



VISOKA ŠKOLA
ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA
STRUKOVNIH STUDIJA

ALEKSANDRA GRUJIĆ
MILAN JOVIĆ

PRIRUČNIK

OBNOVNLJIVI IZVORI ENERGIJE



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union

This project has been funded with support from the European Commission. This publication reflects the views only of the author, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.



WAMPPP
561821-EPP-I-2015
EPPK2-CBHE-3P

ISBN 978-86-7982-266-6



9 788679 822666

Aleksandra Grujić

Milan Jović

OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE
PRIRUČNIK

Beograd, 2017.

OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE

PRIRUČNIK

Autori: Dr Aleksandra Grujić (1975)
Mast. inž. elektr. i računar. Milan Jović (1986)

Recezeni: Dr Saša Stojković
Dr Ivana Vlajić Naumovska

Izdavač: Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija
Vojvode Stepe 283, Beograd

Za izdavača: prof. dr Vera Petrović, direktor

This project has been funded with support from the European Commission. This publication reflects the views only of the author, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.

1. izdanje
Tiraž: 200
Štamparija: Razvojno – istraživački centar grafičkog inženjerstva TMF, Beograd
Format: A4
ISBN: 978 - 86 - 7982 - 266 - 6

CIP - Каталогизација у публикацији - Народна библиотека Србије, Београд

620.92(075.8)(076)
621.311.24(075.8)(076)

ГРУЈИЋ, Александра, 1975-

Obnovljivi izvori energije : priručnik / Aleksandra Grujić, Milan Jović. - 1. izd. - Beograd : Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija, 2017 (Beograd : Razvojno-istraživački centar grafičkog inženjerstva TMF). - 111 str. : ilustr. ; 29 cm

Tiraž 200. - Bibliografija: str. 111.

ISBN 978-86-7982-266-6

1. Јовић, Милан, 1986- [аутор]
а) Обновљиви извори енергије - Вежбе
COBISS.SR-ID 250928908

SADRŽAJ

PREDGOVOR

EVIDENCIJA VEŽBI

Vežba 1

ODREĐIVANJE DIREKTNE, DIFUZONE I REFLEKTOVANE KOMPONENTE IRADIJACIJE NA POVRŠINI SOLARNOG PANELA	1
---	----------

Vežba 2

ODREĐIVANJE KOMPONENTI IRADIJACIJE NA POVRŠINI SOLARNOG PANELA BEZ PRAĆENJA, PRI JEDNOOSNOM I DVOOSNOM PRAĆENJU	15
--	-----------

Vežba 3

UTICAJ TEMPERATURE I IRADIJACIJE NA I-U KARAKTERISTIKU FOTONAPONSKE ĆELIJE	27
---	-----------

Vežba 4

ISPITIVANJE FOTONAPONSKOG PANELA U LABORATORIJSKIM USLOVIMA.....	39
---	-----------

Vežba 5

ENERGIJA VETRA - TRENAŽER ČISTE ENERGIJE.....	49
--	-----------

Vežba 6

ISPITIVANJE VETROGENERATORA U LABORATORIJSKIM USLOVIMA	65
---	-----------

Vežba 7

STRUJNA I KARAKTERISTIKA SNAGE VETROGENERATORA TPW 200W	73
--	-----------

Vežba 8

UPOTREBA SOFTVERSKOG ALATA SAM (SYSTEM ADVISOR MODEL) U PROJEKTOVANJU VETROELEKTRANA.....	81
--	-----------

Vežba 9

TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA MALE FOTONAPONSKE ELEKTRANE UPOTREBOM SOFTVERSKOG ALATA SAM (SYSTEM ADVISOR MODEL)	99
---	-----------

LITERATURA	111
-------------------------	------------

PREDGOVOR

Priručnik za obnovljive izvore energije predstavlja prvo izdanje priručnika namenjenog prvenstveno studentima treće godine studija Visoke škole elektrotehnike i računarstva strukovnih studija u Beogradu. Korišćenjem ovog priručnika studenti stiču praktična znanja u projektovanju i analizi fotonaponskih i vetro elektrana.

Vežbe prate dinamiku predavanja iz predmeta Obnovljivi izvori energije. Svaka vežba sadrži teorijsku osnovu neophodnu za realizaciju vežbe.

Priručnik za obnovljive izvore energije osim osnovnog, obezbeđuje i viši nivo znanja iz oblasti koja se bavi fotonaponskom i vetro energijom.

Unapred se zahvaljujemo na korisnim primedbama i sugestijama čitalaca.

Autori

EVIDENCIJA VEŽBI

Student	
Ime i prezime:	Broj indeksa:

Vežba	Datum	Potpis
1. vežba		
2. vežba		
3. vežba		
4. vežba		
5. vežba		
6. vežba		
7. vežba		
8. vežba		
9. vežba		

Vežba 1

ODREĐIVANJE DIREKTNE, DIFUZIONI I REFLEKTOVANE KOMPONENTE IRADIJACIJE NA POVRŠINI SOLARNOG PANELA

- ☐ **Direktna komponenta solarnog zračenja**
- ☐ **Ekstraterestrički fluks**
- ☐ **Koeficijent atenuacije**
- ☐ **Direktna komponenta zračenja na površini solarnog panela**
- ☐ **Difuziona komponenta zračenja na površini solarnog panela**
- ☐ **Reflektovana komponenta zračenja na površini solarnog panela**

Datum: _____

Pregledao: _____

Predmet vežbe

Cilj prve vežbe je da se studenti upoznaju sa pojmom i intenzitetom direktnog Sunčevog zračenja, kao i pojedinačnim komponentama Sunčevog zračenja koje dospevaju na površinu solarnog panela. Proizvodnja električne energije iz fotonaponskih sistema zavisna je od količine Sunčevog zračenja koje dospe do površine panela. Svaka od pojedinačnih komponenti doprinosi proizvodnji električne energije, s tim što im je međusoban doprinos različit. Studenti se upoznaju koja je od komponenti najznačajnija, a koja, pri određenim uslovima, može povećati svoj značaj i udeo u proizvodnji električne energije.

1. Direktna komponenta solarnog zračenja, „očigledni” ekstraterestrički fluks i koeficijent atenuacije

Atenuacija (slabljenje) dolazećeg zračenja je funkcija rastojanja koje direktan Sunčev zrak treba da pređe kroz atmosferu, koje se lako računa, i faktora kao što su prašina, atmosferska vodena para, oblaci i zamagljenost, koje nije tako lako računati. Opšte prihvaćeni model koji tretira slabljenje Sunčevih zraka je model prema kome se svetlosni snop koji dospe do Zemljine površine predstavlja eksponencijalno opadajućom funkcijom (Bouquer – Lambert – ov zakon) :

$$I_B = A \cdot e^{-k \cdot m}, \quad (1)$$

gde je I_B snaga direktne komponente solarnog zračenja koja u jedinici vremena pada normalno na kvadratni metar površine Zemlje, A je „očigledni” ekstraterestrički fluks (fluks ekstraterestričkog zračenja koji uđe u atmosferu), k je bezdimenzioni koeficijent atenuacije (slabljenja) Sunčevog zračenja u Zemljinoj atmosferi. Faktor m naziva se *količnik vazdušne mase* ili samo *vazдушna masa* i definiše se kao količnik rastojanja koje pređu Sunčevi zraci od ulaska u atmosferu do posmatranog mesta na Zemljinoj površini, kada se Sunce nalazi u proizvoljnom položaju, i rastojanja koje Sunčevi zraci pređu kada se Sunce nalazi tačno iznad posmatranog mesta. Na osnovu predhodnog, može se izvesti, da količnik vazdušne mase predstavlja recipročnu vrednost sinusa altitudnog ugla Sunca, β . Altitudni ugao Sunca koji se još naziva i ugao visine Sunca, predstavlja ugao između prave koja spaja Sunce i posmatranu tačku na Zemlji i lokalne horizontale u posmatranoj tački.

Vrednosti za A i k se najčešće zadaju tablično, ali je za računske svrhe pogodnije imati jednačine nego tabele sa vrednostima. Vrednosti za koeficijent slabljena k i „očigledni” ekstrasolarni fluks A se dobijaju upotrebom sledećih aproksimativnih jednačina:

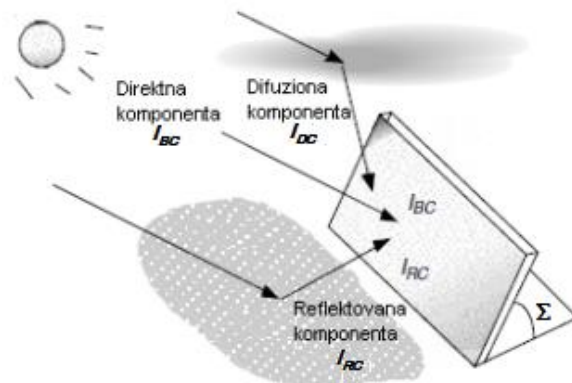
$$A = 1160 + 75 \cdot \sin\left(\frac{360}{365} \cdot (n - 275)\right), \quad (2)$$

$$k = 0,174 + 0,035 \cdot \sin\left(\frac{360}{365} \cdot (n - 100)\right), \quad (3)$$

gde je n redni broj posmatranog dana u godini.

2. Direktna, difuziona i reflektovana komponenta solarnog zračenja na površini solarnog panela

Solarni fluks koji dolazi do solarnog panela je kombinacija direktne komponentne zračenja koja pravolinijski kroz atmosferu dolazi do „prijemnika”, difuzione komponentne zračenja koja se rasipa o molekule i aerosole u atmosferi i reflektovanog zračenja koje se odbija o zemlju ili neku drugu površinu ispred panela, kao što je prikazano na slici 1. Poželjne fizičke veličine za primenu u solarnoj energetici su Vati ili kilovati po kvadratnom metru.



Slika 1: Direktna, difuziona i reflektovana komponenta sunčevog zračenja na površini solarnog panela (kolektora)

2.1 Direktna komponenta zračenja na površini solarnog panela I_{BC}

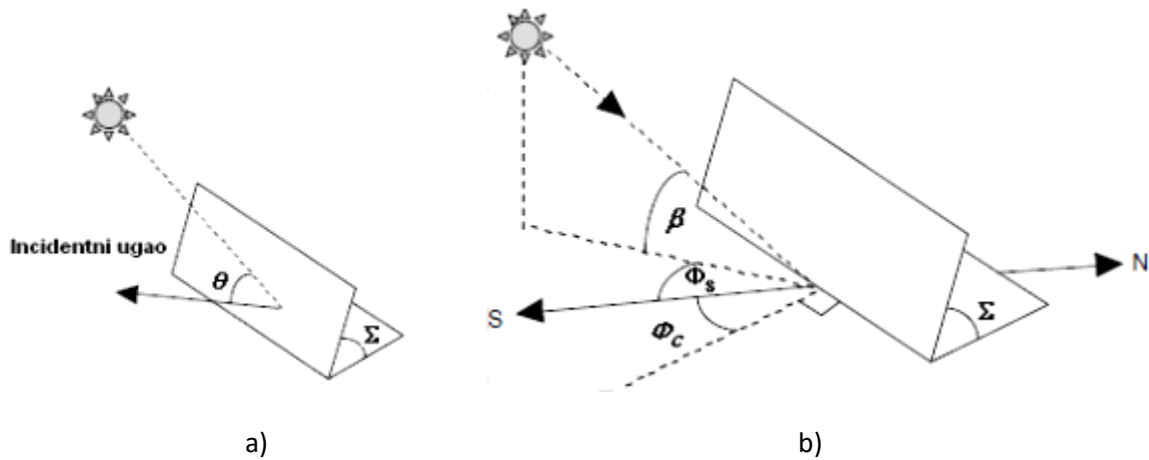
Prelaz sa direktne komponente zračenja I_B na direktnu komponentu zračenja na površini solarnog panela I_{BC} se svodi na množenje koeficijentom koji zavisi od incidentnog (upadnog)

ugla θ (θ je ugao između linije povučene normalno na ravan kolektora i upadnih zraka), kao što je prikazano na slici 2a), a izraženo sledećom jednačinom:

$$I_{BC} = I_B \cdot \cos \theta, \quad (4)$$

dok je direktno zračenje na horizontalnoj površini, I_{BH} , predstavljeno sledećom relacijom:

$$I_{BH} = I_B \cos(90^\circ - \beta) = I_B \sin \beta \quad (5)$$



Slika 2: a) incidentni ugao θ , b) altitudni ugao Sunca β , azimutni ugao Sunca ϕ_s i azimutni ugao panela ϕ_c , nagibni ugao panela Σ

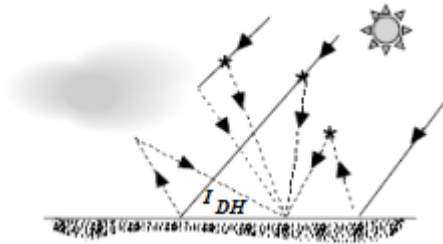
Incidentni ugao θ zavisi od orijentacije panela i altitudnog i azimutnog ugla Sunca u svakom pojedinačnom trenutku. Na slici 2 su prikazani ovi važni uglovi. Solarni panel (kolektor) je nagnut pod uglom Σ i okrenut u pravcu koji je opisan njegovim azimutnim uglom ϕ_c , koji se meri u odnosu na jug, sa pozitivnim vrednostima u pravcu jugoistoka i negativnim vrednostima u pravcu jugozapada. Incidentni ugao θ , je, prema tome, dat relacijom:

$$\cos \theta = \cos \beta \cdot \cos(\phi_s - \phi_c) \cdot \sin \Sigma + \sin \beta \cos \Sigma \quad (6)$$

2.2 Difuziona komponenta zračenja na površini solarnog panela I_{DC}

Mnogo je teže precizno proceniti intenzitet difuzionog zračenja na površini solarnog panela od intenziteta direktnog zračenja. Uzmimo u obzir sve komponente koje čine difuziono zračenje, kao što je prikazano na slici 3. Dolazno zračenje se rasejava pri dodiru sa atmosferskim česticama i vlagom, i može biti reflektovano od oblaka. Jedan deo ovog zračenja se reflektuje od

površine zemlje ka nebu, pa se ponovo rasejava i tako dolazi do zemlje. Najjednostavniji modeli difuzionog zračenja pretpostavljaju da ono dolazi do solarnog panela jednakim intenzitetom iz svih pravaca, to jest, nebo se posmatra kao da je *izotropski izvor* difuzionog zračenja.



Slika 3: Rasejavanje difuzionog zračenja o atmosferske čestice i vlagu

Obzirom na slučajnu prirodu procesa, može se smatrati da difuziona komponenta solarnog zračenja ima isti intenzitet iz svih pravaca, pa bi se maksimum difuzione komponente zračenja imao kada bi panel bio postavljen u horizontalnoj ravni. Prema modelu koji su razvili Threlkeld i Jordan, maksimalna difuziona komponenta iradijacije I_{DH} je proporcionalna direktnoj komponenti zračenja, bez obzira na poziciju Sunca na nebu u tom trenutku:

$$I_{DH} = C \cdot I_B, \quad (7)$$

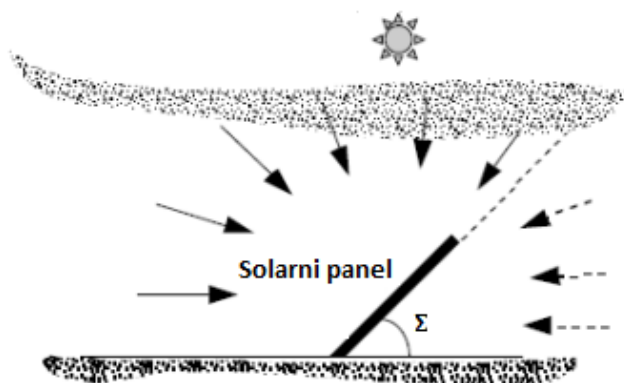
gde je C prostorni difuzioni faktor, koji se izračunava prema sledećoj aproksimativnoj formuli:

$$C = 0,095 + 0,04 \cdot \sin\left(\frac{360}{365} \cdot (n - 100)\right), \quad (8)$$

gde je n redni broj posmatranog dana u godini.

Potrebno je izračunati koji deo ukupne horizontalne difuzione iradijacije dolazi do solarnog panela, da bi se ta vrednost dodala direktnoj komponenti na površini solarnog panela, I_{DC} . Na slici 4 prikazan je deo difuzionog zračenja koje dolazi do površine solarnog panela. Pretpostavlja se da difuziono zračenje dolazi jednakim intenzitetom iz svih pravaca. Kada se usvoji navedena pretpostavka, naredni aproksimativni izraz se koristi da bi se odredila difuziona komponenta zračenja na površini solarnog panela (kolektora):

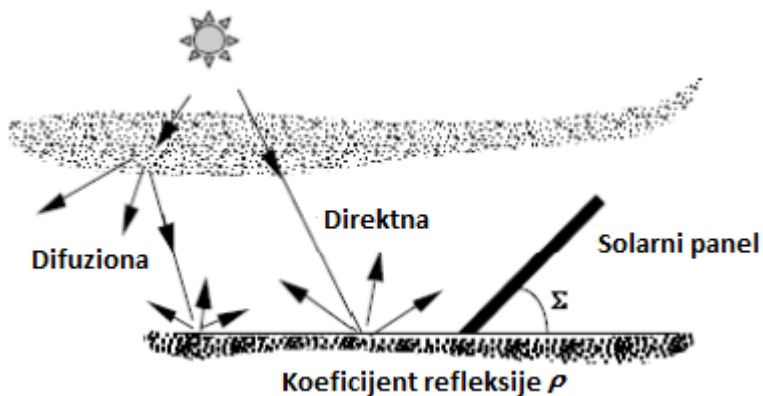
$$I_{DC} = I_{DH} \cdot \left(\frac{1 + \cos \Sigma}{2}\right) = C \cdot I_B \cdot \left(\frac{1 + \cos \Sigma}{2}\right). \quad (9)$$



Slika 4: Difuziono zračenje srazemerno delu neba koje „vidi” solarni panel

2.3 Reflektovana komponenta zračenja na površini solarnog panela I_{RC}

Treća komponenta zračenja koja dolazi do solarnog panela je posledica zračenja koje se reflektuje od podloge ispred samog solarnog panela. Refleksija može da obezbedi značajno poboljšanje performansi, na primer po vedrom danu kada su voda ili sneg ispred panela, ili poboljšanje performansi može biti skromno pa ja možemo zanemariti. Najjednostavniji model pretpostavlja veliku horizontalnu površinu ispred panela (kolektora), sa koeficijentom refleksije ρ , koja reflektuje zračenje jednakim intenzitetom u svim pravcima, kao što je prikazano na slici 5.



Slika 5: Tlo reflektuje zračenje istim intenzitetom u svim pravcima

Procena koeficijenta refleksije varira od 0,8 za sneg do 0,1 za bitumenski krov, dok se za uobičajenu vrednost koeficijenta refleksije uzima 0,2. Reflektovana komponenta zračenja se modeluje kao proizvod ukupne horizontalne iradijacije (direktna I_{BH} plus horizontalna I_{DH}) i koeficijenta refleksije ρ . Deo energije reflektovane od zemlje koja će biti „sakupljena” panelom,

zavisi od nagiba panela Σ , na osnovu čega se dobija izraz za reflektovanu komponentu solarnog zračenja na površini solarnog panela:

$$I_{RC} = \rho \cdot (I_{BH} + I_{DH}) \cdot \left(\frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right) = \rho \cdot I_B \cdot (\sin \beta + C) \cdot \left(\frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right). \quad (10)$$

ZADACI

Programski alat 1

U okviru Excel-a razvijena je aplikacija *Solarni kalkulator* za analizu jačine Sunčevog zračenja na površini solarnog panela u različitim mestima na severnoj hemisferi u zavisnosti od doba dana i godine, nagibnog i azimutnog ugla solarnog panela. Aplikacija je prikazana na slici 6.

- Korisnik treba da biranjem polja sa desne strane unese dan, mesec, godinu i grad za koji želi da izračuna snagu zračenja na površini solarnog panela,
- Zatim se unose sledeći podaci, respektivno: azimutni ugao solarnog panela Φ_C , nagibni ugao solarnog panela Σ i solarno vreme na osnovu koga se izračunava satni ugao H (satni ugao predstavlja broj stepeni za koji Zemlja mora da se zarotira pre nego što se Sunce nađe direktno iznad lokalne geografske dužine),
- U donjem delu ekrana, u polju D20, automatski se izračunava ukupna snaga solarnog zračenja (zanemarena je reflektovana komponenta) po jedinici površine solarnog panela, u $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$.

D20 fx =(D19+D17)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Kalkulator intenziteta zračenja za vedar dan								
2									
3	Redni broj dana u godini (n)			305					
4	Geografska širina (L)			63,32					
5	Azimutni ugao solarnog panela (ϕ_c)			30					
6	Nagibni ugao solarnog panela (Σ)			45					
7	Solano vreme (SV)			12					
8	Satni ugao (H)			0					
9	Solarna deklinacija (δ)			-15,3634					
10	Altitudni ugao Sunca (β)			11,31659					
11	Azimutni ugao Sunca (ϕ_s)			0					
12	Vazдушna masa (m)			5,09606					
13	Očigledni ekstraterestrički fluks (A)			1197,033					
14	Koeficijent atenuacije (k)			0,16078					
15	Intenzitet zračenja na površini zemlje (I_B)			527,5564					
16	$\cos\theta$ (upadni ugao sunč. zraka)			0,739222					
17	Dir. komp. zrač. na površini panela (I_{BC})			389,9814					
18	Difuzioni faktor (C)			0,079892					
19	Dif. komp. zrač. na površini panela (I_{DC})			35,97503					
20	Zračenje na površini panela ($I_C=I_{BC}+I_{DC}$)			425,9564					
21									

Dan	Mesec	Godina
1	<div> <div>Oktobar</div> <div>Novembar</div> <div>Decembar</div> </div>	2012

Ova godina je prestupna !

Grad	
Beograd	<input type="radio"/>
Niš	<input type="radio"/>
Subotica	<input type="radio"/>
Budimpešta	<input type="radio"/>
Beč	<input type="radio"/>
Trondhajn	<input checked="" type="radio"/>
Atina	<input type="radio"/>

Slika 6: Izgled aplikacija za analizu jačine Sunčevog zračenja na površini solarnog panela

ZADATAK 1

Za svaki od evropskih gradova na severnoj hemisferi prikazanih na slici 6, odrediti ukupnu snagu Sunčevog zračenja po jedinici površine solarnog panela okrenutog ka jugu (azimutni ugao solarnog panela, $\Phi_C = 0^\circ$), u solarno podne. Proračun izvršiti za nagibni ugao solarnog panela Σ od 30° , 45° i 60° , za 20. februar, 20. jun i 20. oktobar. Godinu odabrati proizvoljno. Rezultate upisati u tabelu 1.

Tabela 1: Jačina Sunčevog zračenja na površini solarnog modula

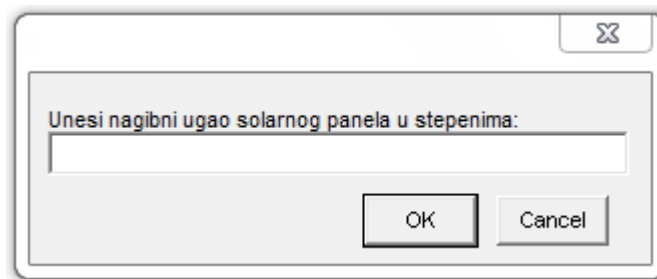
Grad	20. Februar			20. Jun			20. Oktobar		
	$\Sigma = 30^\circ$	$\Sigma = 45^\circ$	$\Sigma = 60^\circ$	$\Sigma = 30^\circ$	$\Sigma = 45^\circ$	$\Sigma = 60^\circ$	$\Sigma = 30^\circ$	$\Sigma = 45^\circ$	$\Sigma = 60^\circ$
Beograd									
Niš									
Subotica									
Budimpešta									
Beč									
Trondhajn									
Atina									

OCENA ZADATKA 1		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Programski alat 2

U Matlabu je napisan m fajl koji na osnovu poznate lokacije na površini Zemlje, azimutnog ugla solarnog panela Φ_C , nagibnog ugla solarnog panela Σ i podloge na kojoj se nalazi solarni panel izračunava i iscertava komponente solarnog zračenja na površini solarnog panela.

- Nakon pokretanja programa Matlab, korisnik u komandnom prozoru treba da upiše *Sunce1*, čime se poziva istoimeni m fajl ili alternativno iz editora navedenog fajla pokrene njegovo izvršavanje.
- Na ekranu se pojavljuje prozor za unos grada za koji se analizira Sunčevo zračenje. Korisnik može odabrati Beograd, Atinu i Trondhajn. Ovi gradovi su odabrani kao predstavnici različitih geografskih širina. Izgled jednog od ovakvih prozora prikazan je na slici 7.

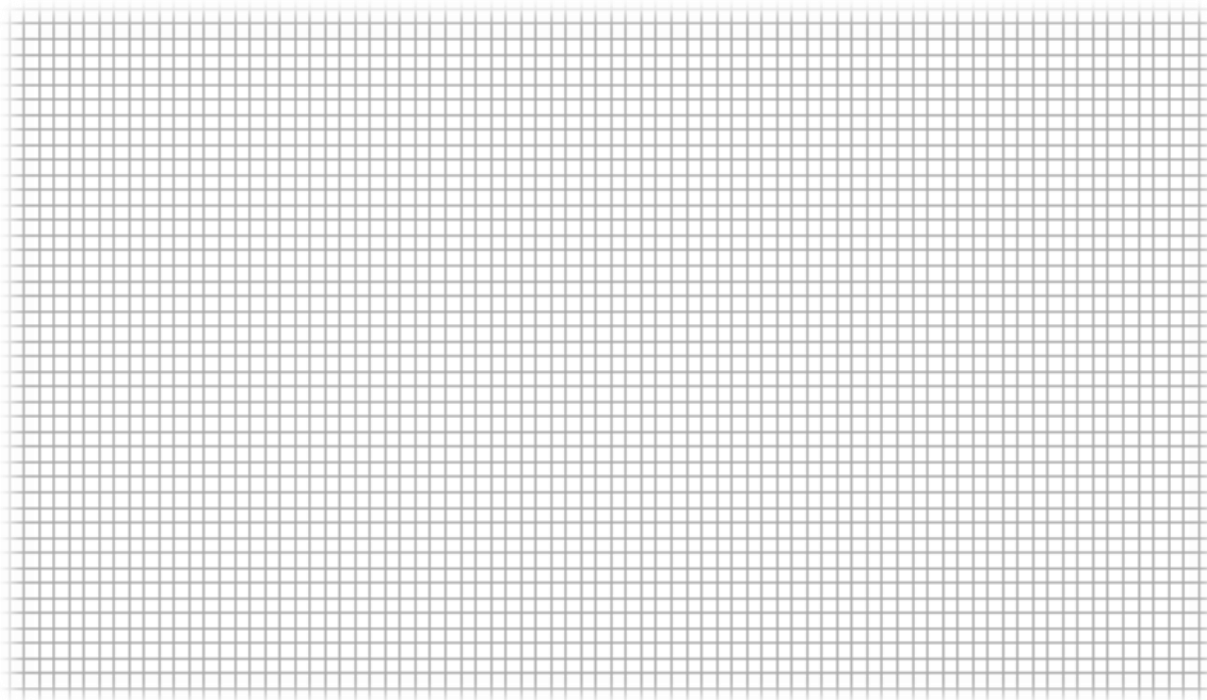


Slika 7: Izgled karakterističnog prozora za unos podataka

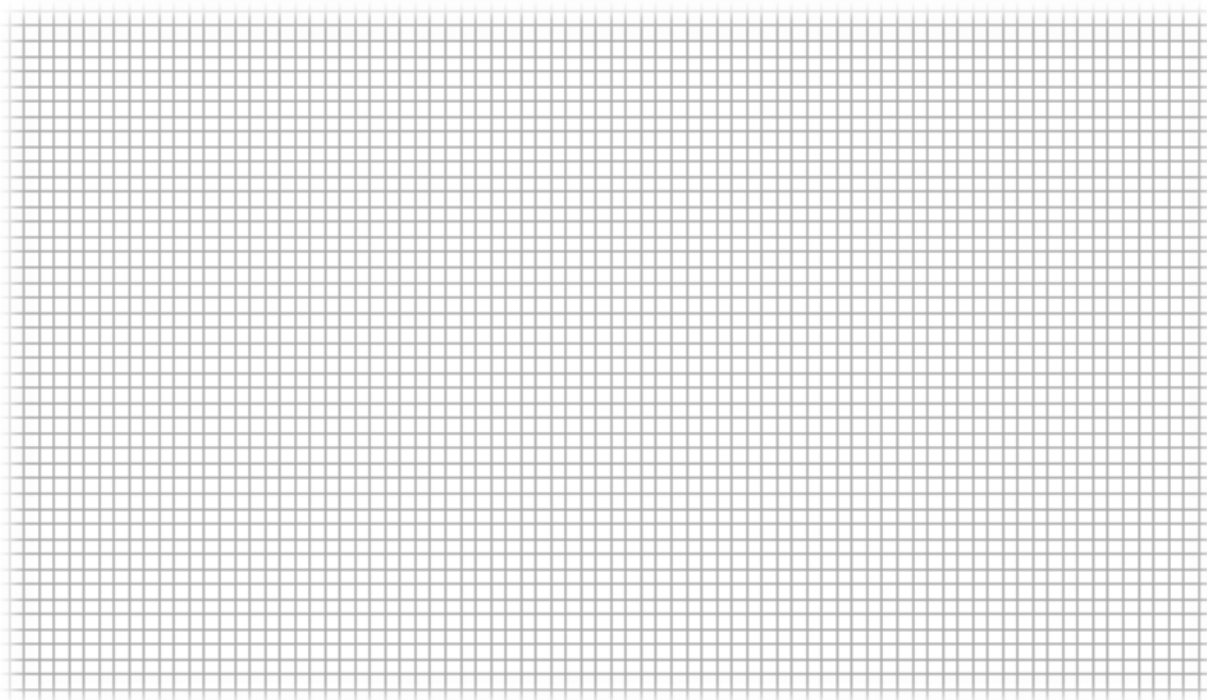
- Nakon toga, potrebno je uneti nagibni ugao solarnog panela u odnosu na horizontalnu površinu, Σ .
- U odgovarajući prozor potrebno je uneti azimutni ugao solarnog panela. Po konvenciji, jugoistočnoj orijentaciji solarnog modula odgovaraju pozitivni, a jugozapadnoj negativni uglovi.
- U odgovarajući prozor uneti podlogu na kojoj se nalazi solarni panel. Korisnik može odabrati sneg, pesak i travu.

