom tematskom zborniku vodećeg nacionalnog značaja kategorije M44 i tri rada u vodećim časopisima nacionalnog značaja kategorije M51.

U sledećoj tabeli je dat pregled objavljenih radova i koeficijent naučne kompetentnosti Ivane S. Radonjić Mitić.

Koeficijent naučne kompetentnosti Ivane S. Radonjić Mitić:

Kategorija	Broj publikacija	Broj poena
M21a (10 poena)	3	30
M21 (8 poena)	1	8
M23 (3 poena)	3	9
M33 (1 poen)	3	3
M44 (2 poena)	1	2
M51 (2 poena)	3	6
Ukupno	14	58

Prema kriterijumima Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Ivana S. Radonjić Mitić ima koeficijent naučne kompetentnosti od 58 poena.

Prema podacima iz Univerzitetske biblioteke u Beogradu, radovi Ivane S. Radonjić Mitić su do 04.12.2017. godine na Web of Science-u citirani 81 put.

Ivana S. Radonjić Mitić je učestvovala u realizaciji jednog naučno-istraživačkog projekta koji je finansiralo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (IO 141030) i jednog naučno-istraživačkog projekta koji je finansiralo Ministarstvo nauke i tehnologije Republike Srpske. Ivana S. Radonjić Mitić sada učestvuje u realizaciji naučno-istraživačkog projekta (TR 33009) koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Изјава 1.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом

**ИСПИТИВАЊЕ ЕНЕРГЕТСКЕ ЕФИКАСНОСТИ СОЛАРНИХ МОДУЛА У
ЗАВИСНОСТИ ОД ЊИХОВЕ ЗАПРЈАНОСТИ У РЕАЛНИМ КЛИМАТСКИМ
УСЛОВИМА У НИШУ**

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао/ла на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио/ла ауторска права, нити злоупотребио/ла интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, 12.03.2018.

Потпис аутора дисертације:

ИРМитић

Ивана С. Радоњић Митић

Изјава 2.

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ЕЛЕКТРОНСКОГ И ШТАМПАНОГ ОБЛИКА
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Наслов дисертације: **ИСПИТИВАЊЕ ЕНЕРГЕТСКЕ ЕФИКАСНОСТИ СОЛАРНИХ
МОДУЛА У ЗАВИСНОСТИ ОД ЊИХОВЕ ЗАПРЉАНОСТИ У РЕАЛНИМ
КЛИМАТСКИМ УСЛОВИМА У НИШУ**

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам предао/ла за уношење у **Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу**, истоветан штампаном облику.

У Нишу, 12.03.2018.

Потпис аутора дисертације:



Ивана С. Радоњић Митић

Изјава 3:

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом: **ИСПИТИВАЊЕ ЕНЕРГЕТСКЕ ЕФИКАСНОСТИ СОЛАРНИХ МОДУЛА У ЗАВИСНОСТИ ОД ЊИХОВЕ ЗАПРЉАНОСТИ У РЕАЛНИМ КЛИМАТСКИМ УСЛОВИМА У НИШУ**

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прераде (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)¹

У Нишу, 12.03.2018.

Потпис аутора дисертације:

ИРМ Митић
Ивана С. Радоњић Митић

¹ Аутор дисертације обавезан је да изабере и означи (заокружи) само једну од шест понуђених лиценци; опис лиценци дат је у наставку текста.

ТИПОВИ ЛИЦЕНЦИ КРЕАТИВНЕ ЗАЈЕДНИЦЕ*

1. Ауторство (CC BY)

Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора, на начин одређен од аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора, на начин одређен од аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)

Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора, на начин одређен од аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. Уодносу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора, на начин одређен од аутора или даваоца лиценце, и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада

5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)

Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора, на начин одређен од аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора, на начин одређен од аутора или даваоца лиценце, и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.

* Више о лиценцама Креативне заједнице на адреси:

http://creativecommons.org.rs/?page_id=74CC. Овај текст НИЈЕ саставни део изјава аутора!