ZADATAK 2

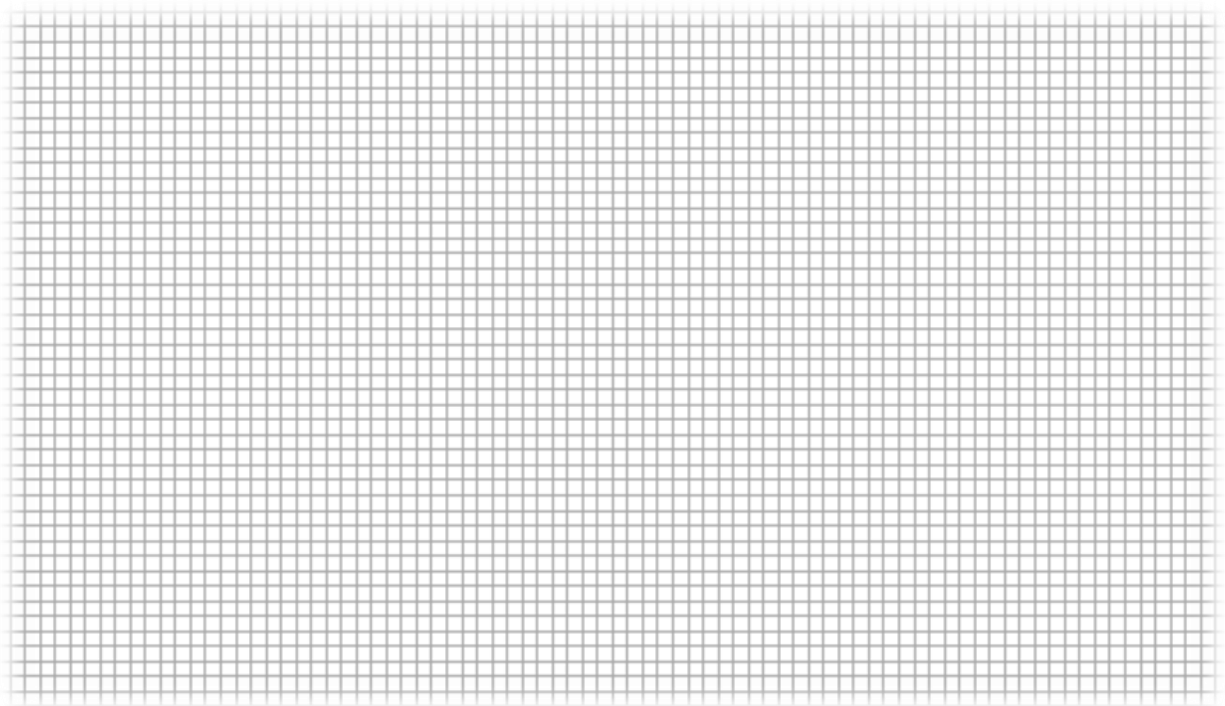
Za gradove Beograd, Atinu i Trondhajm odrediti ukupnu srednju dnevnu energiju zračenja na površini solarnog panela u $[\text{kWh/m}^2]$ za sve mesece u godini. Posebno izračunati direktnu, difuzionu i reflektovanu komponentu zračenja. Za svaki od gradova pretpostaviti da je solarni panel okrenut ka jugu (azimutni ugao modula, $\Phi_C = 0$), da je nagibni ugao panela jednak 40° ($\Sigma = 40^\circ$) i da se panel nalazi na travnatoj podlozi. Odgovarajuće rezultate predstaviti u obliku grafika zavisnosti energije Sunčevog zračenja od meseca u godini.



Grafik 1.: Srednja dnevna energija zračenja na površini solarnog panela u Beogradu



Grafik 2.: Srednja dnevna energija zračenja na površini solarnog panela u Atini



Grafik 3.: Srednja dnevna energija zračenja na površini solarnog panela u Trondhaju

OCENA ZADATKA 2		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

ZADATAK 3

Uz pomoć programskog alata 1 sračunati reflektovanu komponentu solarnog zračenja na površini panela ispred koga je travnata površina i rezultate upisati u tabelu 2.

Tabela 2: Reflektovana komponenta solarnog zračenja na površini panela u Subotici

Grad	20. Februar			20. Jun			20. Oktobar		
	$\Sigma = 30^\circ$	$\Sigma = 45^\circ$	$\Sigma = 60^\circ$	$\Sigma = 30^\circ$	$\Sigma = 45^\circ$	$\Sigma = 60^\circ$	$\Sigma = 30^\circ$	$\Sigma = 45^\circ$	$\Sigma = 60^\circ$
Subotica									

OCENA ZADATKA 3		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

ZADATAK 4

Odgovorite na sledeća pitanja:

1. Koja od komponenti solarnog zračenja je po intenzitetu najveća, a koja najmanja?

Odgovor :

2. Kog datuma i pri kom nagibnom uglu solarnog panela je u Beogradu bila najveća snaga solarnog zračenja na površini panela? Odgovor potražiti u tabeli 1.

Odgovor :

OCENA ZADATKA 4		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Vežba 2

ODREĐIVANJE KOMPONENTI IRADIJACIJE NA POVRŠINI SOLARNOG PANELA BEZ PRAĆENJA, PRI JEDNOOSNOM I DVOOSNOM PRAĆENJU

- ☐ **Jednoosno praćenje položaja Sunca**
- ☐ **Dvoosno praćenje položaja Sunca**

Datum: _____

Pregledao: _____

Predmet vežbe

U okviru druge vežbe studenti se upoznaju sa mogućnostima praćenja Sunčevog kretanja. Cilj je da se ugradnjom odgovarajućih uređaja, fotonaponski paneli u svakom trenutku postavе tako da Sunčevi zraci padaju normalno ili što normalnije na površinu panela, na taj način je prikupljena godišnja količina Sunčevog zračenja veća, a samim tim i proizvodnja električne energije iz fotonaponskih sistema.

1. Jednoosno i dvoosno praćenje položaja Sunca

U dosadašnjim razmatranjima, važila je pretpostavka da je solarni panel nagnut pod nekim uglom Σ u odnosu na horizontalnu podlogu i da se ne pomera ni u kom pravcu. Dodatno je rečeno da za postizanje dobrih godišnjih performansi solarnog panela, njega treba nagnuti u odnosu na horizontalnu podlogu pod uglom koji je jednak uglu severne geografske širine. Da bi se performanse fotonaponskog panela dodatno poboljšale, taj ugao zimi treba malo povećati, a leti malo smanjiti. U mnogim se okolnostima, međutim, ugradnja uređaja za praćenje kretanja Sunca pokazuje kao ekonomski isplativa, odnosno pokazuje se da porast proizvodnje električne energije može da ekonomski nadomesti investicije u automatiku. Uređaji za praćenje mogu biti *dvoosni*, što znači da prate i azimutni i altitudni ugao Sunca tako da Sunčevi zraci padaju uvek normalno na ravan solarnog panela, i *jednoosni*, što znači da prate samo altitudni ili samo azimutni ugao Sunca, s tim što se optimum pri jednoosnom praćenju postiže praćenjem azimutnog ugla Sunca.

Izračunavanje zbira direktne i difuzione iradijacije na površini panela kod *dvoosnog* sistema za praćenje je pravolinijsko, kao što se vidi na slici 1. Direktna komponenta zračenja na površini solarnog panela, I_{BC} , je jednaka celokupnom direktnom zračenju po jedinici površine Zemlje, I_B , jer Sunčevi zraci u svakom trenutku padaju normalno na solarni panel, i iznosi:

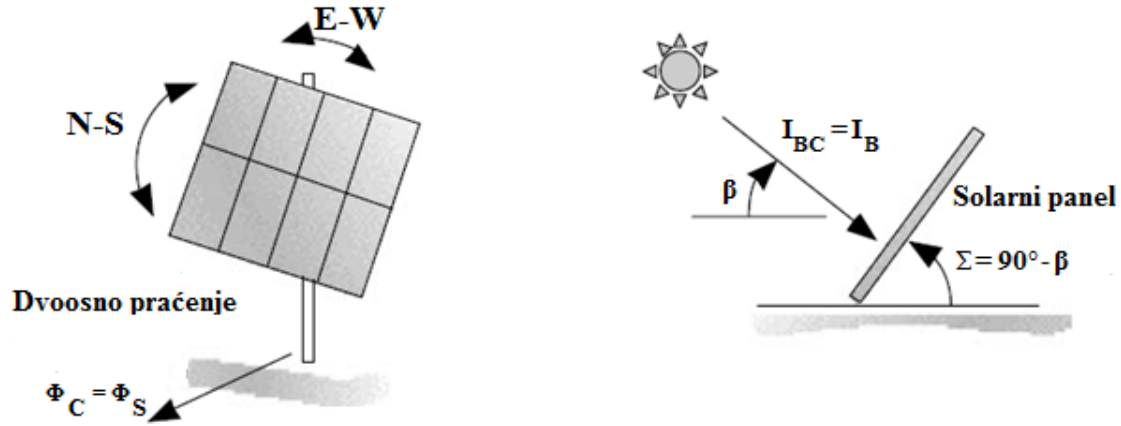
$$I_{BC} = I_B = A \cdot e^{-k \cdot m}, \quad (1)$$

gde je A "očigledni" ekstrasolarni fluks, k koeficijent atenuacije Sunčevih zraka, a m količnik vazdušne mase (optička vazдушna masa).

Difuziona i reflektovana komponenta zračenja se dobijaju korišćenjem poznatih i već korišćenih izraza (2) i (3), kada se za nagibni ugao panela u odnosu na horizontalnu podlogu Σ uvrsti komplement altitudnog ugla Sunca β , odnosno $\Sigma = 90^\circ - \beta$.

$$I_{DC} = I_{DH} \cdot \left(\frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right) = C \cdot I_B \cdot \left(\frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right), \quad (2)$$

$$I_{RC} = \rho \cdot I_B \cdot (\sin \beta + C) \cdot \left(\frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right). \quad (3)$$



Slika 1: Dvoosno praćenje položaja Sunca i odgovarajući solarni uglovi

U slučaju dvoosnog praćenja položaja Sunca, izrazi (1), (2) i (3) za direktnu, difuzionu i reflektovanu komponentu solarnog zračenja na površini panela glase:

$$I_{BC} = I_B = A \cdot e^{-k \cdot m}, \quad (4)$$

$$I_{DC} = C \cdot I_B \cdot \left(\frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right) = C \cdot I_B \cdot \left(\frac{1 + \cos(90 - \beta)}{2} \right), \quad (5)$$

$$I_{RC} = \rho \cdot (I_{BH} + I_{DH}) \cdot \left(\frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right) = \rho \cdot (I_{BH} + I_{DH}) \cdot \left(\frac{1 - \cos(90 - \beta)}{2} \right). \quad (6)$$

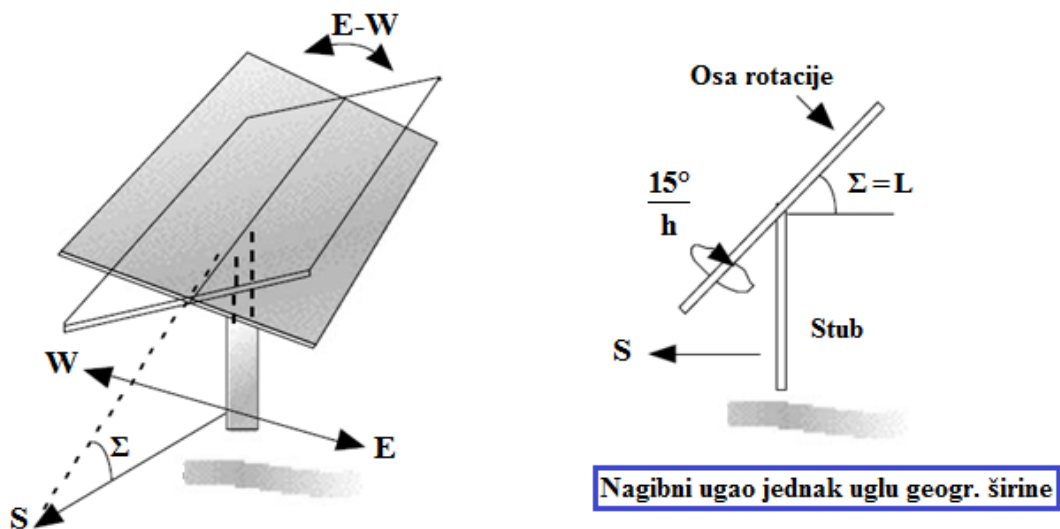
Jednoosno praćenje Sunca se za fotonaponske panele skoro uvek izvodi na postolju koje ima ručno podesivi nagibni ugao u odnosu horizontalnu podlogu u pravcu ose sever – jug i mehanizam za praćenje Sunca, koji zakreće modul od istoka ka zapadu, kao što je prikazano na slici 2. Drugim rečima, kod ove vrste jednoosnog praćenja, vrši se praćenje azimutnog ugla Sunca, pa je zbog toga u svakom trenutku $\Phi_S = \Phi_C$, odnosno azimutni uglovi Sunca i solarnog panela su uvek jednaki. Kada se nagibni ugao solarnog panela postavi da je jednak uglu lokalne geografske širine L , ne samo da je to optimalni ugao za godišnje performanse solarnog modula, već su geometrija panela i rezultujuće solarno zračenje lakši za procenu.

Kao što je prikazano na slici 3, ako solarni panel rotira brzinom rotacije Zemlje ($15^\circ/\text{h}$) onda se središnja linija panela uvek poklapa sa Suncem. Pod ovim uslovima, incidentni ugao θ između normale na solarni panel i Sunčevih zraka će biti jednak solarnoj deklinaciji δ . Solarna deklinacija predstavlja ugao između ravni ekvatora i linije koja spaja centre Zemlje i Sunca. To znači da će direktna komponenta zračenja na površini panela (kolektora) biti jednaka $I_{BC} = I_B \cdot \cos \delta$.

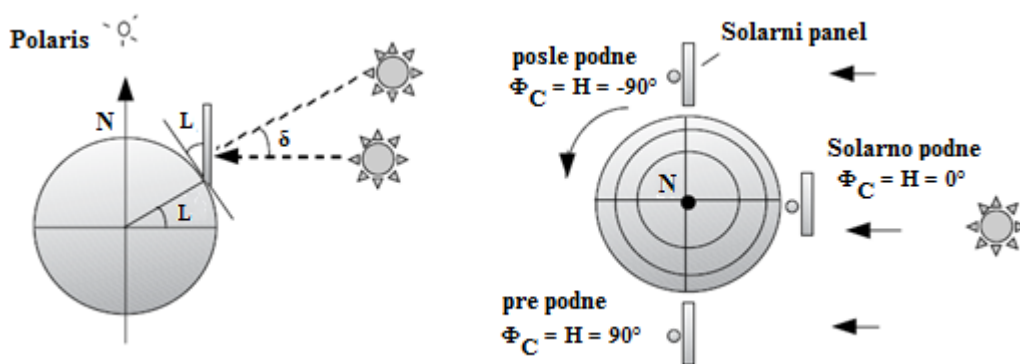
Da bi se procenila difuziona i reflektovana komponenta solarnog zračenja na površini „solarnog kolektora” potrebno je poznavati nagibni ugao „kolektora” u odnosu na horizontalnu podlogu Σ (termin „kolektor” se koristi iz razloga što fotonaponski panel kolektuje ili sakuplja Sunčeve zrake i ne treba ih mešati sa termičkim kolektorima). Kao što se vidi na slici 3, dok panel rotira, a nagibni ugao Σ je fiksiran na $\Sigma = L$, onda se u svakom trenutku ravan panela nalazi na nekom azimutnom uglu Φ_C , osim u solarno podne, kada je taj ugao nula. Drugim rečima, panel rotira oko ose sever – jug, u solarno podne je normala na površ panela usmerena ka jugu, dok se u prepodnevnom satima okreće ka istoku, a u poslepodnevnom ka zapadu. Kada solarni panel ima mogućnost jednoosnog praćenja, a nagibni ugao mu je jednak uglu geografske širine, $\Sigma = L$, za ovakav sistem se kaže da je *polarno montiran*. Jednoosnim praćenjem se postiže optimum samo sa aspekta praćenja azimutnog ugla. Spore promene solarne deklinacije nije moguće automatski pratiti, ali je nagibni ugao panela moguće ručno podešavati. Efektivni nagibni

ugao, Σ_{eff} , koji predstavlja ugao između normale na panel i horizontalne ravni je dat sledećim izrazom:

$$\Sigma_{eff} = 90^\circ - \beta + \delta. \quad (7)$$



Slika 2: Jednoosno praćenje u pravcu istok – zapad; solarni panel ima fiksni nagibni ugao koji je jednak uglu geografske širine



Slika 3: a) Panel sa jednoosnim praćenjem, nagnut pod uglom L, rotira brzinom od $15^\circ/h$,
b) pogled nadole na Severnom Polu.

U slučaju jednoosnog praćenja položaja Sunca (polarno montiran), izrazi za direktnu, difuzionu i reflektovanu komponentu solarnog zračenja na površini panela glase:

$$I_{BC} = I_B \cdot \cos \delta, \quad (8)$$

$$I_{DC} = C \cdot I_B \cdot \left(\frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right) = C \cdot I_B \cdot \left(\frac{1 + \cos(90 - \beta + \delta)}{2} \right), \quad (9)$$

$$I_{RC} = \rho \cdot (I_{BH} + I_{DH}) \cdot \left(\frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right) = \rho \cdot (I_{BH} + I_{DH}) \cdot \left(\frac{1 - \cos(90 - \beta + \delta)}{2} \right). \quad (10)$$

ZADACI

Programski alat 1

U okviru Excel-a razvijena je aplikacija *Solarni kalkulator* za analizu jačine Sunčevog zračenja na površini solarnog panela na različitim mestima na severnoj hemisferi u zavisnosti od doba dana i godine, nagibnog i azimutnog ugla solarnog panela. Takođe, postoji mogućnost izbora jednoosnog i dvoosnog praćenja položaja Sunca na horizontu. Aplikacija je prikazana na slici 4.

- Korisnik treba da biranjem polja u gornjem delu prozora unese dan, mesec, godinu i grad za koji želi da izračuna snagu zračenja na površini solarnog panela (kolektora),
- Zatim se unose sledeći podaci, respektivno: azimutni ugao solarnog panela Φ_C , nagibni ugao solarnog panela Σ i solarno vreme na osnovu koga se izračunava satni ugao H .
- Korisnik nakon toga odabira vrstu praćenja Sunca – jednoosno ili dvoosno praćenje. U slučaju da panel stoji pod fiksnim nagibnim uglom u odnosu na horizontalnu podlogu Σ i pod fiksnim azimutnim uglom Φ_C , treba odabrati polje *Bez praćenja*
- U donjem delu ekranu, u polju D20, automatski se izračunava ukupna snaga solarnog zračenja po jedinici površine solarnog panela, u $[\text{W/m}^2]$.

D20		fx		=(D19+D17)							
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Kalkulator intenziteta zračenja za vedar dan										
2											
3	Redni broj dana u godini (n)			172							
4	Geografska širina (L)			46							
5	Azimutni ugao solarnog panela (ϕ_C)			0							
6	Nagibni ugao solarnog panela (Σ)			22.550214							
7	Solano vreme (SV)			12							
8	Satni ugao (H)			0							
9	Solarna deklinacija (δ)			23.449783							
10	Altitudni ugao Sunca (β)			67.449786							
11	Azimutni ugao Sunca (ϕ_S)			0							
12	Vazдушna masa (m)			1.0827857							
13	Očigledni ekstrasolarni fluks (A)			1086.529							
14	Koeficijent atenuacije (k)			0.2070959							
15	Intenzitet zračenja na površini zemlje (I_B)			868.27025							
16	$\cos\theta$ (upadni ugao sunč. zraka)			1							
17	Dir. komp. zrač. na površini panela (I_{BC})			868.27025							
18	Difuzioni faktor (C)			0.1328239							
19	Dif. komp. zrač. na površini panela (I_{DC})			110.91827							
20	Zračenje na površini panela ($I_C=I_{BC}+I_{DC}$)			979.18852							
21											

Dan	Mesec	Godina
21	Jun Jul Avgust	2012

Ova godina je prestupna !

Grad		Azimutni ugao solarnog panela (ϕ_C)
Beograd	<input type="radio"/>	
Niš	<input type="radio"/>	
Subotica	<input checked="" type="radio"/>	
Budimpešta	<input type="radio"/>	
Beč	<input type="radio"/>	
Trondhajn	<input type="radio"/>	
Atina	<input type="radio"/>	

<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Bez	Jednoosno	Dvoosno
Praćenja	Praćenje	Praćenje

Slika 4: Izgled aplikacije za analizu jačine Sunčevog zračenja na površini solarnog panela

ZADATAK 1

Odrediti ukupnu snagu Sunčevog zračenja po jedinici površine solarnog panela okrenutog ka jugu (azimutni ugao solarnog panela, $\phi_C = 0$), u Beogradu u 8, 12 i 14 časova. Proračun izvršiti za nagibni ugao solarnog panela Σ od 30° , 45° i 60° , za 20. februar, 20. jun i 20. oktobar. Proračun izvršiti za slučaj da ne postoji praćenje Sunca, da postoji jednoosno i da postoji dvoosno praćenje Sunca. U slučaju da postoji dvoosno praćenje, nagibni ugao se automatski izračunava tako da upadni Sunčevi zraci padaju normalno na solarni panel, dok se u slučaju jednoosnog praćenja nagibni ugao panela automatski podešava na vrednost lokalne geografske širine. Godinu odabrati proizvoljno. Rezultate upisati u tabelu 1.

Tabela 1: Jačina Sunčevog zračenja na površini solarnog panela u Beogradu

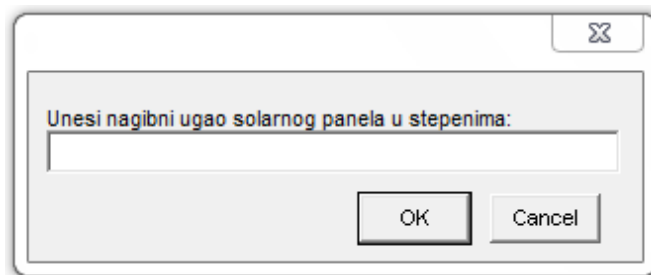
Datum		20. februar			20. jun			20. oktobar		
Sati		8h	12h	14h	8h	12h	14h	8h	12h	14h
Jednoosno praćenje										
Dvoosno praćenje										
Bez praćenja	$\Sigma=30^\circ$									
	$\Sigma=45^\circ$									
	$\Sigma=60^\circ$									

OCENA ZADATKA 1		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Programski alat 2

U Matlabu je napisan m fajl koji na osnovu poznate lokacije na površini Zemlje, azimutnog ugla solarnog panela Φ_C , nagibnog ugla solarnog panela Σ , podloge na kojoj se nalazi solarni panel i vrste praćenja položaja Sunca izračunava i iscrtava srednje dnevne jačine solarnog zračenja na površini solarnog panela na nivou meseca.

- Nakon pokretanja programa Matlab, korisnik u komandnom prozoru treba da upiše *Sunce2*, čime se poziva istoimeni m fajl ili alternativno iz editora navedenog fajla pokrene njegovo izvršavanje.
- Na ekranu se pojavljuje prozor za unos grada za koji se analizira Sunčevo zračenje. Korisnik može odabrati Beograd, Atinu i Trondhajm. Ovi gradovi su odabrani kao predstavnici različitih geografskih širina. Izgled jednog od ovakvih prozora prikazan je na slici 5.

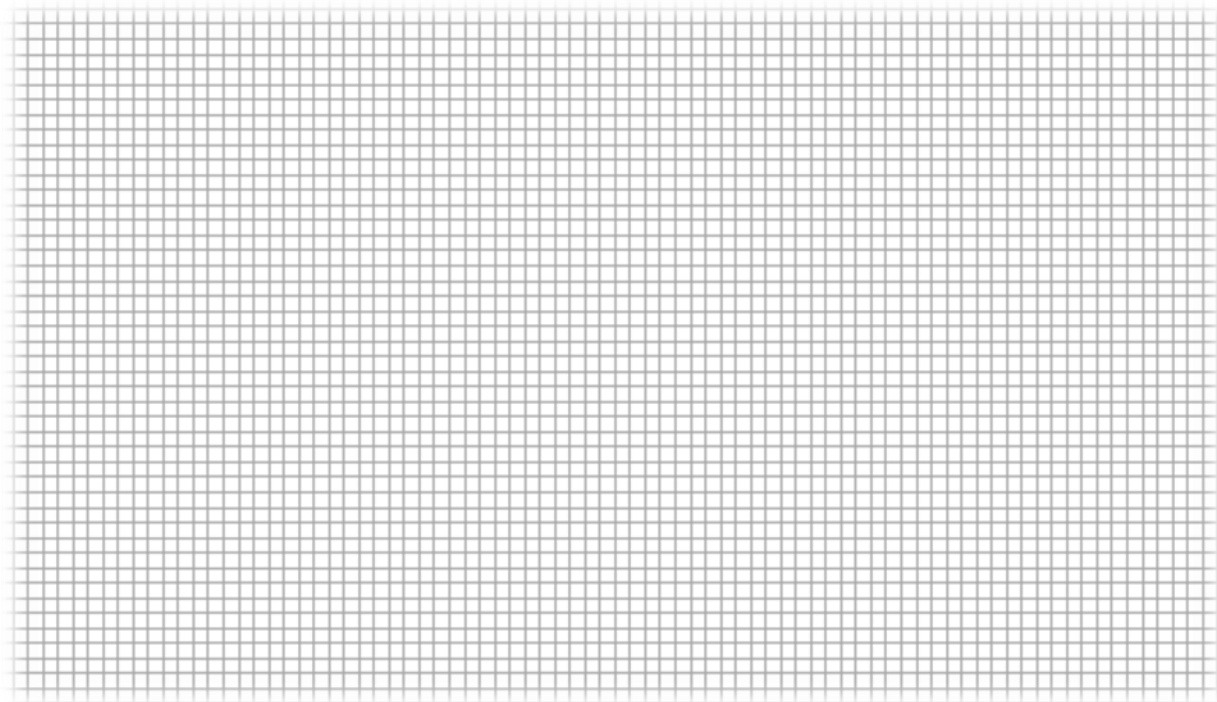


Slika 5: Izgled karakterističnog prozora za unos podataka

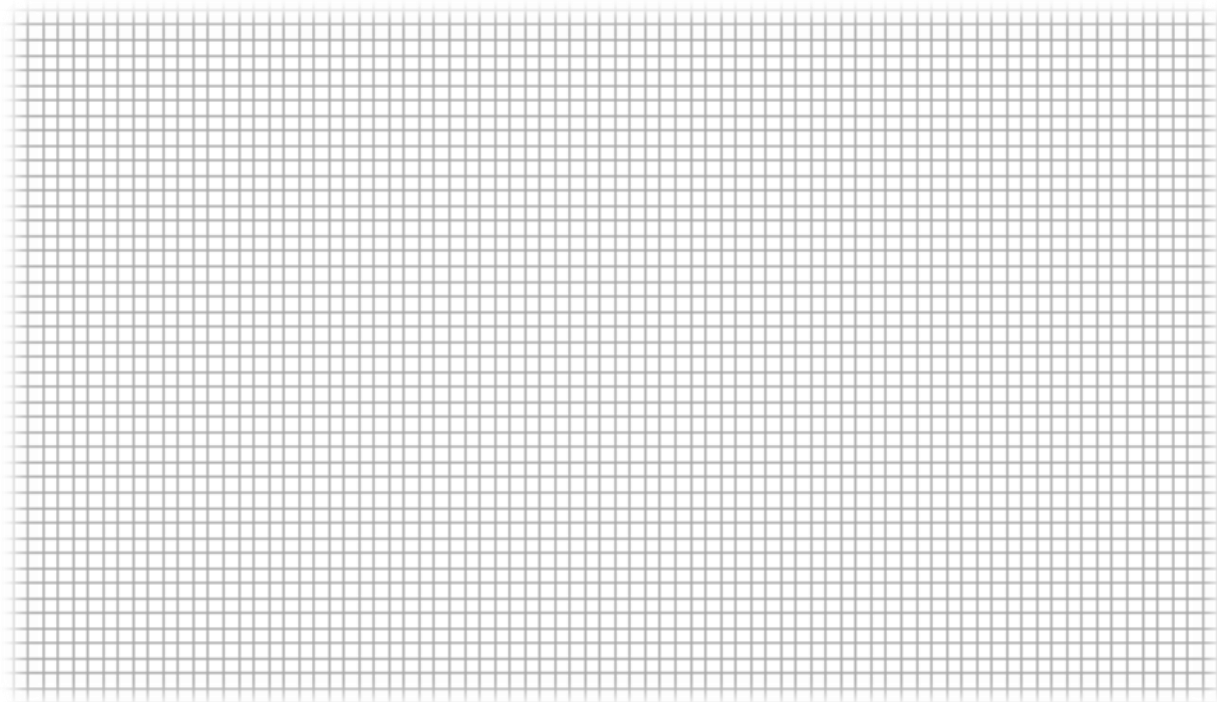
- Nakon toga, potrebno je uneti nagibni ugao solarnog panela u odnosu na horizontalnu površinu, Σ .
- U odgovarajući prozor potrebno je uneti azimutni ugao solarnog panela. Po konvenciji, jugoistočnoj orijentaciji solarnog panela odgovaraju pozitivni, a jugozapadnoj negativni uglovi.
- U odgovarajući prozor uneti podlogu na kojoj se nalazi solarni panel. Korisnik može odabrati sneg, pesak i travu.

ZADATAK 2

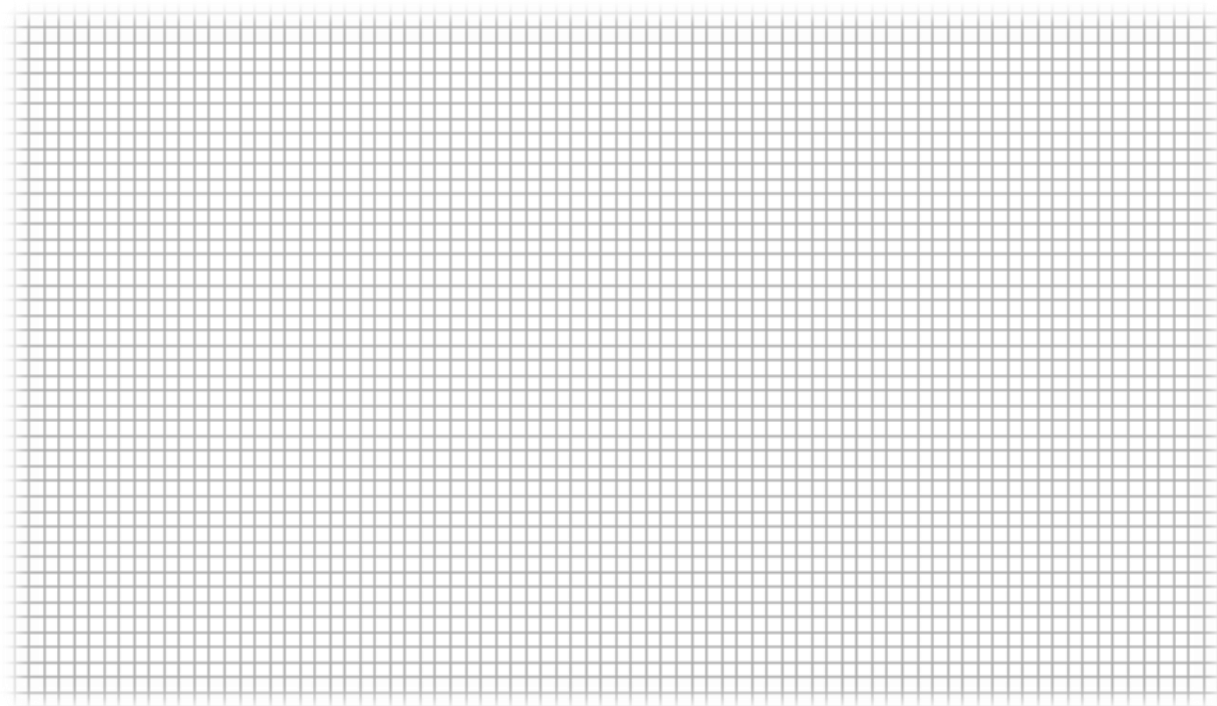
Za gradove Beograd, Atinu i Trondhajm odrediti srednje dnevne energije Sunčevog zračenja na površini solarnog panela u $[\text{kWh/m}^2]$ za sve mesece u godini. Prosečne dnevne energije Sunčevog zračenja na površini solarnog panela posebno izračunati za slučaj da ne postoji praćenje Sunca, a posebno za slučajeve jednoosnog i dvoosnog praćenja Sunca. Za svaki od gradova pretpostaviti da je solarni panel okrenut ka jugu (azimutni ugao panela, $\Phi_C = 0$), da je nagibni ugao panela jednak 40° ($\Sigma = 40^\circ$) i da se panel nalazi na travnatoj podlozi. Navedeni izbor uglova neće igrati nikakvu ulogu u izračunavanju za slučaj dvoosnog praćenja, dok će se u slučaju jednoosnog praćenja automatski birati nagibni ugao jednak uglu geografske širine. Odgovarajuće rezultate predstaviti u obliku grafika zavisnosti ukupne dnevne energije Sunčevog zračenja na površini solarnog panela od meseca u godini i ucrtati na odgovarajuće milimetarske papire.



Grafik 1.: Srednje dnevne energije zračenja na površini solarnog panela u Beogradu



Grafik 2.: Srednje dnevne energije zračenje na površini solarnog panela u Atini



Grafik 3.: Srednje dnevne energije zračenje na površini solarnog panela u Trondhajmu

OCENA ZADATKA 2		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

ZADATAK 3

Odgovorite na sledeća pitanja:

1. Čemu je jednak incidentni ugao Sunčevih zraka θ u slučaju jednoosnog, a čemu u slučaju dvoosnog praćenja Sunca?

Odgovor:

2. Navesti razlog zbog koga su vrednosti u tabeli 1 veće u slučaju da nema praćenja Sunca nego u slučaju jednoosnog praćenja Sunca.

Odgovor:

3. Kog datuma i u koliko sati se javlja maksimalna snaga Sunčevog zračenja na površini solarnog panela u Beogradu pri jednoosnom, a kada pri dvoosnom praćenju Sunca? Odgovor potražiti u tabeli 1.

Odgovor:

4. Kolika je maksimalna razlika u srednjoj dnevnoj energiji Sunčevog zračenja pri jednoosnom i dvoosnom praćenju Sunca? Odgovor potražiti na graficima iscrtanim na milimetarskom papiru u okviru zadatka 2.

Odgovor:

OCENA ZADATKA 3		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Vežba 3

UTICAJ TEMPERATURE I IRADIJACIJE NA I-U KARAKTERISTIKU FOTONAPONSKE ČELIJE

- ☐ **Standardni uslovi ispitivanja**
- ☐ **Praktični primeri**

Datum: _____

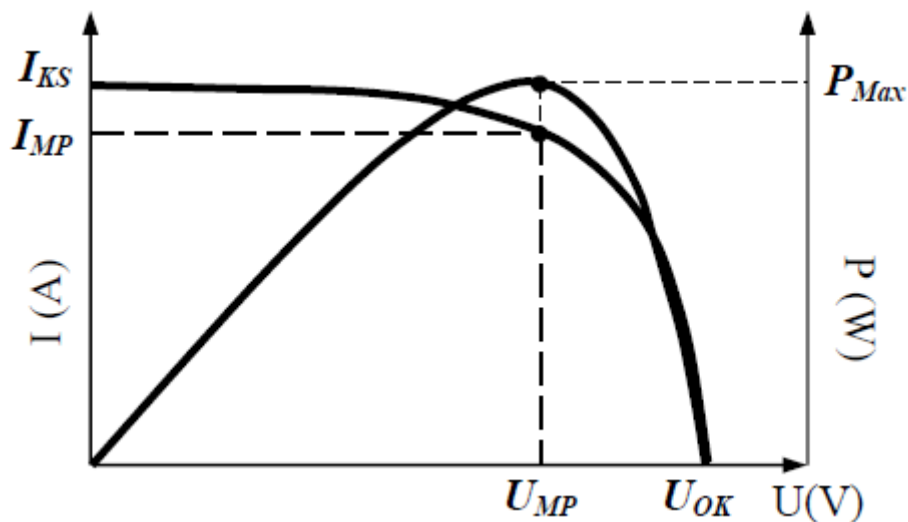
Pregledao: _____

Predmet vežbe

U okviru treće vežbe studenti se upoznaju sa značajem uticaja temperature i iradijacije na I-U karakteristiku solarne ćelije, koje veličine su dominantno pogođene ovim uticajima, šta su standardni uslovi ispitivanja kao i koje sve veličine proizvođači fotonaponskih panela daju na informacionoj pločici. Ove veličine su značajne pri dimenzionisanju fotonaponskog sistema, kako u pogledu električnih karakteristika, tako i u pogledu mehaničkih (dimenzionih) karakteristika.

1. Maksimalna snaga

U uslovima otvorenog ili kratko spojenog kola snaga se ne generiše. Maksimalna snaga, P_{Max} , koju proizvodi fotonaponski uređaj dostiže se u tački karakteristike u kojoj je proizvod struje i napona maksimalan. Ovo je grafički prikazano na slici 1.



Slika 1: I-U karakteristika solarne ćelije sa tačkom maksimalne snage

Fotonaponska ćelija predstavlja izvor ograničene struje i ograničenog napona, što se može uočiti i sa slike 1. Maksimalna struja koju proizvodi fotonaponska ćelija je struja kratkog spoja I_{KS} . Ona se generiše kada su priključci ćelije kratko spojeni, odnosno impedansa opterećenja jednaka nuli ($Z_{opt} = 0$), i kada napon opadne na nulu ($U = 0$). Maksimalni napon fotonaponske ćelije je napon praznog hoda (otvorenog kola) U_{OK} , a on se javlja kada su priključci otvoreni, odnosno kada je impedansa opterećenja beskonačno velika ($Z_{opt} = \infty$), a struja jednaka nuli ($I = 0$). Ova dva ekstremna slučaja impedanse opterećenja, i ceo opseg uslova koji mogu da se jave

između ova dva ekstrema, prikazuju se na grafiku koji se naziva strujno-naponska (I-U) karakteristika ili kriva solarnih uređaja.

Napon i struja koji odgovaraju maksimalnoj snazi P_{Max} nazivaju se maksimalni napon i maksimalna struja u tački maksimalne snage i označavaju se sa U_{MP} i I_{MP} respektivno. Maksimalna snaga P_{Max} jednaka je površini najvećeg pravougaonika koji može da se upiše ispod I-U krive.

2. Faktor popunjenosti

Važna karakteristika je faktor popunjenosti (FP) koji predstavlja meru kvaliteta p-n spoja i serijskog otpora solarne ćelije. Faktor popunjenosti FP pokazuje koliko I-U kriva odstupa od pravougaonog oblika. Solarna ćelija sa većim U_{OK} ima veći FP , jer zaobljeni deo I-U krive zauzima manji deo površine izvan pravougaonika $I_{KS} - U_{OK}$. Maksimalan teorijski FP solarne ćelije može se odrediti iz:

$$\frac{\partial P}{\partial U} = \frac{\partial}{\partial U} (U \cdot I) = 0, \quad (1)$$

odakle se dobijaju U_{MP} i I_{MP} , te je:

$$FP = \frac{U_{MP} \cdot I_{MP}}{U_{OK} \cdot I_{KS}}, \quad (2)$$

ili

$$P_{Max} = U_{MP} \cdot I_{MP} = FP \cdot U_{OK} \cdot I_{KS}. \quad (3)$$

Efikasnost η (stepen iskorišćenja) solarne ćelije definiše se kao odnos snage P_{Max} , koju proizvodi ćelija u tački maksimalne snage pri standardnim uslovima ispitivanja, i snage upadnog zračenja.

3. Standardni uslovi ispitivanja

Proizvođači fotonaponskih modula osnovne karakteristike svojih proizvoda predstavljaju pri standardnim uslovima ispitivanja (STC-Standard Test Conditions), koji se najčešće razlikuju od eksploatacionih. Standardni uslovi u kojima se testiraju fotonaponski paneli (STC), podrazumevaju sledeće:

- Panel je čist, na njemu nema nečistoća koje se javljaju u realnoj eksploataciji.
- Temperatura modula je 25°C.
- Solarna iradijacija na površini modula je 1000 W/m².
- Solarni spektar odgovara količniku vazdušne mase $m=1,5$.

U narednoj tabeli su prikazani osnovni tehnički podaci za nekoliko panela različitih proizvođača.

Tabela 1: Parametri solarnih panela pri standardnim uslovima ispitivanja (STC – Standard Test Conditions)

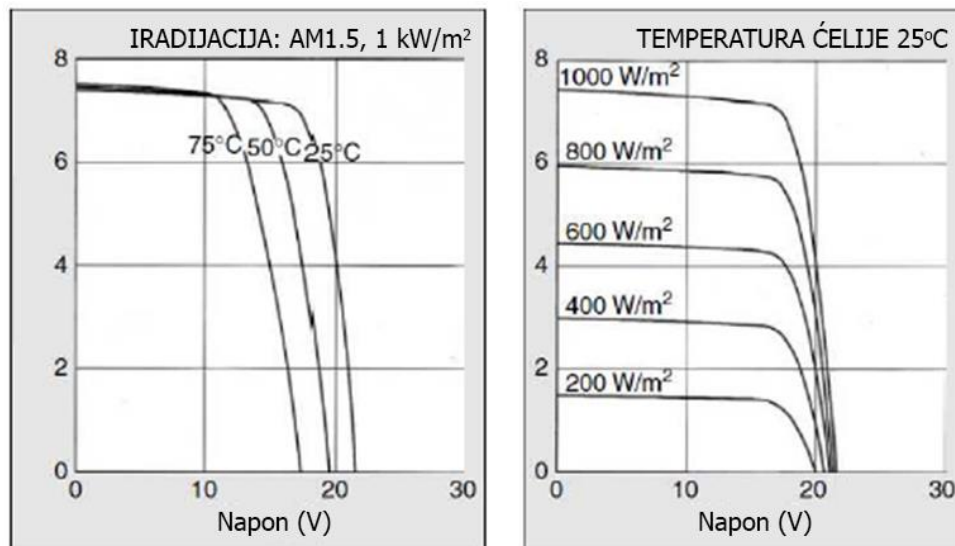
Proizvođač	Kyocera	Sharp	BP
Model	KC-120-1	NE-Q5E2U	2150S
Materijal	Multikristal	Polikristal	Monokristal
Broj ćelija	36	72	72
Nominalna snaga $P_{DC,STC}$ [W]	120	165	150
Napon pri maksimalnoj snazi [V]	16.9	34.6	34
Struja pri maksimalnoj snazi [A]	7.1	4.77	4.45
Napon otvorenog kola U_{OK} [V]	21.5	43.1	42.8
Struja kratkog spoja I_{KS} [A]	7.45	5.46	4.75
Dužina [mm/in.]	1425/56.1	1575/62.05	1587/62.5
Širina [mm/in.]	652/25.7	826/32.44	790/31.1
Debljina [mm/in.]	52/2.0	46/1.81	50/1.97
Težina [kg/lb]	11.9/26.3	17/37.5	15.4/34
Efikasnost panela	12.9%	12.7%	12.0%

Realni uslovi u kojima se eksploatiše solarni panel odstupaju od standardnih (STC), tako da se efikasnost panela i ostali tehnički parametri u realnim uslovima manje ili više razlikuju od onih koji su navedeni u tabeli 1.

Jedan od bitnih parametara koji utiče na efikasnost panela jeste i temperatura panela.

Povećanje temperature panela iznad vrednosti pri standardnim uslovima ispitivanja (25°C) uzrokuje pad efiksanosti panela, što je uzrokovano padom napona otvorenog kola i blagim porastom struje kratkog spoja panela. Tipična promena ovih veličina za kristalne silicijumske module je: $\Delta U_{OK} = -0.37 \frac{\%}{^{\circ}\text{C}}$, $\Delta I_{KS} = 0.05 \frac{\%}{^{\circ}\text{C}}$ i $\Delta P_{DC, \max} = -0.5 \frac{\%}{^{\circ}\text{C}}$.

Na slici 2 je prikazano kako se menja strujno-naponska karakteristika za solarni panel Kyocera KC120, pri promeni temperature panela i pri promeni iradijacije.



Slika 2: Strujno - naponska karakteristika za različite temperature panela i nivoe iradijacije za solarni panel Kyocera KC120-1

4. NOCT – temperatura pri normalnim uslovima eksploatacije

Da bi se mogla odrediti efikasnost panela pri različitim ambijentalnim uslovima (temperaturi ambijenta, pre svih) potrebno je proceniti temperaturu panela. Na temperaturu panela dominantno utiču snaga sunčevog zračenja i uslovi za odvođenje toplote, pre svih brzina duvanja vetra. Za svaki solarni panel proizvođač definiše temperaturu pri normalnim uslovima eksploatacije (NOCT – *Normal Operation Cell Temperature*). NOCT je temperatura panela pri

temperaturi ambijenta (okolnog vazduha) od 20 °C, solarnoj iradijaciji od 800 W/m² i brzini vetra od 1 m/s .

Proračun temperature panela pri različitoj iradijaciji i ambijentalnoj temperaturi se može proračunati pomoću sledećeg izraza:

$$T_{\acute{c}el} = T_{amb} + \left(\frac{NOCT - 20^{\circ}C}{0,8} \right) \cdot S, \quad (4)$$

gde su:

$T_{\acute{c}el}$ – temperatura solarnih ćelija panela u stepenima Celzijusa,

T_{amb} – ambijentalna temperatura u stepenim Celzijusa,

S – solarna iradijacija na površini modula u kW/m²,

$NOCT$ - temperatura solarnih ćelija panela pri normalnim uslovima u stepenima Celzijusa.

Uticaj brzine vetra na temperaturu panela je dosta složen i zavisi od nagiba panela u odnosu na pravac duvanja vetra. S obzirom da je pri standardnim uslovima pretpostavljen vrlo slab vetar, neuvažavanjem uticaja vetra na temperaturu solarnih ćelija se ide na stranu sigurnosti, što znači da se za ove rezultate u realnoj eksploataciji ima veći stepen sigurnosti.

Kada podatak za NOCT nije dostupan, moguće je iskoristiti drugi pristup u proceni temperature solarne ćelije koji se bazira na sledećem:

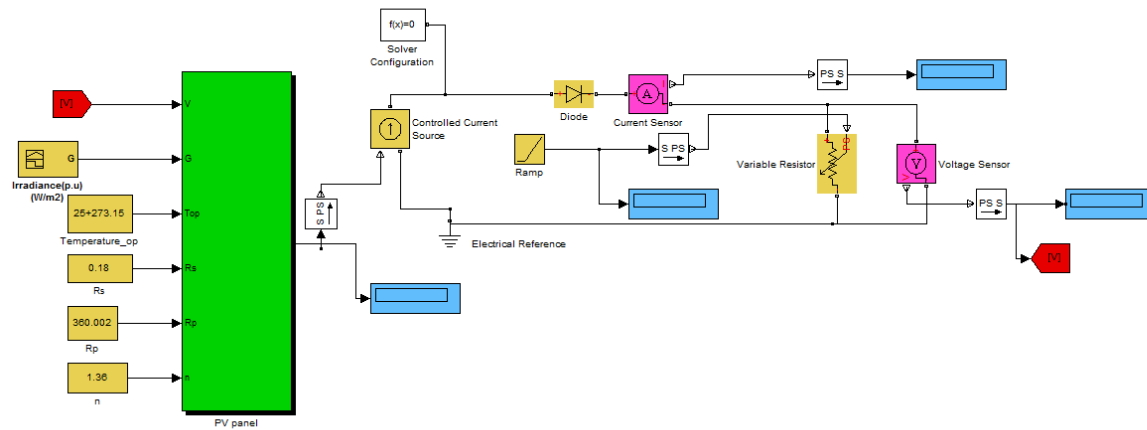
$$T_{\acute{c}el} = T_{amb} + \gamma \cdot \left(\frac{Iradijacija}{1 \frac{kW}{m^2}} \right), \quad (5)$$

gde je γ faktor proporcionalnosti koji zavisi od brzine vetra i ventilacije panela kada su instalirani. Tipične vrednosti za γ su u između 25°C i 35°C, što znači da su za iradijaciju od jednog Sunca (1000 W/m²) solarne ćelije 25°C do 35°C toplije od okoline.

ZADACI

Programski alat

U Matlabu je formiran model fotonaponskog panela, nominalne snage 60W, koji je sastavljen od 36 redno povezanih ćelija. Izgled modela je prikazan na slici 3.



Slika 3: Model fotonaponskog panela

ZADATAK 1

Koristeći Matlab model fotonaponskog panela prikazan na slici 3, popuniti tabelu 2, koja daje vrednosti I_{KS} , U_{OK} i P_{Max} za navedeni raspon temperatura θ pri solarnoj iradijaciji od jednog Sunca.

Tabela 2: Vrednosti I_{KS} , U_{OK} i P_{Max} za navedeni raspon temperatura θ pri solarnoj iradijaciji od jednog Sunca

θ [°C]	-20	-10	0	15	25	35	45
I_{KS} [A]							
U_{OK} [V]							
P_{Max} [W]							

OCENA ZADATKA 1		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

ZADATAK 2

Koristeći Matlab model fotonaponskog panela prikazan na slici 3, popuniti tabelu 3, koja daje vrednosti I_{KS} , U_{OK} i P_{Max} za navedeni raspon temperatura θ pri solarnoj iradijaciji od 60% Sunca.

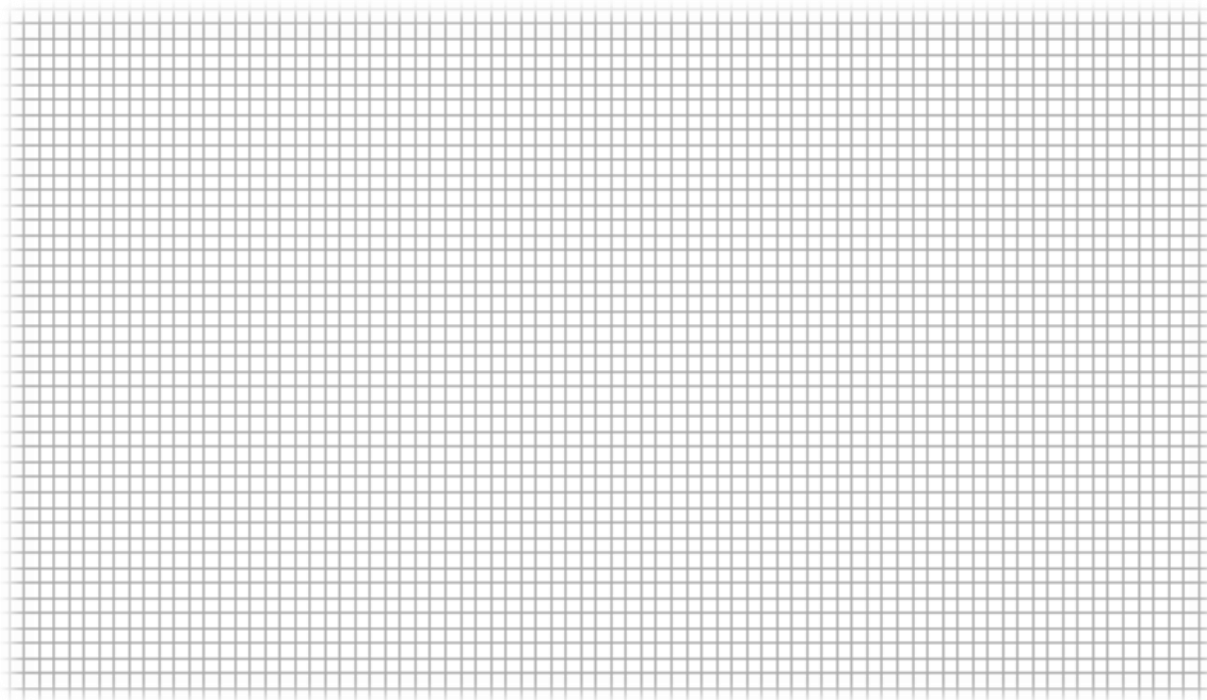
Tabela 3: Vrednosti I_{KS} , U_{OK} i P_{Max} za navedeni raspon temperatura θ pri solarnoj iradijaciji od 60% Sunca

θ [°C]	-20	-10	0	15	25	35	45
I_{KS} [A]							
U_{OK} [V]							
P_{Max} [W]							

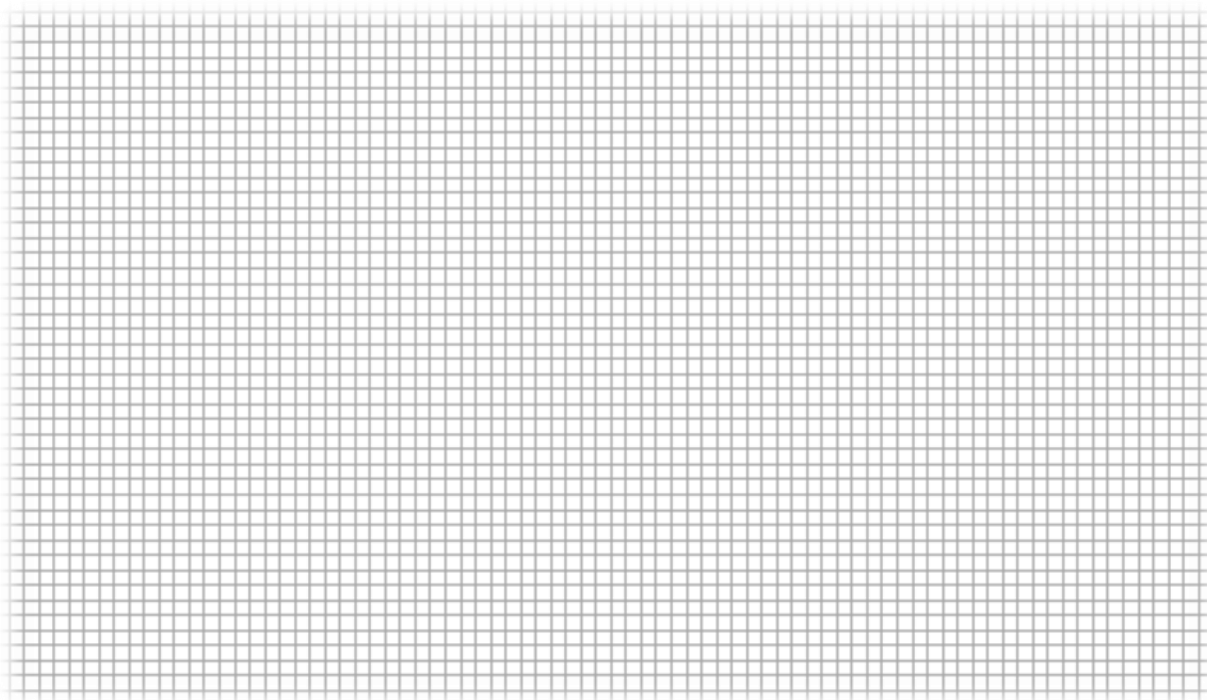
OCENA ZADATKA 2		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

ZADATAK 3

Prikazati grafički izgled I-U karakteristike i krive maksimalne snage za slučaj $\theta=0^\circ\text{C}$ pri solarnoj iradijaciji od jednog Sunca i pri solarnoj iradijaciji od 60% Sunca i označiti karakteristične vrednosti.



Grafik 1.: I-U karakteristike za slučaj $\theta=0^{\circ}\text{C}$ pri solarnoj iradijaciji od jednog Sunca i pri solarnoj iradijaciji od 60% Sunca

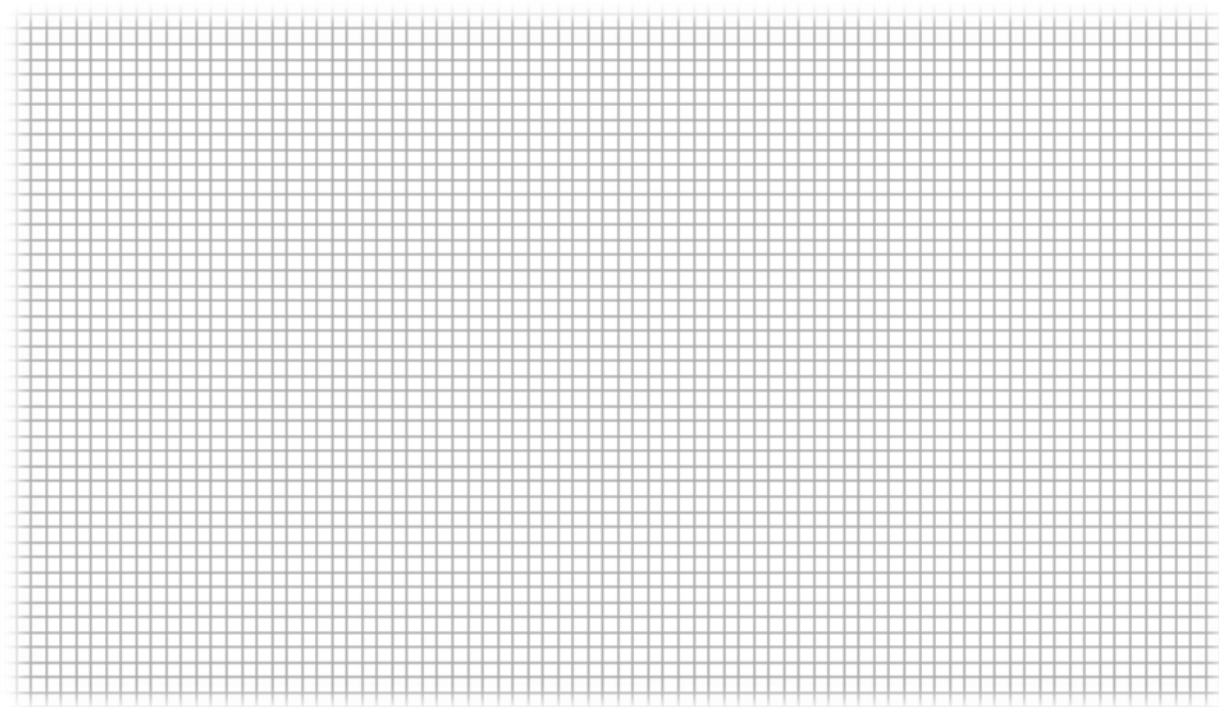


Grafik 2.: Krive maksimalne snage za slučaj $\theta=0^{\circ}\text{C}$ pri solarnoj iradijaciji od jednog Sunca i pri solarnoj iradijaciji od 60% Sunca

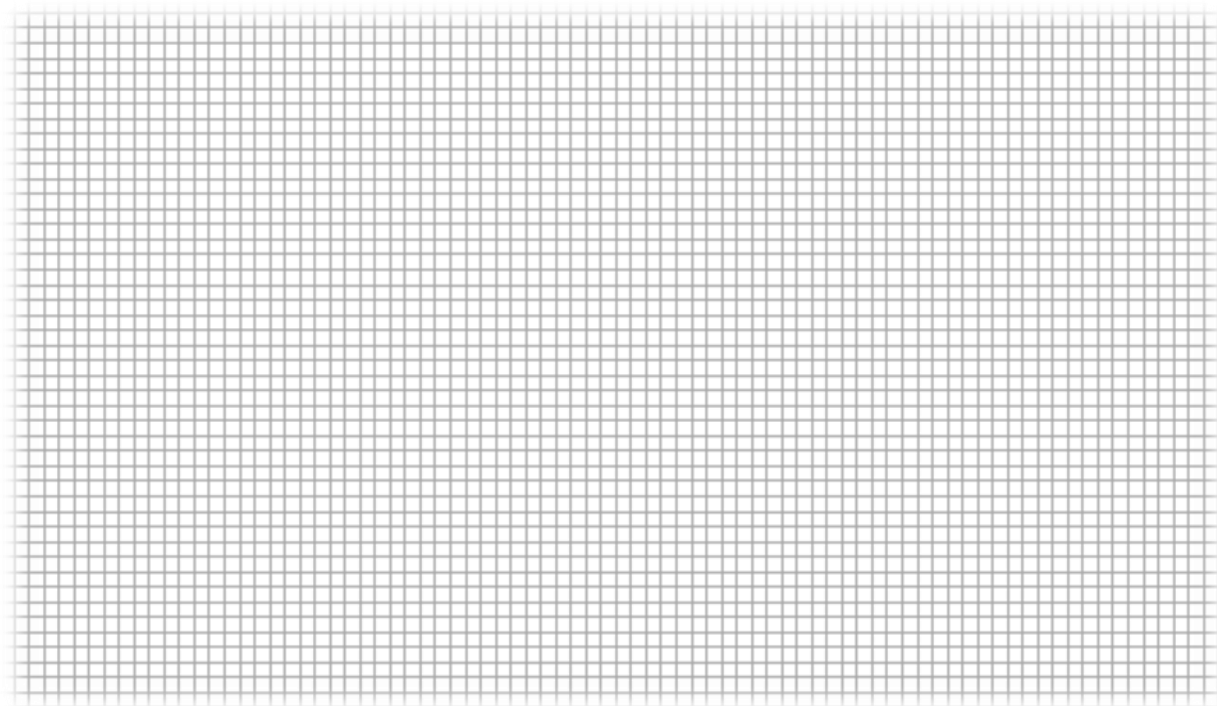
OCENA ZADATKA 3		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

ZADATAK 4

Prikazati grafički izgled I-U karakteristike i krive maksimalne snage za slučaj $\theta=45^{\circ}\text{C}$ pri solarnoj iradijaciji od jednog Sunca i pri solarnoj iradijaciji od 60% Sunca i označiti karakteristične vrednosti.



Grafik 3.: I-U karakteristike za slučaj $\theta=45^{\circ}\text{C}$ pri solarnoj iradijaciji od jednog Sunca i pri solarnoj iradijaciji od 60% Sunca



Grafik 4.: Krive maksimalne snage za slučaj $\theta=45^\circ\text{C}$ pri solarnoj iradijaciji od jednog Sunca i pri solarnoj iradijaciji od 60% Sunca

OCENA ZADATKA 4		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Vežba 4

ISPITIVANJE FOTONAPONSKOG PANELA U LABORATORIJSKIM USLOVIMA

- ☐ **Fotonaponski solarni sistem laboratorije za obnovljive
izvore energije**
- ☐ **Praktični primeri**

Datum: _____

Pregledao: _____

Predmet vežbe

U okviru četvrte vežbe vrši se ispitivanje fotonaponskog panela u laboratorijskim uslovima.

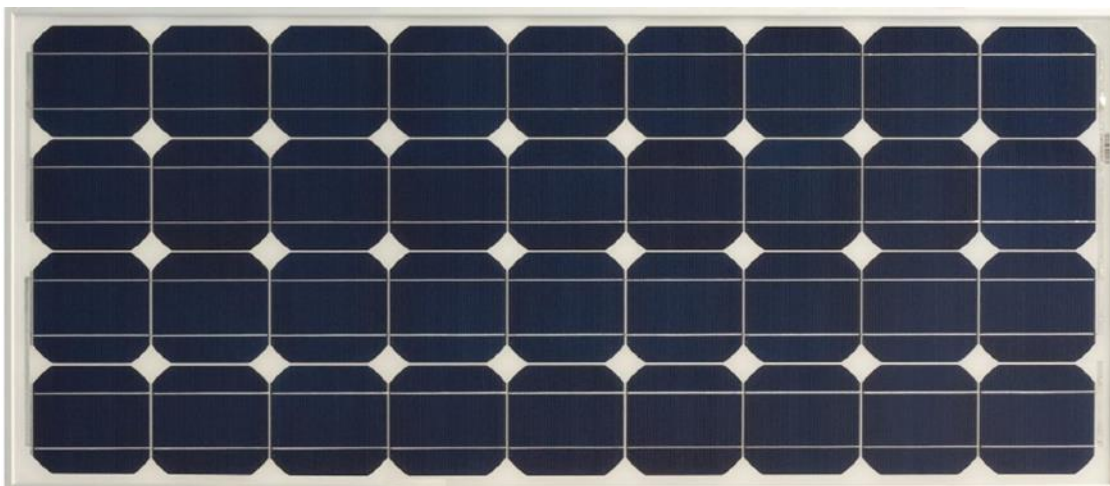
1. Solarni sistem laboratorije

Prvi zadatak solarnog sistema je da omogući prikaz kompletnog sistema proizvodnje, skladištenja i potrošnje električne energije proizvedene iz energije Sunca. Drugi zadatak je da omogući ispitivanje karakteristika samog solarnog panela u punom obimu. U skladu sa tim solarni sistem laboratorije poseduje dva režima rada, a gradivni elementi celog sistema u okviru ove vežbe su:

- Solarni panel ZHM – 80W
- Regulator punjenja baterija sa MPPT tehnologijom
- Dve baterije AGM 12V
- Sun Simulator
- Merno-regulaciona i upravljačka elektronika
- Server
- Potrošači

2. Solarni panel ZHM – 80W 12V

Solarni panel ZHM – 80W 12V (slika 1), je izrađen u monokristalnoj tehnologiji i poseduje veći stepen korisnog dejstva od standardnih polikristalnih panela te je zbog toga i odabran za korišćenje u ovoj vežbi. Proizvođač je UE Solar Co., Ltd.



Slika 1: Solarni panel ZHM – 80W

Dužina panela je 1197 mm, dok širina iznosi 535 mm. Kompletna površina koju zauzima panel je dakle 0,64 m². Panel poseduje 36 solarnih monokristalnih ćelija dimenzija 125×125 mm, tako da ukupna aktivna površina ovog panela iznosi 0.5625 m². Osnovne električne osobine su prikazane u tabeli 1.

Tabela 1: Električne karakteristike solarnog panela ZHM – 80W

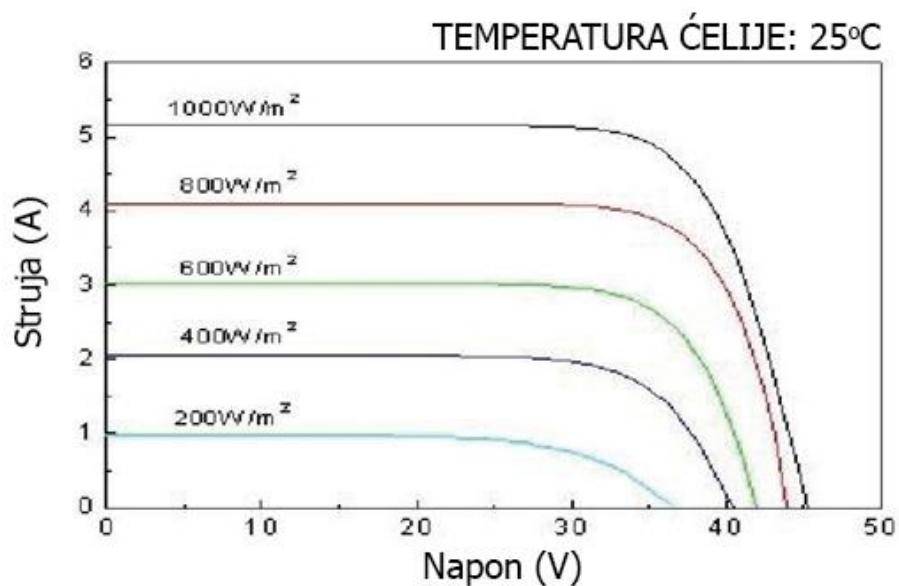
KARAKTERISTIKA	OZNAKA	JEDINICA	ZHM – 80W
Maksimalna snaga	P_{max}	W _p	80
Napon panela pri maksimalnoj snazi	U_{mp}	V	17.8
Struja panela pri maksimalnoj snazi	I_{mp}	A	4.49
Struja kratkog spoja	I_{SC}	A	4.94
Napon otvorenog kola	U_{OC}	V	21.97
Efikasnost jedne ćelije	%		15
Efikasnost panela	%		12.5

Parametri svake solarne ćelije pa tako i panela se menjaju u odnosu na uslove eksploatacije. Posebno su značajne promene parametara u odnosu na radnu temperaturu solarnog panela. Ovi parametri i koeficijenti kao i ostale fizičke karakteristike su prikazani u tabeli 2.

Tabela 2: Radni uslovi i koeficijenti solarnog panela

PARAMETAR	ZHM – 80W
Maksimalni napon sistema	1000 V
Tolerancija snage	$\pm 3\%$
Temperaturni koeficijent struje kratkog spoja	$+0,04 \pm 0,015$ %/°C
Temperaturni koeficijent napona otvorenog kola	$-(0,35 \pm 0,02)$ %/°C
Temperaturni koeficijent maskimalne snage	$-(0,5 \pm 0,05)$ %/°C
Temperaturni koeficijent maksimalne struje proizvodnje	$+0,04$ %/°C
Temperaturni koeficijent maksimalnog napona proizvodnje	$-0,38$ %/°C
Opseg radnih temperatura	-40°C do $+90^{\circ}\text{C}$
Najveći dozvoljeni površinski pritisak napanel	200 kg/m^2

Jedna od najbitnijih karakteristika određenog solarnog panela je njegova strujno-naponska karakteristika na nekoliko nivoa iradijacije. Strujno-naponska kriva panela ZHM – 80W, dostupna od proizvođača prikazana je na slici 2.

**Slika 2:** Strujno-naponska karakteristika ZHM – 80W

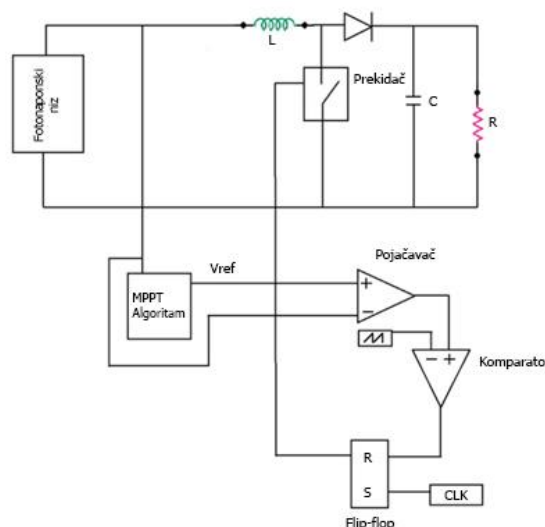
3. Regulator punjenja baterija sa MPPT tehnologijom

Regulator punjenja baterija je elektronski sklop koji energiju jednog naponskog i strujnog nivoa koja dolazi sa solarnog panela pretvara u energiju drugog naponskog i strujnog nivoa podesnu za bezbedno punjenje baterija. Takođe preko njega se odvija i protok energije sa baterija prema potrošačima. U izolovanim sistemima predstavlja neophodan i kritičan deo, jer u sebi sadrži električne zaštite i kontrolere toka energije.

Tipični solarni paneli konvertuju mali procenat (maksimalno do 30%) ukupnog solarnog zračenja u električnu energiju. Kako bi se poboljšala ova veoma važna karakteristika to jest efikasnost solarnog panela implementira se MPPT tehnologija ili tačnije rečeno MPPT algoritam.

Prema MPPT teoremi, maksimalna izlazna snaga kola sa jednosmernim izvorom se javlja kada je Tevenenova impendansa izvora jednaka impendansi potrošača, tako da MPPT algoritam mora uskladiti ove dve impendanse. U tu svrhu se koristi DC/DC pretvarač, podizač napona (slika 3).

MPPT algoritam menjajući frekvenciju rada DC/DC podizača napona može postići izjednačenje gore pomenutih impendansi (menja se samo impendansa izvora) i omogućiti maksimalnu izlaznu snagu kola u određenom trenutku.



Slika 4: Regulator punjenja sa MPPT implementacijom

4. Baterije AGM 12V

Za potrebe akumulacije proizvedene energije i čuvanja za kasniju upotrebu u većini sistema sa obnovljivim izvorima energije koriste se olovne gelirane baterije. U laboratoriji, osim za tu upotrebu, služe i kao pouzdani izvori stabilnog napona na koji se referišu većina merenja u vežbi. Važno je istaći da su ove baterije potpuno zatvorene i ne postoji nikakva mogućnost isticanja štetnih materija i kiselina kao što je to slučaj kada se koriste obične kisele baterije ili akumulatori. U laboratoriji su u upotrebi dve baterije nazivnog kapaciteta od 35 Ah (zajedno 70 Ah) i naponskog nivoa od 12 V, vezane u rednu vezu rade na naponu od 24 V dok u paralelnoj vezi rade na naponskom nivou od 12 V.

5. Sun Simulator

Sun Simulator se sastoji od 8 halogenih reflektora, koji se selektivno pale i gase (po 2 u svakom režimu), kako bi se dobila varijabilna iradijacija (slika 5). Električna snaga pojedinačnog reflektora je 500 W, pa je tako snaga kompletnog simulatora 4 kW.



Slika 5: Sun Simulator sa solarnim panelom u laboratoriji

6. Merno-regulaciona i upravljačka elektronika

Merenje svih fizičkih veličina (napona, struje, temperature, broja obrtaja, itd.) se vrši pomoću specijalnog elektronskog sklopa, namenski napravljenog za potrebe laboratorije. Sam elektronski sklop se sastoji iz tri modula:

- Merni modul;
- Komunikaciono-upravljački modul;
- Regulacioni modul.

Rad celokupnog uređaja omogućavaju dva mikroprocesora.

7. Server

Uloga servera u laboratorijskom sistemu je konačna obrada izmerenih veličina, njihovo prikazivanje u čitljivoj formi i pružanje funkcionalnog radnog okruženja.

ZADACI

Pri izvođenju vežbe, nagibni ugao solarnog panela u odnosu na horizontalnu podlogu će se menjati, uzimaće vrednosti od $\Sigma = 45^\circ$, $\Sigma = 60^\circ$ i $\Sigma = 90^\circ$. Promena ovog nagibnog ugla vrši se manuelno i nije automatizovana. Promenom nagibnog ugla, menjaće se napon i struja na izlazu solarnog panela.

Naredna veličina koja će se menjati pri izvođenju ove vežbe je osvetljaj na površini panela. S obzirom da se vežba izvodi u laboratorijskim uslovima, nije moguće računati na prirodni izvor svetlosti, tj. Sunce. Čak i da je Sunce dostupno kao izvor svetlosnog zračenja, prednost reflektora se ogleda u činjenici da je snagu zračenja moguće menjati po potrebi, što sa Suncem nije slučaj. Broj reflektora (svaki od njih snage 500 W, što znači da je električna snaga koju uzima iz mreže jednaka 500 W) koji se nalaze na fiksnom rastojanju od solarnog panela se menja, uzimaće vrednosti 2, 4 i 8.

Pri promeni nagibnog ugla solarnog panela i broja uključenih reflektora, menjaju se struja i napon na priključcima solarnog panela, kao i osvetljaj na njegovoj površini. Ove veličine za svaki karakteristični slučaj treba zapisati u priložene tabele.

Potrebno je izračunati maksimalnu snagu koja se dobija u ovim slučajevima, kao proizvod napona i struje. Maksimalnu snagu, napon i struju pri toj snazi, osvetljaj, nagibni ugao i ukupnu snagu zračenja reflektora treba upisati u odgovarajuću tabelu.

Napon U [V]

	2 x 500 W	4 x 500 W	6 x 500 W	8 x 500 W
$\Sigma = 45^\circ$				
$\Sigma = 60^\circ$				
$\Sigma = 90^\circ$				

Struja I [A]

	2 x 500 W	4 x 500 W	6 x 500 W	8 x 500 W
$\Sigma = 45^\circ$				
$\Sigma = 60^\circ$				
$\Sigma = 90^\circ$				

Osvetljaj O [lux]

	2 x 500 W	4 x 500 W	6 x 500 W	8 x 500 W
$\Sigma = 45^\circ$				
$\Sigma = 60^\circ$				
$\Sigma = 90^\circ$				

Snaga $P=U \cdot I$ [W]

	2 x 500 W	4 x 500 W	6 x 500 W	8 x 500 W
$\Sigma = 45^\circ$				
$\Sigma = 60^\circ$				
$\Sigma = 90^\circ$				

Maksimalna snaga

Maksimalna snaga P_{max} [W]	Struja pri maksimalnoj snazi I_M [A]	Napon pri maksimalnoj snazi U_M [V]	Osvetljaj pri maksimalnoj snazi O_M [lux]	Nagibni ugao panela Σ_M pri maksimalnoj snazi	Broj reflektora od 500 W pri maksimalnoj snazi

Odgovorite na sledeća pitanja:

1. Koja je maksimalna snaga, a koji su napon i struja pri maksimalnoj snazi koje deklarise proizvođač za solarni panel koji se koristi u vežbi?

Odgovor:

2. Kolika je temperatura ćelije pri ostvarenoj maksimalnoj snazi?

Odgovor:

3. Kolika je površina, a koja je debljina solarnog panela koji se koristi u vežbi?

Odgovor:

4. Šta se postiže rednim, a šta paralelnim povezivanjem solarnih ćelija?

Odgovor:

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Vežba 5

ENERGIJA VETRA - TRENAŽER ČISTE ENERGIJE

- ☐ **Osobine vetrogeneratora**
- ☐ **Krive karakteristika vetrogeneratora**
- ☐ **Praktični primeri**

Datum: _____

Pregledao: _____

Predmet vežbe

Peta vežba obrađuje energiju vetra kroz dva eksperimenta koja se izvode uz pomoć trenažera čiste energije.

Eksperiment 1 – Osobine vetrogeneratora: U ovom eksperimentu studenti će se upoznati sa tipičnim osobinama vetrogeneratora. Oni će istražiti uticaj pozicije lopatica rotora, smera vetra i broja lopatica rotora na električnu snagu vetrogeneratora. Radne teme koje će se obraditi u ovom eksperimentu su: Prednosti i mane vetrogeneratora, Pitanja o eksperimentu, Pitanja o razumevanju snage vetrogeneratora.

Eksperiment 2 – Krive karakteristika vetrogeneratora: U ovom eksperimentu studenti će proračunati i nacrtati krive karakteristika vetrogeneratora. Radne teme koje će se obraditi u ovom eksperimentu su: Opšta pitanja o vetrogeneratorima, Pitanja o eksperimentu, Pitanja o razumevanju krivih karakteristika i snage vetrogeneratora.

1. Energija vetra - Osnovni principi

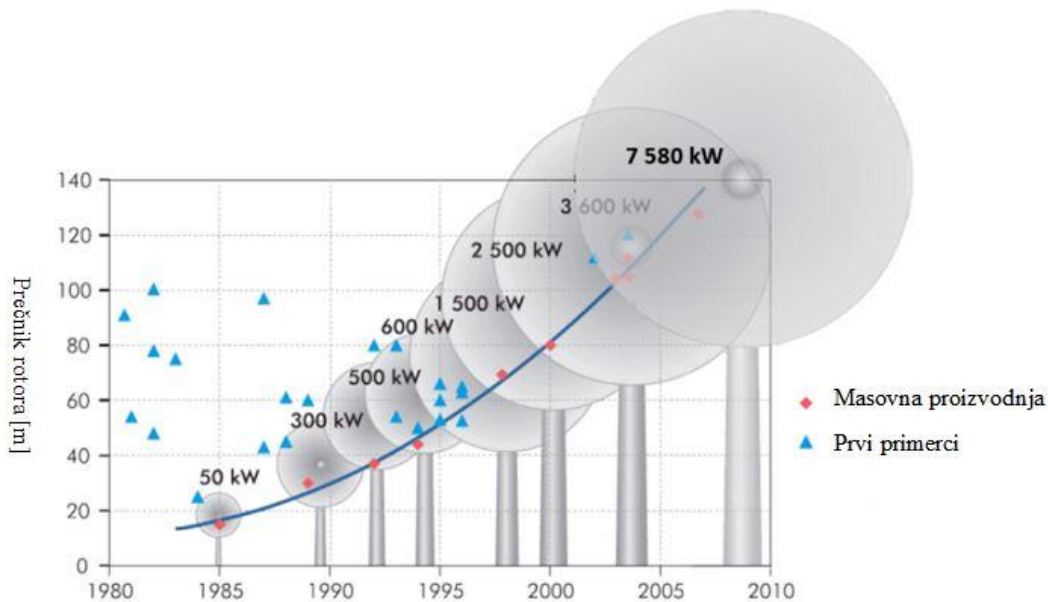
Vetroturbine pretvaraju kinetičku energiju kretanja vazdušnih masa u mehanički rad i posle u električnu energiju. Tipičan primer je vetrenjača, koja pretvara energiju vetra u mehanički rad za pokretanje mlina ili vode.

U vetroturbini kretanje vazdušnih masa pokreće rotor. Mehanička rotaciona energija pokreće električni generator koji je pretvara u električnu energiju. Količina energije zavisi od:

- Gustine vazduha (1.225 kg/cm^3 pri 15°C i normalnom atmosferskom pritisku), i zavisi od vlažnosti.
- Brzine vetra. Najmanje 20 km/h je potrebno za dobru proizvodnju el. energije.
- Veličine površine rotora.

Električna energija se tipično unosi u javnu elektroenergetsku mrežu ili koristi kao samostalni energetska izvor u udaljenim oblastima.

Snaga vetroturbine, takođe zavisi od prečnika rotora (slika 1):



Slika 1: Prečnik rotora i snaga vetroturbine, izvor: International Energy Agency (IEA)

Kinetička energija vazdušne mase E_{kvetra} [W] je proporcionalna kvadratu brzine vetra na rotoru v [m/s] i masi vazduha m [kg]:

$$E_{kvetra} = 0.5 \cdot m \cdot v^2. \quad (1)$$

Masa vazduha m , može biti izračunata na osnovu zapremine V [m³] i gustine ρ [kg/m³]:

$$m = V \cdot \rho. \quad (2)$$

Zapremina V može se predstaviti kao proizvod površine rotora A [m²] i pređenog puta vetra s [m]:

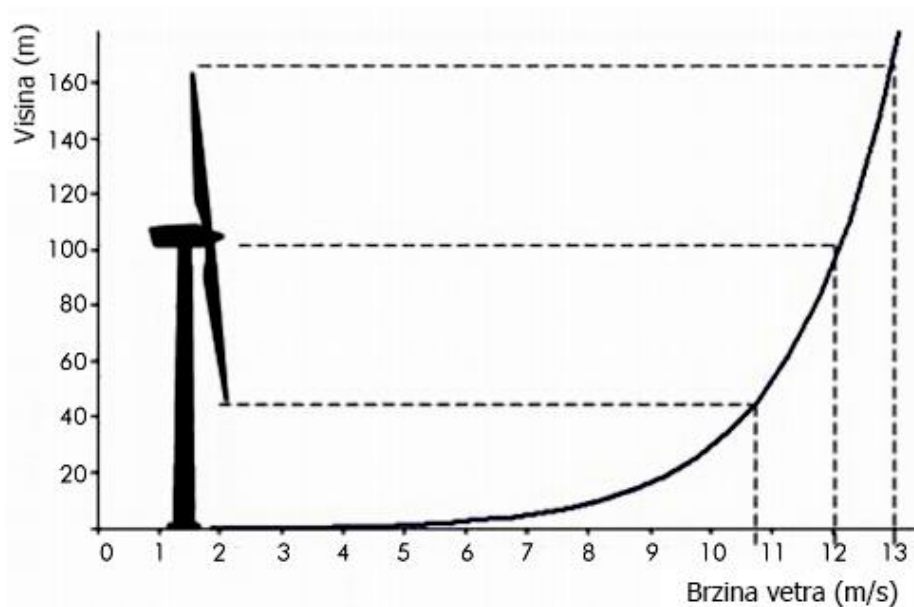
$$V = A \cdot s. \quad (3)$$

Odatle sledi da je snaga vetra u Vatima:

$$P_{vetra} = \frac{E_{kvetra}}{t} = 0.5 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3. \quad (4)$$

Gde je t [s] vreme za koje vetar brzine v pređe put s .

Na slici 2 prikazana je promena brzine vetra sa visinom.



Slika 2: Visina vetroturbine i preovlađujuće brzine vetra

Prema zakonu koji je definisao Albert Betz (1885–1968), maksimalna snaga dostupna od vetroturbine je $16/27$ snage vetra:

$$P_{Betz} = (16/27) \cdot P_{vetra} . \quad (5)$$

Ovaj limit je nezavisan od oblika vetroturbine.

Lopaticе rotora modernih vetroturbina su aerodinamički oblikovane, slično krilima aviona. Zakrivljenost lopatica uzrokuje oblast sa niskim pritiskom iznad lopatice i oblast sa visokim pritiskom ispod lopatice. Razlika u pritiscima uzorkuje silu uzgona koja je normalna na vetar, koja pokreće lopatice i okreće rotor. Maksimalni Becov (Betz) koeficijent c_p za vetroturbine sa horizontalnom osovinom iznosi $16/27 = 59$ procenata.

Moderne vetroturbine su vetroturbine sa horizontalnom osovinom i tri lopatice:

Efikasnost: Efikasnost je visoka i snaga je za 14% veća nego kada se koristi samo jedna lopatica.

Troškovi: Što je manje lopatica, manji su troškovi za transport, postavljanje, održavanje i popravku.

Disbalans: Neparan broj lopatica dovodi do povećane glatkoće i stabilnosti. Kod vetroturbina sa dve lopatice, dok je jedna lopatica pod maksimalnim pritiskom vetra, druga je istovremeno stubom zaklonjena od vetra. Ovo dovodi do visoke sile smicanja.

Moderne vetroturbine automatski podešavaju ugao lopatica da bi kontrolisale snagu sistema, jer se vetar menja, i na taj način optimizuju efikasnost.

Ugao je povećan nakon što se pređe nominalna brzina, da bi se smanjilo opterećenje na vetroturbinu. Pri olujnom vremenu (brzina vetra 25-33m/s), lopatice su ubrzane, i dolazi do zaustavljanja pogonskog mehanizma, što stavlja rotor u stanje mirovanja.

Ubrzo nakon što je nominalna proizvodnja dostignuta, pri nominalnoj brzini, snaga se redukuje okretanjem lopatica ka vetru (eng. pitching).

U trenažeru čiste energije vetrogenerator je otporni rotor: Lopatice rotora uvlače vetar i pokreću se u smeru vetra. Otpor protoku vetra uzrokuje da se rotor okreće. Maksimalni Becov (Betz) koeficijent c_p za otporni rotor je 19%. „Više je bolje“ se primenjuje, u praksi, 30 lopatica rotora je tipično, a moguće je i do 150 lopatica. Ova vrsta lopatica rotora se samo može pokretati brzo koliko i vetar i stoga se ne koristi za komercijalnu proizvodnju električne energije, iako nalazi neke primene u Americi i Australiji.

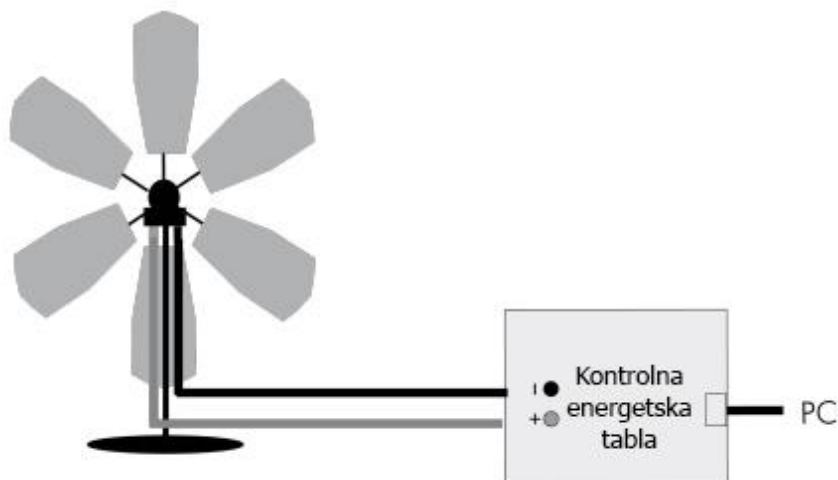
Eksperiment 1 – Osobine vetrogeneratora

Ciljevi ovog eksperimenta su da se studenti upoznaju sa osnovnim principima energije vetra, da eksperimentalnim putem uoče prednosti i mane vetroturbina, nauče da prikupljaju relevantne podatke o vetru i da iz navedenih podataka izvedu ispravne zaključke. U okviru ovog eksperimenta studenti će ispitati kakav uticaj imaju pozicije lopatica, smer vetra i broj lopatica na snagu vetrogeneratora.

Za izvođenje ovog eksperimenta potrebno je koristiti: Clean Energy Trainer softverski alat (CET program), vetrogenerator, kontrolnu energetska tablu sa USB kablom, ventilator, 1 crni kabl, 1 crveni kabl i jednu traku za merenje (metar).

Uputstva za eksperiment:

Na slici 3 prikazana je postavka za eksperiment 1 sa pogledom od nazad.



Slika 3: Postavka eksperimenta 1, pogled od nazad, lopatice u poziciji 90°

1. Postaviti eksperiment kao što je prikazano na slici 3.
2. Podesiti lopatice tako da su u istoj ravni sa rotorom, 90° u odnosu na osu rotora.
3. Postaviti ventilator na 30 cm od vetrogeneratora tako da je pravac vetra u liniji sa osom rotora.

Kako se struja i napon ponašaju sa variranjem pozicije lopatica?

4. Izabrati “Live module” u programu.
5. Uključiti ventilator (nivo 2).
6. Podešavati ugao protoka vazduha (vetra) rotiranjem svih lopatica podjednako i posmatrati grafik koji se iscrtava na računaru. Cilj je naći maksimalni napon otvorenog kola. U svakom trenutku je potrebno obezbediti isto rastojanje između vetrogeneratora i ventilatora.

Ventilator generiše vazdušni vrtlog, a ne paralelni protok vazduha. Iz tog razloga lopatice moraju da se rotiraju u pravom smeru: Smer obrtanja rotora i ventilatora mora biti isti.

7. Zabeležiti poziciju lopatica (ugao vetra) sa najvećim naponom otvorenog kola.
8. Isključiti ventilator.

Uporediti krive karakteristike za različite pozicije lopatica

1. Izabrati “Wind generator” režim u programu.
2. Podesiti lopatice tako da su u istoj ravni sa rotorom, 90° u odnosu na osu rotora.
3. Uključiti ventilator (nivo 2).
4. Snimiti “Automatic characteristic curve”.
5. Podesiti ugao vetra: 60° , 45° , 30° , 0° .
6. Snimiti krivu karakteristike.
7. Ponoviti dva poslednja koraka za uglove vetra 45° , 30° i 0° .
8. Isključiti ventilator.

Kako se struja i napon ponašaju sa manje lopatica?

1. Rotirati lopatice 45° u odnosu na osu rotora.
2. Uključiti ventilator (nivo 2).
3. Izabrati “Live module” režim u programu.
4. Izmeriti napon i vrednosti uneti u tabelu na radnom listu.
5. Isključiti ventilator.
6. Ukloniti dve naspramne lopatice.

Šteta zbog labavih lopatica u čvorištima!

Ako čvorište nije zategnuto, lopatice mogu izleteti kada rotor počne da se obrće. Stoga je potrebno fiksirati glavčinu i ručno zategnuti čvorišta.

7. Uključiti ventilator (nivo 2).
8. Izmeriti napon i vrednosti uneti u tabelu na radnom listu.
9. Isključiti ventilator.
10. Ukloniti još dve naspramne lopatice.
11. Uključiti ventilator (nivo 2)
12. Izmeriti napon i vrednosti uneti u tabelu na radnom listu.
13. Isključiti ventilator.

Kako se merenja ponašaju sa variranjem pravca vetra?

1. Zameniti sve lopatice i rotirati ih 45° prema osi rotora. Prilikom ponovnog postavljanja čuju se tri klika.

Ukoliko se ne čuje klik, lopatice u čvorištu su labave, stoga je potrebno fiksirati glavčinu i zategnuti čvorište u smeru kretanja kazaljke na časovniku. Ukoliko vratilo ne sklizne u okno, onda se čvorište treba olabaviti fiksiranjem glavčine i zakretanjem u smeru suprotnom kretanju kazaljke na časovniku.

2. Proveriti rastojanje do ventilatora (30 cm) i podesiti ga ukoliko je izmenjeno.
3. Uključiti ventilator (nivo 2).
4. Ovo merenje takođe koristi “Live module” režim.
5. Posmatrati napon i snagu vetrogeneratora.
6. Isključiti ventilator.

Kako se merenja ponašaju ako je protok vazduha poremećen?

1. Zameniti sve lopatice i rotirati ih 45° prema osi rotora.
2. Proveriti rastojanje do ventilatora (30 cm) i podesiti ga ukoliko je izmenjeno.
3. Uključiti ventilator (nivo 2).
4. Ovo merenje takođe koristi “Live module” režim.
5. Postaviti različite objekte između ventilatora i vetrogeneratora te posmatrati napon i snagu vetrogeneratora.
6. Isključiti ventilator.

ZADACI za eksperiment 1 (radni list 1)

Opšta pitanja/inicijalni test

1. Šta je energija vetra?
2. Šta je vetroturbina?
3. Šta je vetrogenerator?
4. Kako je vetroturbina konstruisana?
5. Šta su prednosti energije vetra?
6. Šta su mane energije (snage) vetra?
7. Koje opasnosti mogu nastati od upotrebe vetroturbina?

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Pitanja u vezi eksperimenta

8. Šta se dešava sa merenjima kada je ugao protoka promenjen?

9. Kako se napon i snaga ponašaju kada se smanji broj lopatica?
10. Šta se dešava sa merenjima pri promeni pravca vetra?
11. Šta se dešava sa merenjima ako je protok vazduha poremećen?

	Ugao lopatica				
	0°	30°	45°	60°	90°
Napon U [V]					

	Broj lopatica		
	6	4	2
Napon U [V]			

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Pitanja za proveru razumevanja

12. Zašto se raspravlja o energiji vetra uprkos tome što je ekološki pogodna?

13. Zašto većina vetroturbina ima samo tri lopatice?

14. Koja je sličnost između vetrenjače i vetroturbine?

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

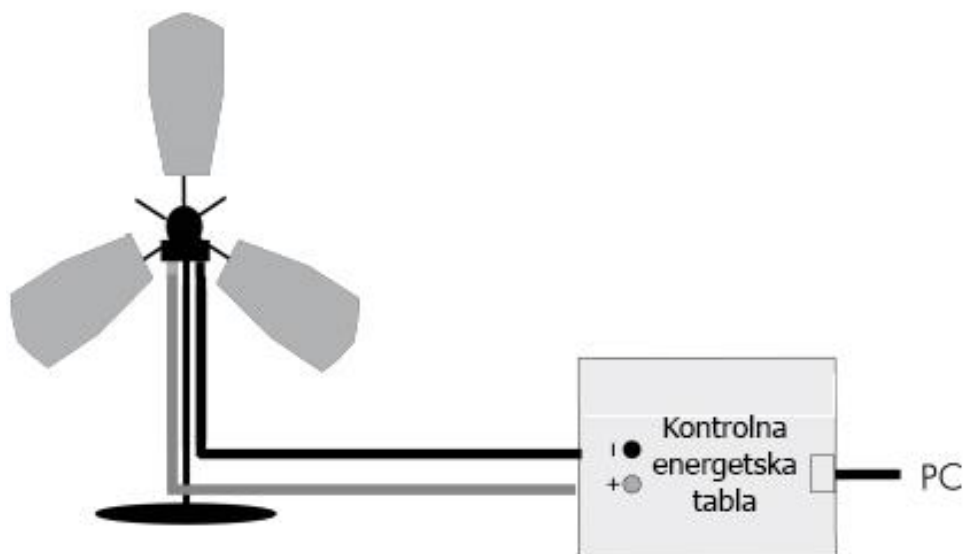
Eksperiment 2 – Krive karakteristika vetrogeneratora

Ciljevi ovog eksperimenta su da studenti uoče promene u snazi vetrogeneratora, odrede krive karakteristika vetrogeneratora i da znaju da tumače te krive. Takođe, u ovom eksperimentu, studenti se upoznaju sa limitima u snazi vetrogeneratora prilikom jakih vetrova.

Za izvođenje ovog eksperimenta potrebno je koristiti: CET program, vetrogenerator, kontrolnu energetska tablu sa USB kablom, ventilator, 1 crni kabl, 1 crveni kabl i jednu traku za merenje (metar).

Uputstva za eksperiment:

Na slici 4 prikazana je postavka za eksperiment 2.



Slika 4: Eksperimentalna postavka, lopatice u položaju od 90°

1. Postaviti eksperiment kao što je prikazano na slici 4. Postaviti lopatice tako da su u istoj ravni sa rotorom, 90° prema osi rotora.
2. Postaviti ventilator na 30cm od vetrogeneratora tako da je pravac vetra u liniji sa osom rotora.
3. Izabrati "Live module" u programu.
4. Uključiti ventilator, nivo 2.
5. Podesiti ugao protoka vetra, rotiranjem svih lopatica rotora podjednako sve dok se na grafiku koji se prikazuje u programu na računaru ne ostvari maksimalni napon otvorenog kola. Pri tome je bitno da rastojanje između ventilatora i vetrogeneratora ostane isto.
6. Isključiti ventilator.

Ventilator generiše vazdušni vrtlog, a ne paralelni protok vazduha. Iz ovog razloga lopatice rotora moraju biti rotirane u odgovarajućem smeru:

Smer rotacije rotora i ventilatora mora biti isti.

Kako se može postići maksimalna snaga vetrogeneratora?

7. Izabrati “Wind generator” u programu.
8. Uključiti ventilator, nivo 2.
9. Snimiti krivu karakteristike (“Automatic characteristic curve”).
10. Sačuvati merenja (“Save measurement”).
11. Isključiti ventilator.
12. Dodati još 3 lopatice sa istim nagibom.
13. Ponoviti korake 8-11.
14. Uključiti ventilator, nivo 3.
15. Ponoviti korake 9-11.

ZADACI za eksperiment 2 (radni list 2)

Opšta pitanja/inicijalni test

1. Kada je čovečanstvo došlo na ideju o korišćenju energije vetra?
2. Kada je izgrađena prva vetroturbina za proizvodnju električne energije?
3. Koje tri zemlje imaju najviše ukupne instalisane snage vetroturbina u sistemu?
4. Šta su vetroparkovi?
5. Šta je offshore vetropark, a šta onshore vetropark?
6. Kolika površina zemlje je potrebna za vetroturbinu?
7. Na šta utiče potrebno rastojanje između vetroturbina i koliko ono iznosi?
8. Šta je sat punog opterećenja (eng. full load hour)?
9. Kolika je cena po instalisanom kW vetroturbine?
10. Koliko vremena je potrebno da se investicija sistema sa vetrogeneratorima isplati, a koliko sa fotonaponskim sistemima?

--

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Pitanja u vezi eksperimenta

11. Kako se može postići maskimalna snaga vetrogeneratora?
12. Uz pomoć programa za rad sa tabelama (npr. Excel) generisati i prikazati grafički krive karakteristike snaga/struja iz testova.
13. Objasniti razlike između krivih karakteristike struja/napon iz testova.
14. Odrediti maksimalnu snagu za sve testove.

	Broj lopatica rotora		
	3	6	6
	Ventilator		
	Nivo 2	Nivo 2	Nivo 3
Maksimalna snaga P [mW]			

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Pitanja za proveru razumevanja

15. Zašto se polemiše o energiji vetra uprkos tome što je ekološki pogodna?
16. Kako nastaje vetar?
17. Da li je tačno (precizno) da se kaže da je energetska resurs “vetar” neiscrpan?
18. Zašto se vetroturbine grade (postavljaju) blizu obale? Zašto više vetra duva blizu obale?
19. Zašto vetroturbine zahtevaju upravljački sistem?

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Vežba 6

ISPITIVANJE VETROGENERATORA U LABORATORIJSKIM USLOVIMA

- ☐ **Vetroenergetski sistem laboratorije za obnovljive izvore energije**
- ☐ **Praktični primeri**

Datum: _____

Pregledao: _____

Predmet vežbe

U okviru šeste vežbe vrši se ispitivanje vetrogeneratora u laboratorijskim uslovima.

1. Vetro sistem laboratorije

Prvi zadatak vetro sistema je da omogući prikaz kompletnog sistema proizvodnje, skladištenja i potrošnje električne energije proizvedene iz energije vetra. Drugi zadatak je da omogući ispitivanje karakteristika samog vetrogeneratora u punom obimu, izuzimajući ispitivanja njegove aerodinamike. U skladu sa tim, vetro sistem laboratorije poseduje dva režima rada, a gradivni elementi celog sistema su:

- Vetrogenerator TPW 200W 24V,
- Regulator punjenja baterija,
- Dve baterije AGM 12V,
- Trofazni motor 0,37 kW,
- Frekventni regulator,
- Merno-regulaciona i upravljačka elektronika,
- Server,
- Potrošači.

2. Vetrogenerator TPW 200W 24V

Iako vetro sistem laboratorije podržava i merenja karakteristika vetrogeneratora nešto većih snaga, ovaj vetrogenerator je odabran i instalisan prvenstveno zbog njegovih dobrih karakteristika pri malim brzinama, niskom naponu koji generiše, malih dimenzija i jednostavnog instalisanja i puštanja u rad. Pošto je laboratorija prvenstveno namenjena studentima i izvođenju vežbi, vetrogenerator TPW 200W proizvođača Tyconpower se pokazao kao odličan izbor.

3. Fizičke karakteristike TPW 200W 24V

Ovaj vetrogenerator karakterišu mala težina (< 10 kg), ali i velika robusnost, kako bi izdržao jaka naprezanja prilikom najbržih vetrova. Posедуje 6 lopatica izrađenih od polipropilena ojačanog staklom, velike čvrstoće i otpornosti na ultravioletna zračenja i zamor materijala. Ovaj broj lopatica takođe obezbeđuje najbolje performanse pri vetrovima malih brzina i smanjuje vibracije pri velikom broju obrtaja. U tabeli 1 prikazane su osnovne karakteristike vetrogeneratora TPW 200W 24V.

Tabela 1: Osnovne karakteristike vetrogeneratora TPW 200W

KARAKTERISTIKA	TPW 200W 24V
Početna brzina vetra	2.1 m/s
Nominalna snaga	150W pri 12,5 m/s
Maksimalna snaga	200W
Naponski nivo	24V
Broj polova statorskog namotaja	36
Broj rotorskih magneta	10
Prečnik rotorskog diska	0.92 m
Maksimalna brzina rotora	500 – 550 ob/min
Broj lopatica	6
Materijal lopatica	Polipropilen ojačan staklom
Kućiste	Galvanizovan liveni aluminijum
Zaštita od prekomerne brzine	Da
Maksimalna dozvoljena brzina vetra	35 m/s
Težina	8.5 Kg
Proizvodnja električne energije (mesečno)	17 kWh pri 5.4 m/s

U realnom sistemu napon vetrogeneratora je konstantan, pošto je on direktno povezan sa regulatorom punjenja baterija koji generiše konstantan napon pri svom radu. Ova karakteristika je zapravo najbitnija pri projektovanju.

4. Regulator punjenja baterija

Regulator punjenja baterija je elektronski sklop koji energiju jednog naponskog i strujnog nivoa koja dolazi sa vetrogeneratora pretvara u energiju drugog naponskog i strujnog nivoa podesnu za bezbedno punjenje baterija. Takođe, preko njega se odvija i protok energije sa baterija prema potrošačima. U izolovanim sistemima predstavlja neophodan i kritičan deo, jer u sebi sadrži električne zaštite i kontrolere toka energije.

5. Baterije AGM 12V

Za potrebe akumulacije proizvedene energije i čuvanja za kasniju upotrebu u većini sistema sa obnovljivim izvorima energije koriste se olovne gelirane baterije. U laboratoriji osim za tu upotrebu služe i kao pouzdani izvori stabilnog napona na koji se referišu većina merenja i vežbi. Važno je istaći da su ove baterije potpuno zatvorene i ne postoji nikakva mogućnost isticanja štetnih materija i kiselina kao što je to slučaj kada se koriste obične kisele baterije ili akumulatori. U laboratoriji su u upotrebi dve baterije nazivnog kapaciteta od 35Ah (zajedno 70Ah) i naponskog nivoa od 12V, vezane u rednu vezu rade na naponu od 24V, dok u paralelnoj vezi rade na naponskom nivou od 12V.

6. Trofazni asinhroni elektromotor

Trofazni asinhroni elektromotor nazivne snage 370W u laboratoriji se koristi kao simulator brzine vetra. Osovina elektromotora je krutom vezom povezana sa osovinom vetrogeneratora i promenom broja obrtaja elektromotora automatski se menja i broj obrtaja vetrogeneratora. Ovakva konstrukcija i izvedba motor-vetrogenerator grupe ima svojih prednosti, ali i mana. U prednosti spadaju veoma laka i jednostavna montaža i demontaža, jednostavno merenje broja obrtaja, jednostavna ekstrapolacija brzine vetra, manje rotirajućih delova i spojnica i veća sigurnost u radu. Glavni nedostaci su povećano klizanje motora što sa sobom povlači povećanje struje rotora, smanjen obrtni moment na osovini, dodatno pregrevanje motora i

potencijano smanjen radni vek. Takođe, zbog krute veze pojačane su radijalne vibracije motor-vetrogenerator grupe. Svi ovi nedostaci su u granicama podnošljivog, zbog kratkog rada motor-vetrogenerator grupe na dnevnom nivou. Kako bi se ovi nedostaci kompenzovali, na elektromotoru je ugrađen dodatni eksterni hladnjak, podnožje elektromotora je izrađeno od antivibracione gume, i za upravljanje brojem obrtaja se koristi frekventni regulator sa mogućnošću podešavanja krive momenta i ograničenja struje statora.

7. Frekventni regulator EDS-800 0,75 kW

Frekventni regulatori se koriste za napajanje i kontinualnu regulaciju broja obrtaja standardnih trofaznih elektromotora. Obezbeđuju trofazni sistem izlaznih napona neophodan za pogon elektromotora primenom PWM tehnike. Promena brzine elektromotora se reguliše promenom učestanosti trofaznih napona koji se dovode na stator. Istovremeno, vrši se promena napona tako da moment motora ostaje nepromenjen.

8. Merno-regulaciona i upravljačka elektronika

Merenje svih fizičkih veličina (napona, struje, temperature, broja obrtaja, itd.) se vrši pomoću specijalnog elektronskog sklopa, namenski napravljenog za potrebe laboratorije. Sam elektronski sklop se sastoji iz tri modula:

- Merni modul,
- Komunikaciono-upravljački modul,
- Regulacioni modul.

Rad celokupnog uređaja omogućavaju dva mikroprocesora.

9. Server

Uloga servera u laboratorijskom sistemu je konačna obrada izmerenih veličina, njihovo prikazivanje u čitljivoj formi i pružanje funkcionalnog radnog okruženja.

ZADACI

Osnovni zadatak ispitivanja je da se dobiju realne karakteristike vetrogeneratora TPW 200W.

Drugi zadatak je da se ispita funkcionalnost celokupnog vetrosistema laboratorije obnovljivih izvora energije.

Kompletno laboratorijsko ispitivanje se sastoji iz nekoliko postupaka:

- Ogled kratkog spoja vetrogeneratora,
- Ogled praznog hoda vetrogeneratora,
- Rad vetrogeneratora u celokupnom sistemu.

ZADATAK 1

Izvršiti ogled kratkog spoja, koji se izvodi tako što se izvodi vetrogeneratora kratko spajaju i meri se promena struje sa promenom brzine. Rezultate uneti u tabelu 2.

Tabela 2: Ogled kratkog spoja vetrogeneratora TPW 200W

Učestanost napona statora elektromotora [Hz]	Broj obrtaja osovine motor- generator grupe [ob/min]	Struja vetrogeneratora [A]

OCENA ZADATKA 1		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

ZADATAK 2

Izvršiti ogled praznog hoda, koji se izvodi tako što se izvodi vetrogeneratora ostavljaju otvorenim i meri se promena napona sa promenom brzine, rezultate uneti u tabelu 3. Cilj ogleda je da se prover i ispita karakteristika elektromehaničke zaštite. Regulator punjenja baterija osim osnovne namene ima i funkciju zaštite vetrogeneratora od naglog prekida strujnog kola i naglog

udara vetra. Vetrogenerator je izrađen sa jakim permanentnim magnetima na rotoru i vrlo brzo indukuje nazivnu elektromotornu silu u statoru. Ako je gradijent porasta napona na statoru velik (što može biti u slučajevima naglog rasterećenja ili pri naglim udarima vetra) regulator uključuje električnu zaštitu smanjujući napon na statoru, time istovremeno smanjujući obrtni moment i ugaonu brzinu.

Tabela 3: Ogled praznog hoda vetrogeneratora TPW 200W

Učestanost napona statora elektromotora [Hz]	Broj obrtaja osovine motor-generator grupe [ob/min]	Napon vetrogeneratora [V]

OCENA ZADATKA 2		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

ZADATAK 3

Rad vetrogeneratora u celokupnom sistemu prvenstveno podrazumeva rad u režimu punjenja baterija, što predstavlja zapravo realne uslove rada. Potrebno je popuniti tabelu 4.

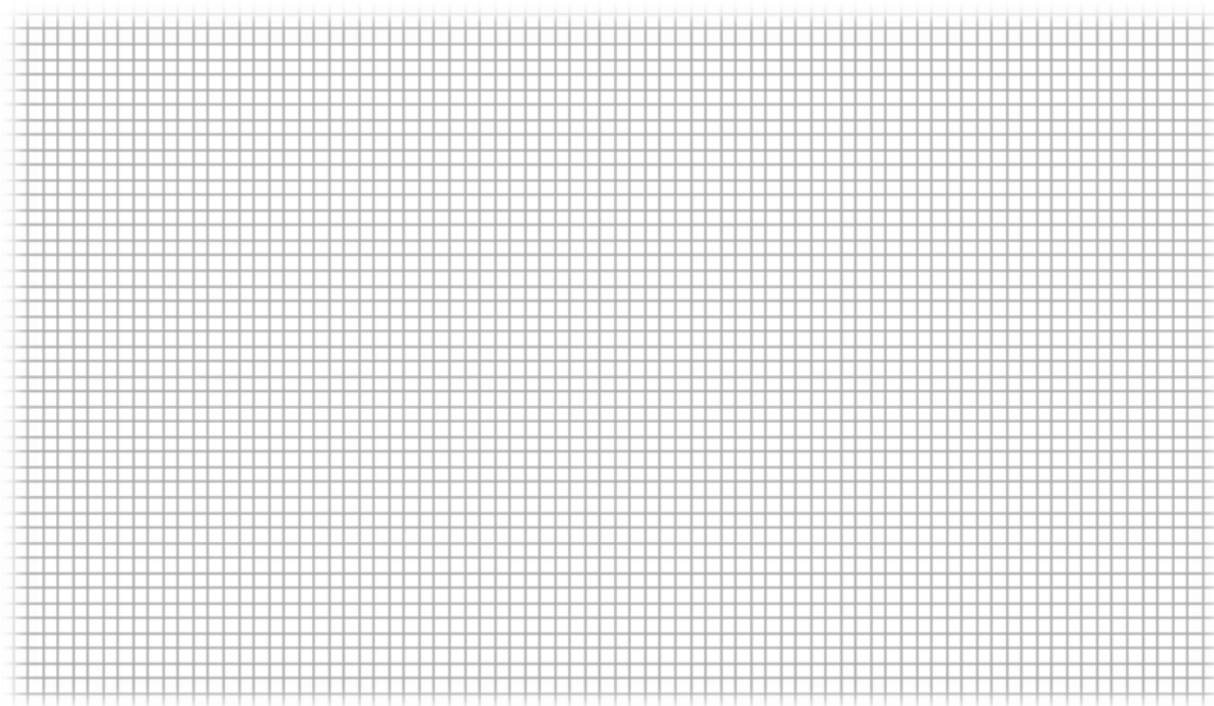
Tabela 4: Strujno – naponska karakteristika vetrogeneratora TPW 200W pri realnim uslovima rada

Učestanost napona statora elektromotora [Hz]	Broj obrtaja osovine motor-generator grupe [ob/min]	Napon vetrogeneratora [V]	Struja vetrogeneratora [A]

OCENA ZADATKA 3		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

ZADATAK 4

Strujno–naponsku karakteristiku vetrogeneratora TPW 200W pri realnim uslovima rada prikazati na grafiku 1.



Grafik 1.: Strujno – naponska karakteristika vetrogeneratora TPW 200W pri realnim uslovima rada

OCENA ZADATKA 4		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Vežba 7

STRUJNA I KARAKTERISTIKA SNAGE VETROGENERATORA TPW 200W

- ☐ **Maksimalni stepen iskorišćenja**
- ☐ **Becov (Betz) limit**
- ☐ **Praktični primeri**

Datum: _____

Pregledao: _____

Predmet vežbe

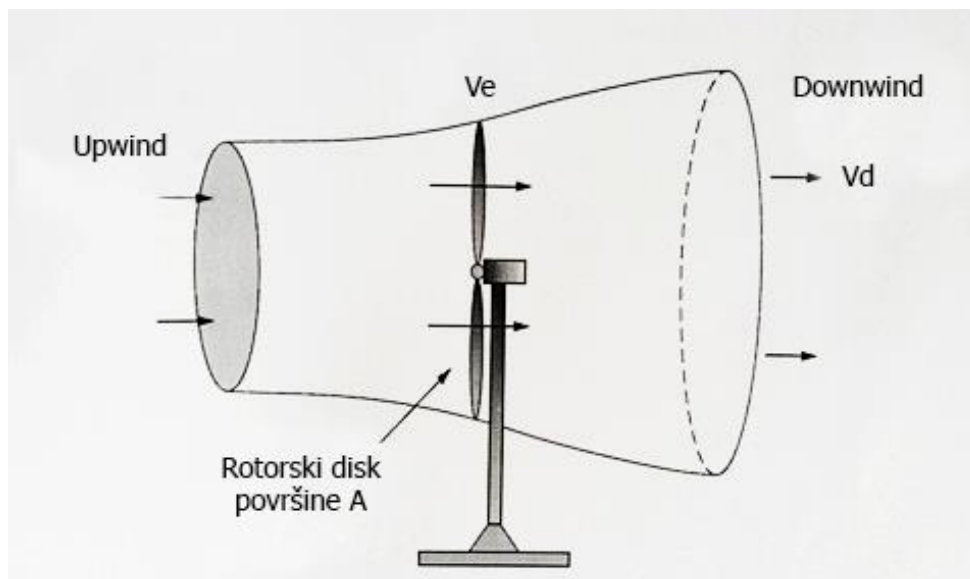
Sedma vežba, predstavlja nastavak šeste vežbe, u okviru koje će se vršiti ispitivanje strujne i karakteristike snage u zavisnosti od brzine vetra vetrogeneratora TPW 200W, dostupnog u laboratoriji za obnovljive izvore energije.

1. Maksimalni stepen iskorišćenja

Sve tehnologije koje pretvaraju jedan oblik energije u drugi imaju fundamentalna ograničenja po pitanju maksimalno moguće efikasnosti u konverziji. Vetrogenerator pretvara kinetičku energiju vetra u električnu energiju i njegova snaga najčešće zavisi od interakcije između vetra i rotora. Zapravo, maksimalni stepen iskorišćenja vetrogeneratora u realnom radu zavisi od aerodinamike elisa rotora, njihovog broja, interakcije između elisa i vetra, interakcije između samih elisa, ugla pod kojim vetar nailazi na rotorski disk, turbulencije vetra, trenja vazduha, razlike u naprezanju elisa u najvišoj i najnižoj tački rotorskog diska, mehaničkih gubitaka prilikom redukovanja brzine generatora, električnih gubitaka u namotajima generatora, gubicima u energetskej elektronici itd.

2. Becov (Betzov) limit

Kada vetar prilazi rotoskom disku on usporava dok mu deo kinetičke energije biva oduzet od strane rotora i pretvoren u mehaničku energiju. Vetar koji napušta rotorski disk ima manju brzinu i pritisak mu je snižen što uzrokuje da se vazduh iza rotora širi (slika 1). Nikada rotor ne može oduzeti svu kinetičku energiju vetra, jer bi to uzrokovalo da vetar iza rotora nema nikakvu brzinu što posledično znači da se protok vazduha preko rotorskog diska nikada ne bi ostvario.



Slika 1: Protok vazduha preko rotorskog diska

Sa slike 1 se jasno vidi kako se formira vazdušni levak ispred i iza rotora vetrogeneratora. Prema zakonu o održanju mase sledi da je protok mase vazduha u svakoj tački ovog vazdušnog levka isti pa se može reći da je energija koju je rotor oduzeo vetru zapravo razlika u brzinama nadolazećeg (Upwind - v) i odlazećeg (Downwind - v_d) vetra:

$$E_e = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v^2 - v_d^2) \quad (1)$$

Brzina vetra na elisama rotora (rotorskom disku) je srednja vrednost brzine vetra neposredno ispred i iza rotora pa se iz jednakosti (1) može doći do izraza za snagu:

$$P_e = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot \left(\frac{v + v_d}{2} \right) \cdot (v^2 - v_d^2) \quad (2)$$

Odnos između brzine vetra pre i posle rotora se može predstaviti kao:

$$a = \frac{v_d}{v} \quad (3)$$

Kombinovanjem izraza (2) i (3) dobija se:

$$P_e = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot (1 + a) \cdot (1 - a^2) \right] \quad (4)$$

Odavde se vidi da je snaga na elisama rotora jednaka proizvodu snage vetra ispred vetrogeneratora i izraza u velikoj zagradi koji se naziva Efikasnost rotora i obeležava se $C_{p, Betz}$. Da bi se dobila maksimalna efikasnost rotora pretpostavlja se da nema promene koeficijenta $C_{p, Betz}$ sa promenama u brzini vetra pa je:

$$\frac{dC_{p,Betz}}{da} = 0 \Rightarrow a = \frac{1}{3} \quad (5)$$

Dakle, maksimalna moguća efikasnost rotora vetrogeneratora je:

$$C_{p,Betz} = \left[\frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{3}\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{1}{3}\right)^2\right) \right] = \frac{16}{27} = 0.59259 = 59.26\% \quad (6)$$

3. Maksimalni stepen iskorišćenja realnog vetrogeneratora

Pokazano je da je maksimalni teorijski stepen iskorišćenja, koji se naziva i Becov (Betzov) limit 59.26%. Međutim, on se odnosi na idealni vetrogenerator, te se nameće pitanje koliko se realni vetrogenerator može približiti maksimalnom limitu iskorišćenja.

Za određenu brzinu vetra efikasnost rotora je direktno povezana sa ugaonom brzinom kojom se kreću njegove elise. Odnos između brzine vetra i ugaone brzine elisa je bezdimenzioni faktor koji se označava sa λ ili TSR (eng. tip speed ratio).

$$\lambda = \frac{2\pi r f}{v} \quad (7)$$

Gde je:

r - poluprečnik rotora u metrima,

f - frekvencija rotacije u Hz, broj obrtaja u sekundi,

v - brzina vetra u m/s.

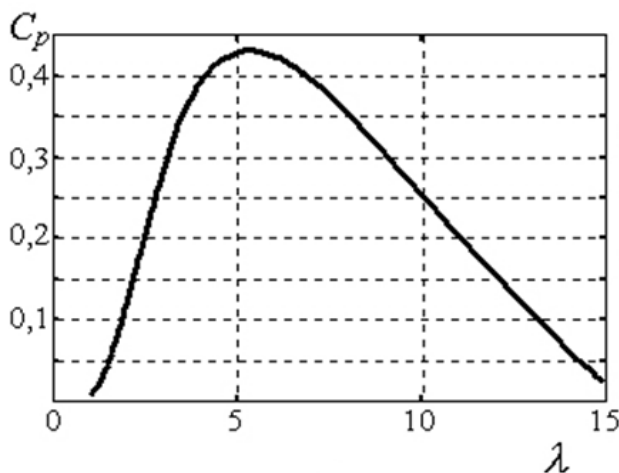
Ako se elise rotora kreću velikom ugaonom brzinom, onda će se rotorski disk postaviti prema vetru kao prepreka njegovom kretanju, pa neće biti dovoljnog protoka vazduha kroz disk da se izvrši konverzija energije. Sa druge strane, ako se elise kreću malom brzinom, onda će previše vetra proći kroz rotorski disk, a da uopšte ne stupi u reakciju sa elisama. Optimalni odnos brzine vetra i brzine rotora, pri kome se konvertuje najviše energije, karakterišu vreme koje je potrebno jednoj elisi da iz svog položaja pređe u položaj prethodne elise, i vreme koje je potrebno vetru da se posle izvršenog rada na rotoru vrati u svoje ravnotežno stanje, prvenstveno da povрати brzinu koju je imao ispred vetrogeneratora. Optimalni odnos se javlja kada su ova dva vremena približno jednaka. Za vetrogenerator sa n brojem elisa optimalni odnos je:

$$\lambda_{opt} = \frac{4\pi}{n} \quad (8)$$

Ovi faktori (λ i λ_{opt}) se koriste prilikom izračunavanja gubitaka nastalih zbog nesavršenosti elisa, aerodinamičkih sila itd. Može se zaključiti da za neku određenu brzinu vetra postoji optimalna brzina obrtanja rotora pri kojoj je stepen iskorišćenja maksimalan, odnosno:

$$C_{p,max} \Rightarrow \lambda = \lambda_{opt} \quad (9)$$

Kod realnih vetrogeneratora stepen iskorišćenja se kreće između 40% - 45%, ali se uz pažljivo konstruisane elise rotora ovaj koeficijent može povećati (slika 2).



Slika 2: Stepen iskorišćenja

4. Strujna i karakteristika snage u odnosu na brzinu vetra

Najbitnije karakteristike malih vetrogeneratora su strujna i karakteristika snage u zavisnosti od brzine vetra. Laboratorija ne poseduje aero tunel, pa je i direktno merenje brzine vetra nemoguće. Međutim, kako se meri broj obrtaja motor-vetrogenerator grupe koristeći karakteristike dostupne od proizvođača i izmerene vrednosti, može se proceniti brzina vetra sa malim odstupanjima.

Sa nazivne pločice vetrogeneratora može se očitati da se maksimalna struja proizvodnje javlja pri brzini vetra od 16 m/s. Ako sa n označimo broj obrtaja u minuti imamo jednakost:

$$n = 60f \quad (10)$$

gde je:

f – broj obrtaja vetrogeneratora u sekundi.

Zamenom izraza (10) u (7) dobija se:

$$\lambda = \frac{2\pi nr}{60v} \quad (11)$$

Kako λ nije konstantna vrednost već se menja sa promenom brzine vetra, za svaki vetrogenerator se izrađuje tabela sa karakterističnim vrednostima λ u odnosu na brzinu vetra. U tabeli 1 je prikazana ova karakteristika za vetrogenerator TPW 200W.

Tabela 1: Koeficijent λ za vetrogenerator TPW 200W

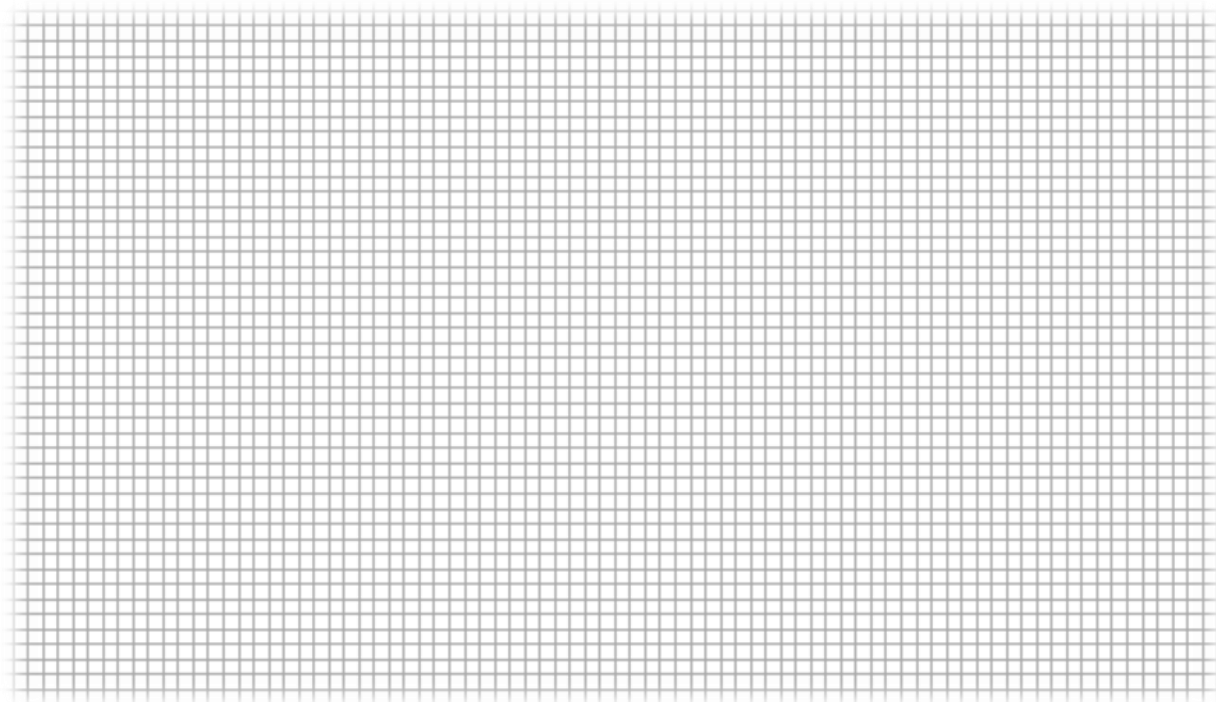
BRZINA VETRA [m/s]	λ
3.34	1.08
3.95	1.08
4.9	1.08
5.4	1.65
5.74	1.77
6.95	1.94
9.166	1.75
11.78	1.5
13.84	1.35
16.47	1.17
17.05	1.15
17.6	1.12
20.3	0.98
24.42	0.85
26.73	0.82
31.78	0.72

ZADACI

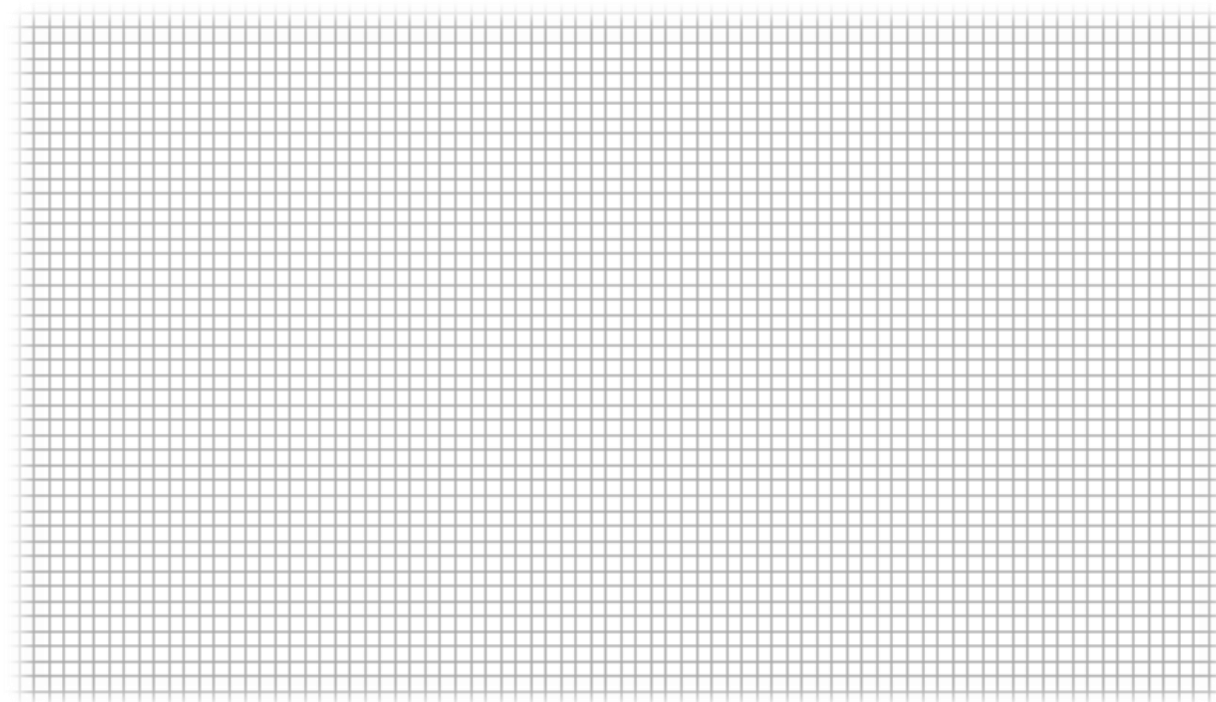
Popuniti tabelu 2. Na grafiku 1 prikazati strujnu karakteristiku vetrogeneratora TPW 200W, a na grafiku 2 karakteristiku snage u funkciji brzine vetra.

Tabela 2: Prikaz napona, struje i snage VG TPW 200W u zavisnosti od učestanosti napajanja motora

Učestanost napona statora elektromotora [Hz]	Broj obrtaja osovine motor- generator grupe [ob/min]	Brzina vetra [m/s]	Napon vetrogeneratora [V]	Struja vetrogeneratora [A]	Snaga vetrogeneratora [W]



Grafik 1.: Strujna karakteristika TPW 200W



Grafik 2.: Karakteristika snage TPW 200W

OCENA		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Vežba 8

UPOTREBA SOFTVERSKOG ALATA SAM (SYSTEM ADVISOR MODEL) U PROJEKTOVANJU VETROELEKTRANA

- ☐ **Softverski alat SAM**
- ☐ **Izbor resursa vetra**
- ☐ **Izbor tipa vetroturbine**
- ☐ **Izgled vetroelektrane**
- ☐ **Rezultati simulacije**
- ☐ **Upotreba softverskog alata SAM u modelovanju vetroelektrane na teritoriji Republike Srbije**

Datum: _____

Pregledao: _____

Predmet vežbe

U okviru ove vežbe studenti vrše predviđanje proizvedene električne energije i izvode tehno-ekonomske analize za vetroelektrane povezane na distributivni sistem pomoću softverskog alata SAM (System Advisor Model), koji je specijalizovan za projektovanje distribuiranih sistema na obnovljive izvore energije, kao i hibridnih sistema. Specijalizovani softverski alati za projektovanje vetroelektrana su dosta skupi, i koriste se u komercijalne svrhe. Cilj vežbe je da se upotrebom softverskog alata SAM studenti obuču, a takođe i primene stečeno znanje iz oblasti vetroenergetike. Takođe, potrebno je da steknu uvid u osnovne veličine od kojih zavisi proizvedena električna energija iz energije vetra.

Zahtevani ulazni podaci softverskog alata SAM pri modelovanju vetroelektrane (dalje u tekstu koristiće se skraćenica VE) su: informacije o vetroresursu za konkretnu lokaciju i odabir tipa generatora u sklopu vetroturbine. Softverski alat SAM ima značajnu ulogu u odlučivanju optimalnog rešenja vetroelektrane u odnosu na konfiguraciju terena. Korisnik zadaje ulazne podatke u skladu sa fizičkim karakteristikama i finansijskim parametrima vetroelektrane.

Sve ulazne promenljive se popunjavaju standardnim vrednostima tako da se mogu generisati rezultati i pre nego što se sakupe svi relevantni podaci za konkretan projekat. Nakon odabira ulaznih podataka može se pokrenuti simulacija i mogu se generisati podaci proizvedene električne energije po satu za period od jedne godine. Finansijski model koristi izračunatu električnu energiju po satima i ulazne podatke konkretnog projekta kao što su instalacioni i operativni troškovi, cena električne energije, porezi, podsticaji i parametri duga da bi se proračunali tokovi novca projekta na više godina. Softverski alat SAM izlazne podatke prikazuje tabelarno i grafički.

Softverski alat SAM može da modeluje distribuirane i centralizovane sisteme proizvodnje električne energije. Stambeni modeli su za distributivne sisteme koji kupuju i prodaju električnu energiju po maloprodajnim cenama, i koriste obnovljive izvore energije kao dopunu energije iz mreže za napajanje zgrada i objekata. Komercijalni finansijski model je za centralizovane sisteme proizvodnje električne energije koju sistem proizvodi po ceni koja je definisana ugovorom.

Korišćenje softverskog alata SAM biće prikazano na primeru dve vetroelektrane koje se sastoje od tri/četiri vetrogeneratorske jedinice, ukupne instalisane snage od oko 10 MW. Cilj dve vetroelektrane je poređenje finansijskog modela obe, sa ciljem da se prikaže razlika u količini

novca koji je potreban za izgradnju vetroelektrana u zavisnosti od broja i tipa turbina iste ukupne instalisane snage vetroelektrana. Ulazni podaci za vetroresurs biće birani tako da budu što bliskiji klimatskim uslovima koji su u Deliblatskoj peščari, da bi se prikazalo koliko je softverski alat SAM upotrebljiv na području Republike Srbije.

Deliblatska peščara je izabrana zbog izuzetnog vetropotencijala, pristupačnosti dopremanja elemenata vetroelektrane, niskog kerauničkog nivoa i sl. Srednja godišnja brzina vetra za region Deliblatske peščare je 6 m/s, što predstavlja vrednost koja je veoma iskoristiva pri proizvodnji električne energije iz energije vetra.

1. Softverski alat SAM

Model vetroelektrane koji se formira pomoću softverskog alata SAM namenjen je za analizu izvodljivosti projekta. Formiran model vetroelektrane pomoću softverskog alata SAM može da obezbedi preliminaru procenu očekivane proizvodnje električne energije po satu i faktor kapaciteta na vremenskom intervalu od jedne godine za jednu vetroturbinu, malu vetroelektranu ili veliku farmu vetroturbina. Finansijski model koristi sumu (zbir) vrednosti po satima kao procenu proizvodnje električne energije za dati projekat u prvoj godini i proširuje procenu za period od nekoliko godina da bi izračunao pokazatelje kao što su prosečni troškovi električne energije, sadašnju neto vrednost projekta, cenu sporazuma kupovine električne energije (PPA) i internu stopu povraćaja za projekte i period otplate za stambene i komercijalne projekte distribuiranih izvora energije.

Softverski alat SAM prilikom modelovanja vetroelektrane zahteva informaciju koja opisuje resurse vetra na projektnoj lokaciji, set ulaznih podataka koji opisuju karakteristike vetroturbine, i ulazne podatke koji opisuju izgled vetroelektrana za projekte koji imaju više od jedne vetroturbine. Kvalitet ili tačnost ulaznih rezultata modela zavise od kvaliteta odnosno tačnosti ulaznih podataka.

Softverski alat SAM vrši modelovanje vetroelektrane jednostavnim algoritmom koji se sastoji od 4 osnovna koraka:

Korak 1: Okarakterisati resurse vetra: Model za snagu vetra koristi satne podatke o vetru ili podatke definisane kao Weibulova raspodela.

Korak 2: Odrediti krivu (grafik) snage vetroturbine: Softverski alat SAM modeluje performanse vetroturbine koristeći krivu snage vetroturbine, koristeći snagu koju je korisnik definisao ili koju softverski alat sadrži u bazi podataka na osnovu odabrane vetroturbine.

Korak 3: Definirati izgled vetroelektrane: VE je prikazana kao dvodimenzionalni niz koordinata za svaku lokaciju turbine posebno sa dodatnim podacima koji se koriste za proračun gubitaka snage vetra.

Korak 4: Izračunati proizvedenu električnu energiju VE: Softverski alat SAM ima mogućnost izračunavanja proizvedene električne energije sistema za svaki od 8760 časova u godini. Softverski alat SAM prikazuje vrednosti po satu na stranici za rezultate uz mesečne i godišnje tabele i grafikone koji se mogu koristiti i u drugim aplikacijama.

2. Izbor resursa vetra

Podaci o resursima vetra pružaju informaciju o kinetičkoj energiji vetra na konkretnoj lokaciji i visini vetroturbine. Proizvedena električna energija u najvećoj meri zavisi od brzine i pravca prostiranja vetra, gustine vazduha i varira sa vremenom.

Iako softverski alat SAM uzima u obzir efekat zavetrine („wake efekat“), ostali specijalizovani softveri za projektovanje VE uzimaju detaljnije u obzir konfiguraciju terena i raspored vetrogeneratorskih jedinica, što nije slučaj kod ovog softverskog alata. Softverski alat SAM koristi kao ulazne podatke fajlove u više formata kao što su TMY2, TMY3, EPW (EnergyPlus weather data) i SRW.

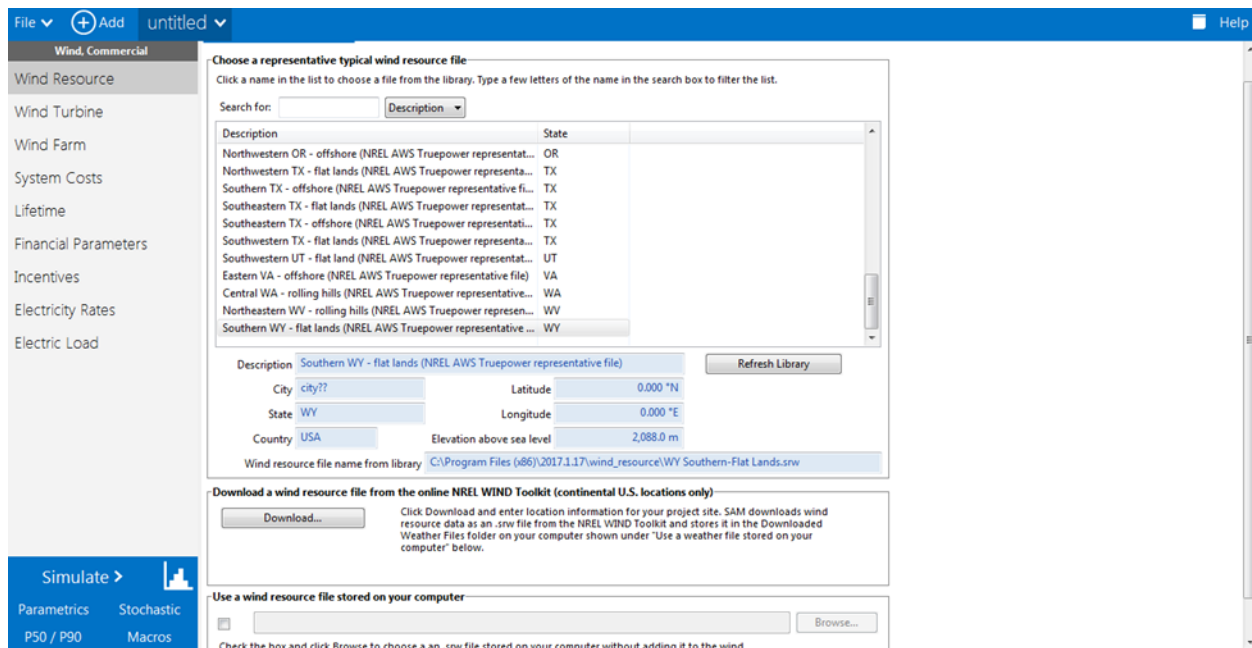
U softverskom alatu SAM se za modelovanje vetroelektrana i vetroenergije koristi SRW format. Ovaj format sadrži podatke o temperaturi [°C], pritisku [atm], pravcu prostiranja vetra [°] i brzini vetra [m/s] na 50, 80, 110 i 140 metara iznad površine zemlje za određenu lokaciju na satnom nivou za vremenski period od jedne godine.

Prilikom kreiranja modela, moguće je izabrati jedan od nekoliko ponuđenih SRW fajlova, koji su napravljeni na području Sjedinjenih Američkih Država. Vršena su merenja po satima u periodu od jedne godine, podaci su objedinjeni u jedan fajl, i softverski alat ih može koristiti za izračunavanje traženih podataka.

Moguće je, kroz softverski alat, preko grafikona i tabela imati uvid u brzine vetra, na dnevnom, mesečnom i godišnjem nivou, takođe i za pritisak, temperaturu i pravac prostiranja

vetra, što nije loše za poređenje sa nekim podacima koje poseduje projektant radi izbora resursa vetra iz baze podataka softverskog alata.

Ukoliko je u mogućnosti, projektant može da ubaci u bazu podataka softverskog alata i svoj SRW fajl ukoliko ga poseduje. Za bilo koju lokaciju na planeti Zemlji, kao što je već pomenuto, u osnovnoj bazi podataka softverskog alata SAM postoje podaci samo za područje Sjedinjenih Američkih Država. Takođe je moguće i skinuti neke fajlove sa Interneta. Na slici 1 je prikazan prozor u kome se može izabrati vetroresurs, ili se ubaciti podaci novog srw fajla, ukoliko je odgovarajućeg formata.



Slika 1: Prozor za izbor tipa vetroresursa softverskog alata SAM

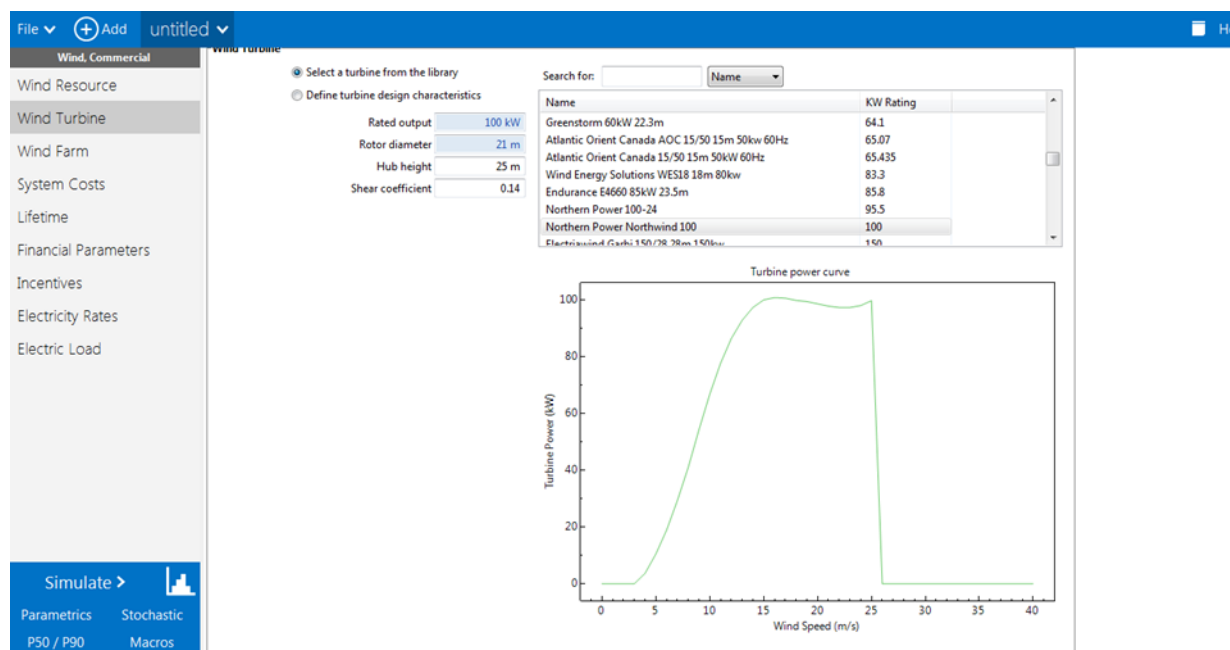
Kao što se vidi na slici 1, softverski alat je jednostavan za upotrebu, jednostavnim klikom na ponuđenu lokaciju izabira se resurs vetra, i svi podaci koje ona sadrži biće učitani u program.

Za teritoriju naše zemlje ne postoji takav tip podataka, odnosno SRW fajl, pa nije moguće sa preciznošću napraviti model i analizirati podatke.

3. Izbor tipa vetroturbine

Drugi korak u kreiranju modela u softverskom alatu SAM je izbor tipa vetroturbine. Biblioteka softverskog alata SAM sadrži preko 300 različitih tipova vetroturbina, različitih instalisanih snaga od 0.27 kW do 8 MW, i različitih proizvođača. U samom nazivu turbine,

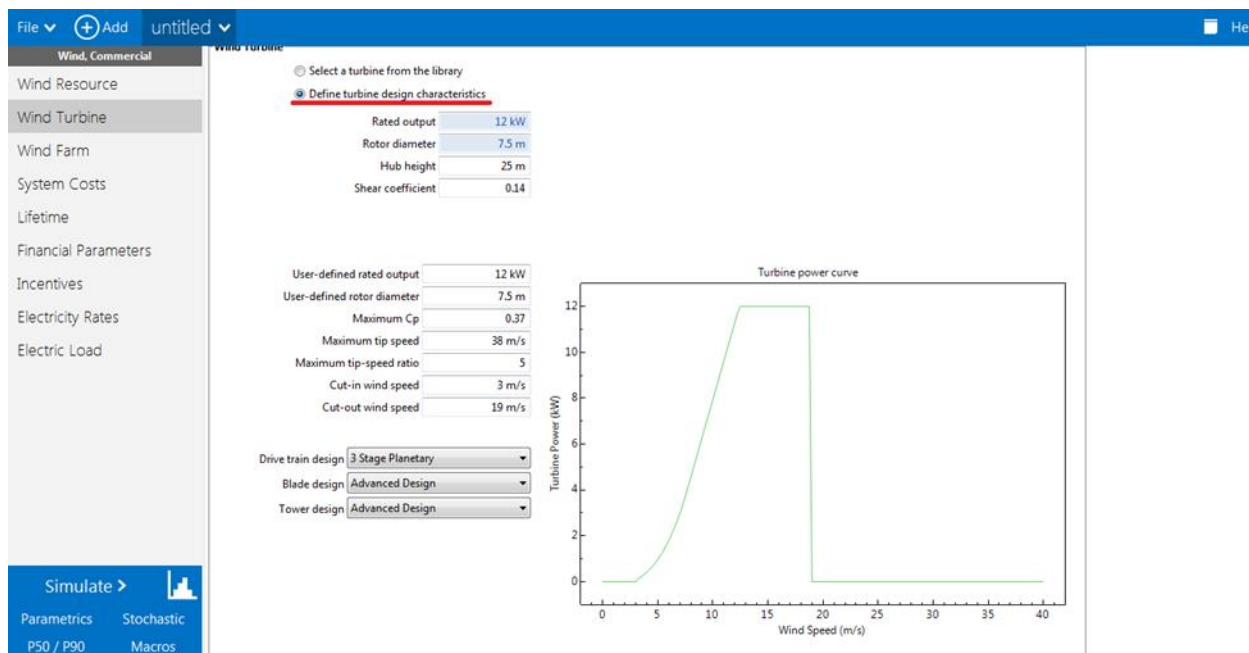
prikazuje se podatak o dijimetru lopatica turbine, npr. SENVION 3.2 MW-114. Kao što se može videti, pored imena kompanije, dobija se podatak o instalisanoj snazi generatora i o dijimetru lopatica vetroturbine. Na slici 2 je prikazan prozor koji se odnosi na izbor tipa turbine.



Slika 2: Izbor tipa turbine

U padajućem meniju se nalaze sve turbine koje su u bazi podataka softverskog alata SAM. Kada odabere odgovarajuću turbinu, korisnik, mora da unese visinu stuba (hub height) ili će mu u suprotnom, kada pokrene simulaciju na ovom prozoru izaći obaveštenje crvenim slovima da visina stuba nije dovoljna za ovaj tip turbine. Jedna od dobrih osobina softverskog alata SAM, je ta da sve što nije adekvatno popunjeno ili izabrano, uzrokuje ispisivanje crvenim slovima u vidu opomene korisnika za ispravak.

Ukoliko korisnik (projektant) ima potrebu za nekim tipom turbine koji se ne nalazi u bazi podataka, softverski alat SAM mu nudi mogućnost da sam kreira turbinu po svojoj želji. U gornjem levom uglu ovog prozora, potrebno je kliknuti na dugme “Define turbine desing characteristics”. Dijalog konkretnog prozora je prikazan na slici 3.



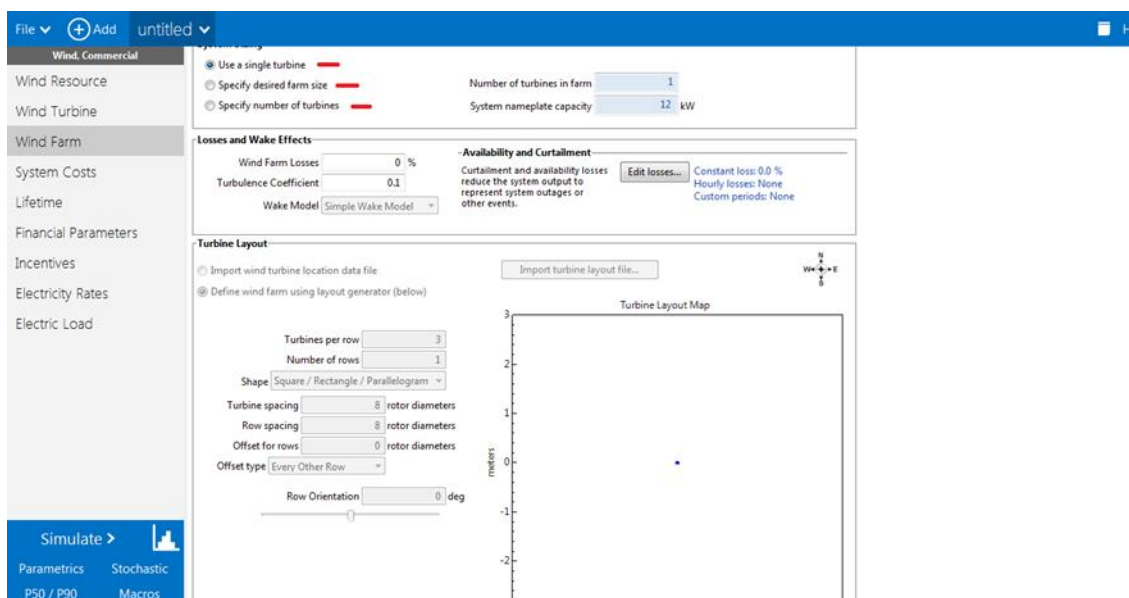
Slika 3: Formiranje sopstvenog tipa turbine

Odabirom ove opcije, korisnik otvara nov prozor u kome se pojavljuju osnovni parametri koji definišu vetroturbinu. Ispunjavanjem potrebnih polja unose se karakteristike turbine i program prikazuje dijagram snage u zavisnosti od brzine vetra za konkretnu vetroturbinu (slika 3). Softverski alat SAM ne nudi dugme za potvrdu odabranih parametara ili unetih podataka, već se jednostavno prelazi na sledeći korak u levom delu ekrana gde se nalaze podmeniji.

4. Izgled vetroelektrane

Naredni korak je definisanje izgleda vetroelektrane. VE je prikazana kao dvodimenzionalni niz koordinata za svaku lokaciju turbine posebno sa dodatnim podacima koji se koriste za proračun gubitaka snage vetra.

Pošto program ne nudi mogućnost unošenja podataka o reljefu mikrolokacije gde želimo da gradimo vetroelektranu, nije nam od velikog značaja fizičko postavljanje vetroagregata jedan u odnosu na drugi. Na slici 4 je prikazan prozor izgleda prostornog rasporeda vetroturbina u okviru vetroelektrane.



Slika 4: Modelovanje izgleda vetroelektrane

Moguće je uneti snagu celokupne vetroelektrane, i na osnovu izabrane vetroturbine softverski alat SAM prikazuje optimalan raspored i broj vetroturbina. Druga mogućnost je da korisnik predloži željeni broj turbina. Posle unosa željenog broja vetroturbina u odgovarajuće polje, softverski alat SAM prikazuje u polju za instalisanu snagu zbir instalisanih snaga svih vetroturbina, odnosno ukupnu instalisanu snagu vetroelektrane.

Pored parametara koji su u vezi sa instalisanom snagom, možemo definisati i koliko će vetroturbine biti udaljene jedna od druge. Udaljenost vetroturbina jedne od druge se prikazuje u odnosu na prečnik rotora (engl. rotor diameter). Takođe, u odgovarajuća polja se unosi broj redova i kolona, ukoliko se radi o velikim vetroelektranama. Vetroelektrana, tačnije redovi mogu biti prostorno raspoređeni u obliku trougla ili kvadrata. Ako korisnik izabere oblik trougla, u svakom sledećem redu će biti po dve više vetroturbine. To je povoljniji raspored ukoliko se u obzir uzme efekat zavetrine (engl. wake model).

5. Rezultati simulacije

Poslednji korak u kreiranju modela je pokretanje simulacije, gde softverski alat SAM obrađuje unete podatke i proračunava karakteristične veličine za konkretnu vetroelektranu.

Koristeći podatke o vetroresursu, koje preuzima iz SRW fajla, softverski alat SAM kao rezultat daje podatke o električnoj energiji po satu za period od jedne godine.

Sve rezultate korisnik može analizirati tabelarno ili preko grafikona. Procena proizvedene električne energije se može prikazati na dnevnom, mesečnom i godišnjem nivou. Takođe, svi ulazni podaci, brzina vetra, pravac prostiranja vetra, temperatura i pritisak se mogu prikazati grafički. Postoje opcije koje omogućavaju poređenje dva ili više parametara. Od velikog značaja je poređenje, tj. uočavanje zavisnosti brzine vetra u odnosu na proizvedenu električnu energiju.

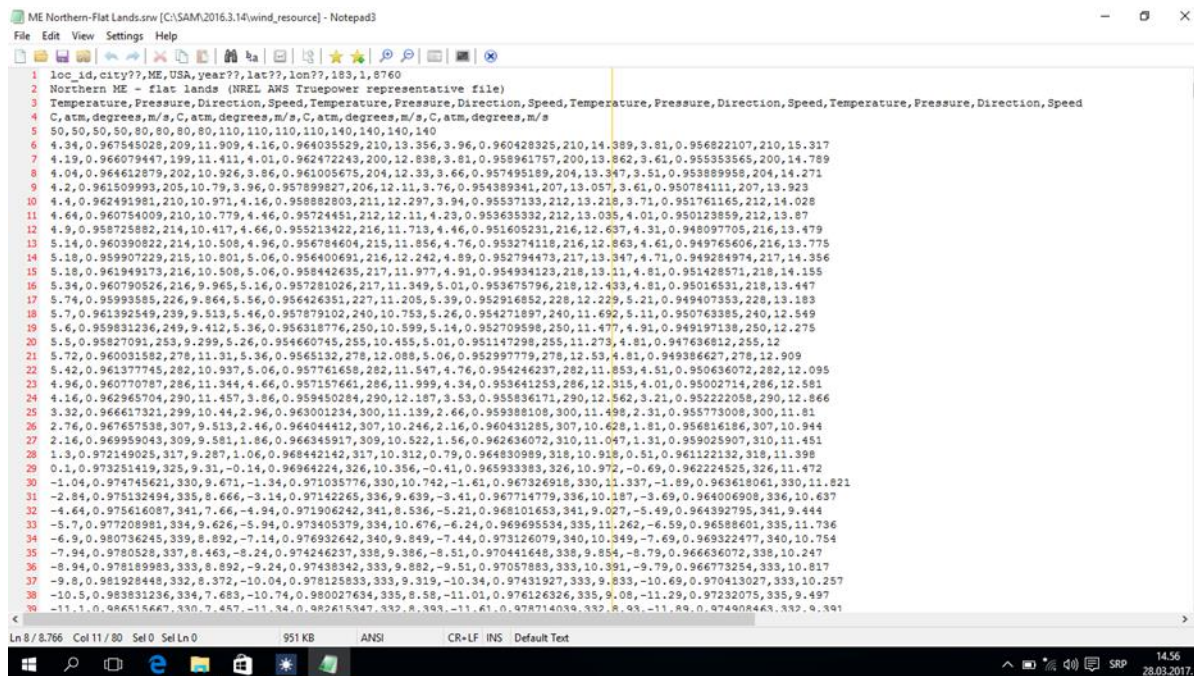
6. Upotreba softverskog alata SAM u modelovanju vetroelektrane na teritoriji Republike Srbije

Podaci za karakteristične parameter u vidu srw fajla za Republiku Srbiju u ovom formatu u softverskom alatu SAM ne postoje. Svi podaci koje softver ima u svojoj bazi podataka SRW fajlova su važeći za konkretne lokacije na teritoriji SAD. SRW fajl je dizajniran da bude dovoljno fleksibilan da dozvoljava kreiranja fajlova sa sopstvenim podacima u Notepad.

U bazi podataka softverskog alata SAM biće izabrana lokacija sa najpribližnijim osobinama području Deliblatske peščare. Podaci koji će se porediti su: nadmorska visina, geografska širina, teren (koeficijent hrapavosti), prosečna brzina vetra na 50 ili 80 metara, pravac prostiranja vetra, temperatura vazduha. Ova vrsta podataka će koja je dostupna za područje Republike Srbije biće poređena sa podacima koji se nalaze u bazi podataka softverskog alata, a koji su zabeleženi na 25 lokacija na teritoriji SAD.

Dostupni podaci o vetroresursu za konkretnu lokaciju u Republici Srbiji dostupni su u obliku meteoroloških godišnjaka hidrometeorološkog zavoda (RHMZ). To su podaci koji se nalaze u arhivi meteoroloških stanica u Srbiji, koje su umrežene i omogućavaju očitavanje podataka preko portala meteoplaneta. Podaci iz RHMZ sadrže podatke o brzini vetra merenih u 7, 14 i 21 čas odnosno tri puta za 24 časa (slika 6), dok SRW fajl sadrži podatke o brzini vetra na svakih sat vremena, drugim rečima 24 očitavanja za 24 časa, svakog dana u godini.

Na slici 5 je prikazan SRW fajl u softveru Notepad za konkretnu lokaciju u SAD, koji na svakih sat vremena prikazuje temperaturu, pritisak pravac i brzinu vetra na četiri različite visine i to: 50, 80, 110 i 140 metara.



Slika 5: Izgled SRW fajla za konkretnu lokaciju u SAD, Northern ME – flat lands (NREL AWS Truepower representative file)

Podaci su prikazani za 8760 sati po 12 podataka u nizu, kao što se može videti na slici 5. Podaci iz meteoroloških godišnjaka RHMZ pored toga što sadrže samo tri vrednosti za brzine vetra na dnevnom nivou i na jednoj visini od 10 metara sadrže i podatke o vazдушnom pritisku i temperaturi vazduha u 7, 14 i 21 čas. Pravac prostiranja vetra je prikazan u prikazu podataka SRW fajlom dat uglom prostiranja od 0° - 360° (npr. 250°), dok je u podacima meteoroloških godišnjaka pravac prostiranja vetra prikazan u dominantnom prahu vetra npr. W, N, SSE...

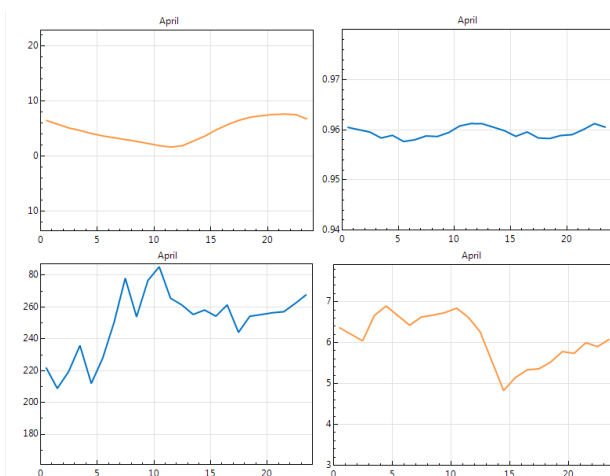
Na slici 6 je prikazan izgled prikaza podataka meteorološkog godišnjaka za 2016. godinu meteorološke stanice u Banatskim Karlovcima koja se nalazi u Deliblatskoj peščari.

БАНАТСКИ КАРПОВАЦ				ширина 45°03' дужина 21°02' висина 90m												2016																	
Месец	Вакuum притисак (mb)				Температура ваздуха (°C)												Екстрими																
	7	14	21	ср	мак	мин	мак	мин	мак	мин	5 cm	7	14	21	ср	мак	мин	мак	мин	мак	мин	мак	мин	мак	мин	мак	мин	мак	мин	мак	мин	мак	мин
1	1007,3	1006,7	1007,1	1007,0	4,5	-3,2	7,7	-4,4	-1,5	3,4	0,2	0,6	16,4	11	-12,5	23																	
2	1004,7	1004,4	1004,7	1004,6	12,5	3,9	8,6	2,9	5,2	10,8	7,2	7,6	20,4	22	-1,2	6																	
3	1002,9	1002,8	1003,1	1003,0	13,1	3,8	9,3	2,1	5,1	11,9	7,1	7,8	24,7	31	-2,0	25																	
4	1002,5	1001,8	1001,8	1002,0	21,2	8,3	12,9	6,3	12,0	20,0	13,5	14,8	30,6	17	2,5	27																	
5	1002,6	1001,9	1002,2	1002,2	22,9	11,0	12,0	9,1	14,7	21,6	15,6	16,9	30,7	29	4,5	17																	
6	1003,5	1002,6	1002,8	1003,0	28,0	16,4	11,6	15,0	20,4	26,8	20,1	21,9	34,5	23	8,0	8																	
7	1005,4	1004,9	1004,9	1005,1	29,7	15,8	13,9	14,9	21,0	28,2	20,3	22,5	34,5	13	10,0	8																	
8	1007,7	1007,2	1007,5	1007,5	27,8	15,0	12,8	13,8	18,5	26,4	19,1	20,8	32,2	29	8,1	13																	
9	1007,7	1007,1	1007,5	1007,5	26,2	11,7	14,5	10,1	14,5	25,0	15,9	17,8	32,5	12	4,4	23																	
10	1010,2	1010,0	1010,4	1010,2	15,3	6,3	9,1	5,0	7,7	14,5	9,4	10,3	28,0	2	-0,4	10																	
11	1008,8	1008,7	1009,1	1008,8	11,2	2,4	8,8	1,1	4,1	10,2	5,4	6,3	20,0	6	-5,3	30																	
12	1019,7	1019,4	1019,9	1019,7	3,2	-3,5	6,7	-4,9	-2,1	2,7	-1,0	-0,4	14,0	11	-8,0	31																	
год	1006,9	1006,5	1006,8	1006,7	18,0	7,3	10,6	5,9	10,0	16,8	11,1	12,2	34,5	6	-12,5	1																	
Месец	Напон водене паре (mb)				Релативна влажност (%)				Ветар (m/s)		Иско-лице (h)	Облачност у дооптокама				Падавине (mm)				Свег (cm)													
	7	14	21	ср	7	14	21	ср	мак	мин		ср	>=6	>=8	7	14	21	ср	сума	мак	мин	ср	У	Н									
1	5,5	6,9	6,2	6,2	93	82	93	89	57	3,8	10	0	73,7	6,9	7,0	7,0	35,1	7,5	12	2	2												
2	8,3	9,9	9,2	9,2	92	77	89	86	39	5,4	21	7	92,5	6,5	7,3	6,5	40,0	5,7	24	-	-												
3	8,5	8,9	9,0	8,8	95	85	89	83	34	3,0	6	1	152,2	6,0	6,4	5,1	5,8	70,6	23,2	7	-	-											
4	10,7	10,3	11,4	10,8	77	49	75	67	21	3,8	11	0	206,1	4,2	5,5	4,6	4,8	67,4	25,5	25	-	-											
5	14,7	14,3	15,2	14,7	87	56	85	76	34	2,8	11	0	235,0	5,5	6,0	5,1	5,5	105,8	25,2	31	-	-											
6	20,2	20,6	21,1	20,6	84	58	89	77	39	2,6	9	2	250,3	4,6	5,1	4,0	4,6	63,1	15,5	28	-	-											
7	19,5	18,1	19,8	19,1	78	48	83	70	30	2,4	7	0	336,1	2,3	3,6	1,7	2,6	63,2	47,7	16	-	-											
8	18,9	18,4	19,8	19,0	88	55	89	77	32	1,9	6	1	289,5	3,5	4,2	3,7	3,8	146,7	48,1	2	-	-											
9	15,6	14,0	16,2	15,2	92	45	88	75	30	1,7	5	0	208,4	3,6	5,0	3,4	4,0	42,5	17,1	6	-	-											
10	10,0	10,1	10,5	10,2	92	62	88	81	34	-	11	0	114,7	5,4	7,1	5,2	5,9	71,3	24,7	13	-	-											
11	7,6	8,0	7,8	7,8	91	65	86	81	40	-	12	1	113,6	5,5	5,2	4,9	5,2	62,9	11,1	8	-	-											
12	5,0	5,4	5,3	5,2	93	74	92	86	43	2,4	6	0	75,8	6,6	5,9	5,7	6,1	5,3	3,3	26	3	1											
год	12,0	12,1	12,6	12,2	89	61	87	79	21	-	115	12	2147,9	5,0	5,7	4,7	5,2	773,9	48,1	8	2	0											
Месец	Б Р О Ј										П А Д А В И Н Е																						
	Тн	Тх	Тн	Тх	Тн	Тх	Тн	Тх	Тн	Тх	Облачност	Падавине	К	Сн	Су	Кр	По	С	Г	Грм	А	М	А	Сн									
1	4	8	18	0	0	0	4	17	17	9	0	9	8	0	0	0	0	0	1	6	15												
2	0	0	3	0	0	0	2	10	14	10	0	16	0	0	0	0	0	0	1	1	0												
3	0	0	4	0	0	0	4	8	14	11	2	14	0	0	0	0	0	0	0	1	0												
4	0	0	0	11	2	0	11	9	9	6	2	8	0	0	0	0	0	0	1	0	0												
5	0	0	0	8	3	0	6	9	17	9	4	18	0	0	0	0	0	0	4	0	0												
6	0	0	0	23	9	3	8	4	12	8	3	13	0	0	0	0	0	0	8	0	0												
7	0	0	0	28	18	1	16	1	8	3	1	9	0	0	0	0	0	0	3	0	0												
8	0	0	0	24	10	0	13	3	11	10	4	10	0	0	0	0	0	0	5	1	0												
9	0	0	0	17	8	0	10	2	6	4	3	8	0	0	0	0	0	0	2	0	0												
10	0	0	1	2	0	0	4	9	17	11	3	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0												
11	0	0	11	0	0	0	8	9	12	11	1	12	0	0	0	0	0	0	0	1	0												
12	0	8	27	0	0	0	7	13	4	2	0	3	4	1	0	3	0	0	0	4	1												
год	4	16	64	113	50	4	93	94	141	94	23	136	12	1	0	3	0	0	25	14	16												
Месец	Честине правца и средње брзине ветра (m/s)																С																
	ч	б	ч	б	ч	б	ч	б	ч	б	ч	б	ч	б	ч	б	ч	б	ч	б	ч	б	ч	б	ч	б	ч	б	ч	б	ч	б	
1	3	3,0	2	2,0	10	3,0	24	4,6	26	4,5	6	2,5	12	2,8	9	3,9	1																
2	4	2,3	1	2,0	8	5,6	32	8,4	13	4,8	9	3,6	8	3,8	9	4,8	3																
3	8	2,3	3	1,7	6	2,8	18	3,9	19	3,5	13	2,7	16	2,5	9	3,6	1																
4	4	2,3	1	2,0	3	3,7	13	4,6	20	4,5	10	3,9	21	3,2	18	3,7	0																
5	4	1,8	2	3,0	10	2,9	21	3,6	10	3,2	12	2,8	18	2,5	15	3,0	1																
6	6	2,5	5	2,8	8	2,3	20	3,0	9	2,8	11	2,7	17	2,5	14	2,6	0																
7	7	2,9	2	1,5	8	2,3	20	2,6	15	2,1	10	2,4	13	2,8	16	2,9	2																
8	8	1,8	6	1,7	6	1,8	14	2,3	7	1,7	10	1,5	17	2,4	20	2,8	5																
9	8	1,5	3	0,7	10	2,0	12	1,8	19	1,9	10	2,1	11	1,8	13	2,2	4																
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-																
12	12	2,1	5	1,4	5	1,6	13	2,1	7	2,9	9	3,0	18	3,5	19	3,1	5																
год	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

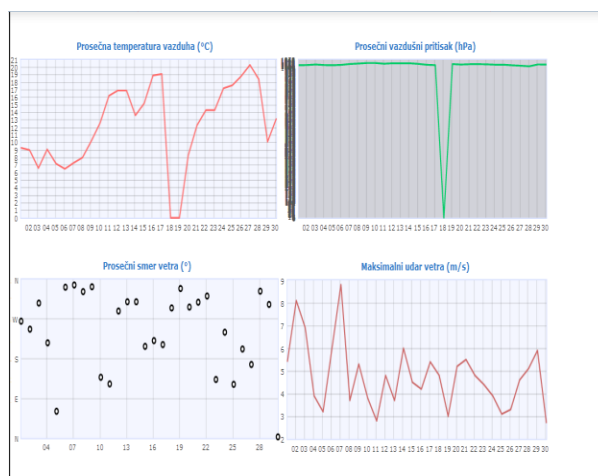
Slika 6: Izgled podataka iz meteorološkog godišnjaka RHMZ

Podaci koje sadrži meteorološki godišnjak nisu dostupni u digitalnom obliku, pa nisu korisni za kreiranje SRW fajla. Međutim, na portalu meteoplaneta, moguće je analizirati podatke putem grafikona, za sve četiri vrste podataka koji su neophodni da bi se formirao SRW fajl. Na sledećim slikama 7 i 8 je prikazano za mesec april kako izgledaju pravac, brzina, temperatura i pritisak vazduha za jednu od meteoroloških stanica u Srbiji i za konkretnu lokaciju u SAD koja će biti korišćena u konkretnom primeru i zadatku. Detaljnom analizom svih meseci pojedinačno

je i zaključeno da lokacija u saveznoj državi Mejn najviše odgovara području Deliblatske pešcare, pa je ona korišćena za dalje modelovanje vetroelektrane.



Slika 7: Podaci za mesec april iz softverskog alata SAM

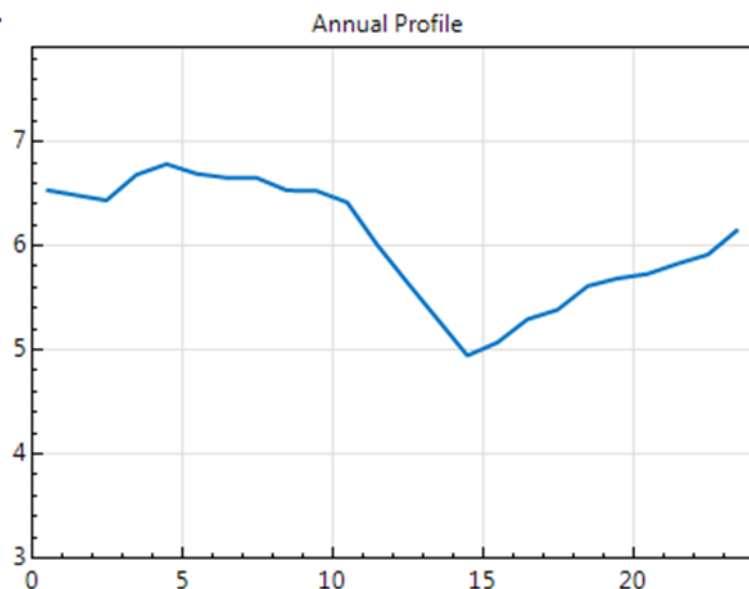


Slika 8: Podaci sa portala meteoplaneta za mesec april

Zbog svega izloženog zaključuje se da nije moguće formirati SRW fajl za konkretne lokacije meteoroloških stanica u Republici Srbiji pa je potrebno da se detaljnom analizom svih ponuđenih SRW fajlova, odnosno lokacija u bazi podataka softverskog alata SAM izdvoji lokacija sa najpribližnijim karakteristikama Deliblatskoj peščari. SRW fajl bi bilo moguće kreirati sa podacima koje poseduje automatska hidrometeorološka stanica u Pančevu. Ona podatke beleži na svakih 7 minuta, analizom i obradom tih podataka lako je moguće napraviti odgovarajući SRW fajl i modelovati vetroelektranu sa konkretnim podacima.

ZADACI

Posmatrajući meteorološku stanicu u Banatskim Karlovcima (Deliblatska peščara) sa portala meteoplaneta za 2016 godinu, mogu se analizirati podaci od značaja za procenu vetroresursa. Od najvećeg značaja su brzina i pravac prostiranja vetra. Uporednom analizom podataka sa portala meteoplaneta i podataka iz SRW fajla Northern ME – flat lands dolazi se do zaključka da je srednja brzina vetra približna na godišnjem nivou, što je dovoljno da bi se pristupilo daljem modelovanju vetroelektrane. Na slici 8 je prikazana zavisnost prosečne godišnje brzine vetra na dnevnom nivou.



Slika 8: Brzina vetra za konkretnu lokaciju u SAD, Northern ME – flat lands, na godišnjem nivou

Sa slike 8 se može videti da je prosečna godišnja brzina vetra procenjena na vrednost od 5 m/s do 6.8 m/s što je više nego dovoljno za iskorišćavanje vetroresursa za dobijanje električne energije. Prosečna brzina vetra na području Deliblatske peščare za period 2016. godine je iznosio 6 m/s.

Rezultati dobijeni merenjem u SRW fajlu su sa područja savezne američke države Mejn. Geografska širina je približna sa širinom Deliblatske peščare, nadmorska visina peščare je od 70 m do 190 m, a nadmorska visina na kojoj su vršena merenja za konkretnu lokaciju u SAD, Northern ME – flat lands je 183 m. O hrapavosti terena nema podataka, a sličnost koja je uočena je da se radi o ravničarskom području, tako da se aproksimira da je reč o sličnoj klasi hrapavosti terena.

Iz svega prethodno navedenog, može se zaključiti da su parametri slični i u zadacima će se koristiti podaci lokacije u SAD, Northern ME – flat lands kao podaci na lokaciji Deliblatske peščare.

Nakon odabira slične lokacije i konkretnog SRW fajla za Northern ME – flat lands pristupa se odabiru tipa vetroturbine. Biblioteka softverskog alata SAM sadrži preko 300 različitih tipova vetroturbina, različitih instalisanih snaga, proizvođača i dimenzija stuba i dijametara lopatica.

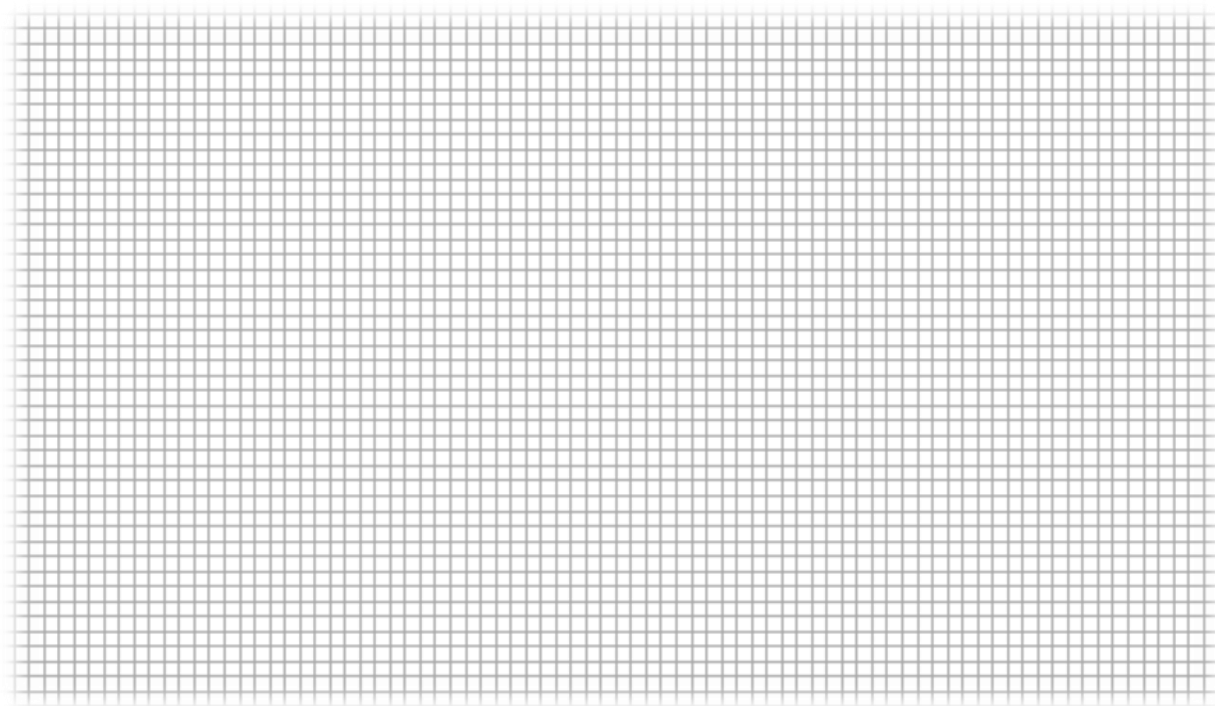
ZADATAK 1

Izabrati dve vetroturbine čiji će se investicioni troškovi upoređivati za vetroelektranu snage 10MW.

1. Koje vetroturbine ste izabrali i zašto baš te?

Odgovor :

2. Prikazati grafički, karakteristike izabranih vetroturbina.

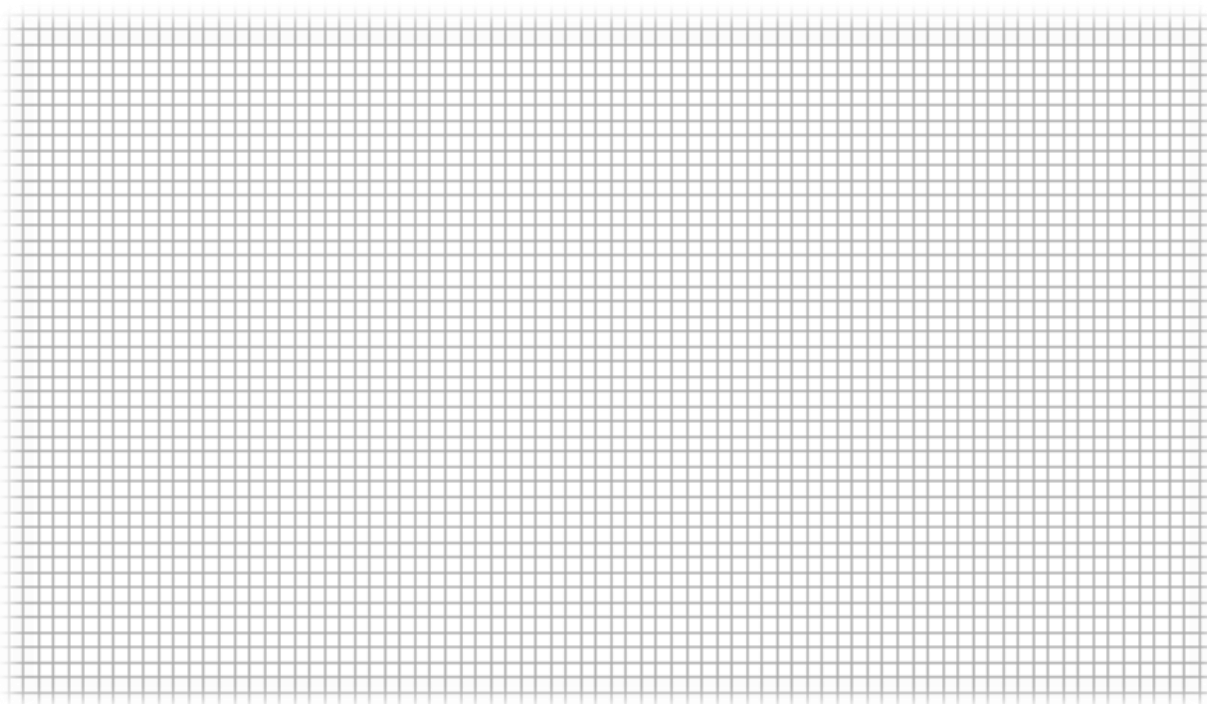


Grafik 1.: Karakteristike izabranih vetroturbina

3. Za vetroelektrano instalisane snage 10MW prikazati predloženi raspored vetroturbina za oba izabrana tipa.

Odgovor :

4. Prikazati grafički proizvedenu električnu energiju vetroelektrane sa prvom izabranom vetroturbinom (levo na grafiku) i sa drugom izabranom vetroturbinom (desno na grafiku).

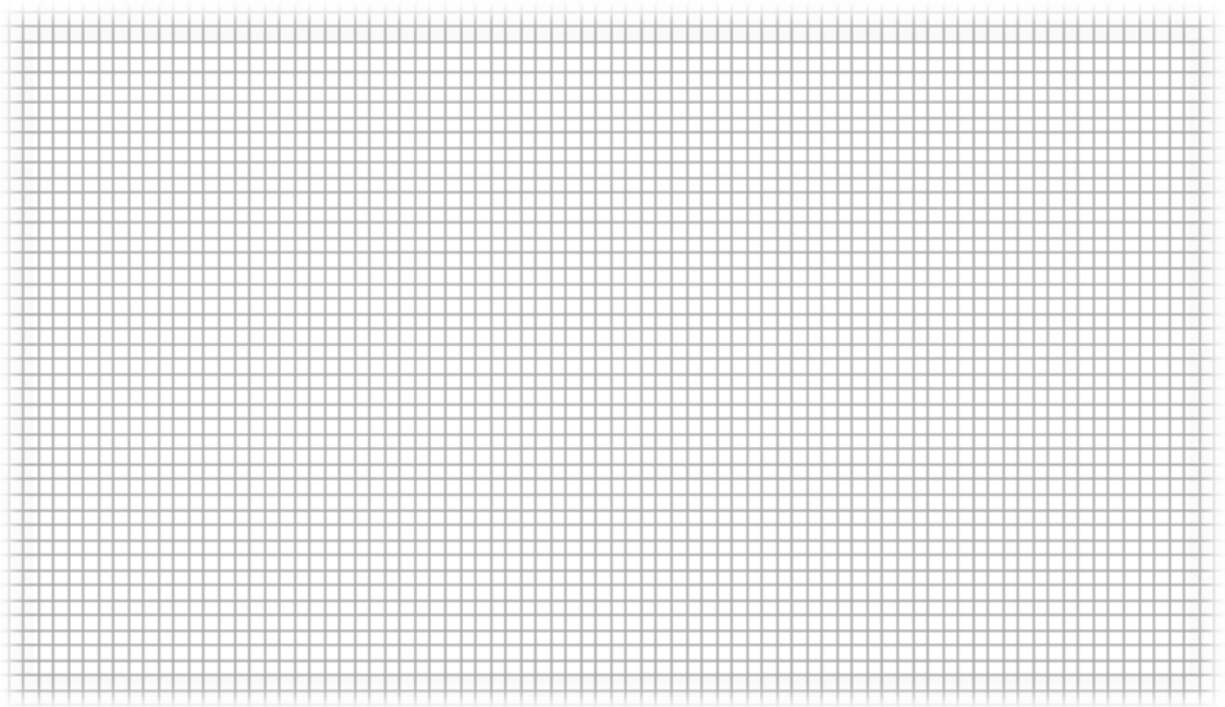


Grafik 2.: Proizvedena električna energija vetroelektrana

5. Koji se zaključak izvodi uporednom analizom ova dva grafika.

Odgovor :

6. Prikazati za jedan slobodno izabrani mesec u godini kako izgleda zavisnost generisane snage vetroelektrana i brzine vetra.



Grafik 3.: Prikaz zavisnosti generisane snage i brzine vetra

7. Koji se zaključak može izvesti na osnovu grafika 3?

Odgovor :

8. Softverski alat SAM ima mogućnost detaljnog proračuna instalacionih troškova, troškova održavanja, troškova otplate eventualnog kredita (kamatne stope iskazane na godišnjem nivou). Uporediti ove troškove za dve vetroelektrane (sa izabranim vetroturbinama) i izvesti zaključke.

Odgovor :

OCENA ZADATKA 1		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

Vežba 9

TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA MALE FOTONAPONSKE ELEKTRANE UPOTREBOM SOFTVERSKOG ALATA SAM (SYSTEM ADVISOR MODEL)

- ☐ **Konfiguracija sistema**
- ☐ **Simulacioni model**

Datum: _____

Pregledao: _____

Predmet vežbe

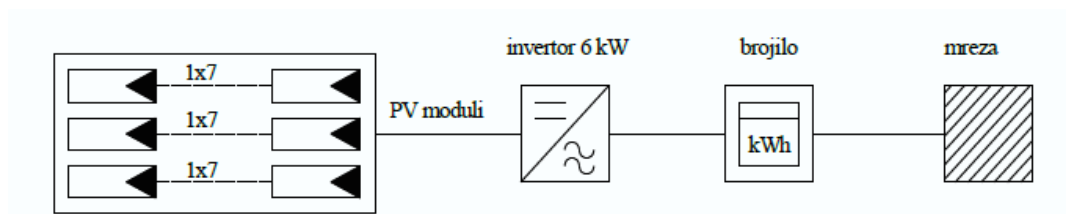
Predmet ove vežbe je tehno-ekonomska analiza male solarne elektrane snage oko 5 kW, priključene na mrežu. Cilj je da student ovladaju najvažnijim koracima u tehničkoj i ekonomskoj analizi – izračunavanje moguće godišnje proizvodnje, analiza osetljivosti, parametarska analiza, kao i izračunavanje ekonomskih pokazatelja – cene proizvedenog kilovatčasa, ukupnih troškova elektrane u toku životnog veka, vreme povraćaja kapitala, i sl. Za tehničku analizu koristi se dinamički model zasnovan na satnoj dinamici, a za ekonomsku – „Life Cycling Costs (LCC)“ metod - metod svođenja troškova na sadašnju vrednost.

Matematički modeli solarnih sistema, kao i principi planiranja, prikazani su u više knjiga i mnogim stručnim i naučnim radovima. Metodi za planiranje i projektovanje PV („PhotoVoltaic“) sistema u Republici Srbiji razvijaju se intenzivno, a takođe i svest o njihovom značaju.

U okviru ove vežbe analizira se PV (fotonaponski) sistem snage 5.249 kW, priključen na distributivnu mrežu. Tehnička analiza zasniva se na dinamičkoj simulaciji sa satnom dinamikom. Poznato je da takva simulacija, zasnovana na dugogodišnjim statističkim podacima, daje bolju prognozu godišnje proizvodnje nego često korišćeni grublji meteorološki parametri o srednjem broju sati sa sunčevom radijacijom u toku dana, na nekom području. Postoji više odgovarajućih softverskih alata za ovakve analize, kao što su TRNSYS, System Advisor Model (SAM) i HOMER. Za potrebe izvođenja ove vežbe izabran je softverski alat SAM zbog toga što je projektno orijentisan i besplatan. On sadrži matematičke modele elemenata koji su najbolji mogući u današnje vreme, a ekonomska analiza je zasnovana na dobro poznatom i utemeljenom metodu svođenja svih troškova na sadašnju vrednost, „Lyfe Cycling Costs (LCC)“ metodu. PV model koji se koristi u SAM-u je izvanredan De Sotov (De Soto) PV model. Pored toga, SAM koristi veoma dobar model invertora. Difuzni model zračenja znatno utiče na rezultate. SAM sadrži sve najmodernije modele, a u ovoj analizi koristi se jedan od njih, za koji se veruje da je najtačniji. To je poznati Perezov difuzni model (Perez).

1. Konfiguracija sistema

U okviru ove vežbe analizira se PV sistem snage 5.249 kW, priključen na distributivnu mrežu. Sistem je šematski prikazan na slici 1.

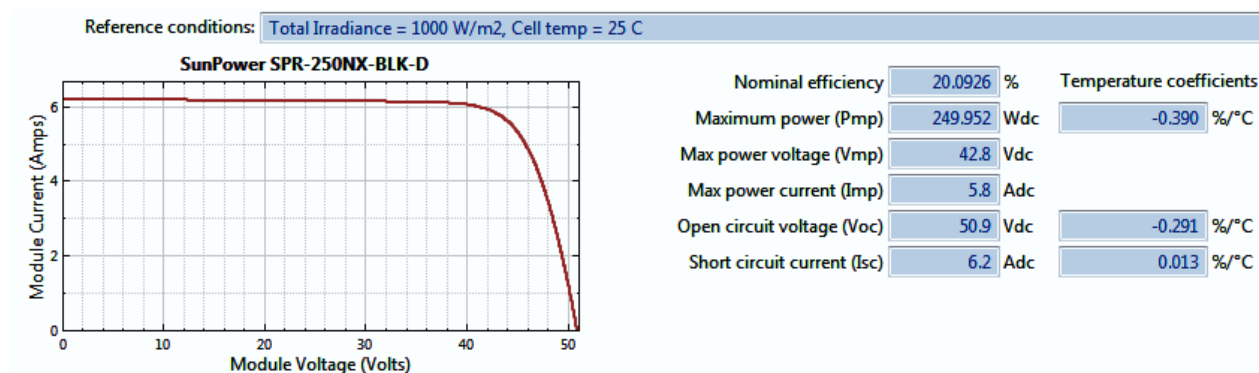


Slika 1: Konfiguracija PV sistema snage 5.249 kW

Za konfigurisanje sistema primenjuju se veoma korisna uputstva o usaglašavanju parametara invertora i niza modula, detaljno prikazanih u help-u softverskog alata SAM.

2. Simulacioni model

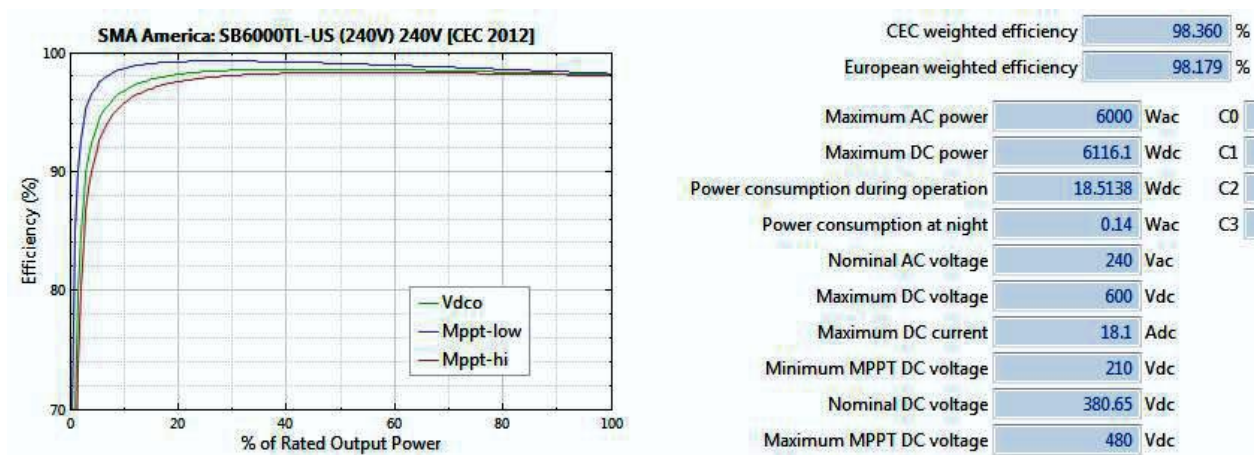
U ovoj vežbi PV modul je tipa SunPower SPR-250 NX-BLK-D. Slika 2 prikazuje PV karakteristike u obliku prikazanom u softverskom alatu SAM. Na slici su prikazani podaci, dobijeni merenjem u skladu sa P. Gilman, SAM Photovoltaic Model Technical Reference.



Slika 2: Karakteristike PV modula SunPower SPR-250 NX-BLK-D

Efikasnost ovog modula na bazi monokristalnog silicijuma je oko 20%, a maksimalna snaga pri solarnom zračenju od 1000 W/m² i temperaturi ćelija od 25°C iznosi $P_{mp}=249.952$ W. Površina jednog modula iznosi $S=1.244$ m². Ukupna površina svih modula je 21×1.244 m² = 26.1 m².

Podaci o invertoru i kriva stepena iskorišćenja prikazani su u samom softverskom alatu, na strani „Inverter“. Oni su prikazani na slici 3.



Slika 3: Kriva stepena iskorišćenja invertora i njegovi podaci

Podaci o invertoru izmereni su prema postupku prikazanom u Bower W. et al, Performance Test Protocol for Evaluating Inverters Used in Grid- Connected Photovoltaic Systems.

Troškovi PV sistema pretpostavljeni su na osnovu sličnih projekata. Pretpostavljeno je da postoji raspoloživa površina za postavljanje panela, da za nju nema troškova, i da nije potrebna njena adaptacija. Razlog za jednostavnost je da model služi u edukativne svrhe, a usložnjavanje problema ne bi donelo nove koristi za studente. Usvojeno je da paneli mogu da budu usmereni u bilo kom pravcu, kao i da nema objekata koji bi pravili senku na panelima. Inače, SAM ima efikasan modul za izračunavanje uticaja senki, bilo zbog obližnjih objekata, bilo kada nizovi prave senku jedan drugom.

Direktni troškovi dati su kao suma troškova za opremu, isporuku, montažu i povezivanje elemenata. Troškovi u SAM-u su u dolarima jer je softver prvenstveno namenjen američkim projektantima, sa tipičnim cenama koje na američkom tržištu važe u trenutku objavljivanja nove verzije SAM-a. U ovoj vežbi, troškovi su prilagođeni uslovima u Republici Srbiji.

Troškovi PV sistema, pretpostavljeni u ovoj analizi su:

- Direktni investicioni troškovi: paneli: 1.8 USD/Wdc,
- Invertor: 0,48 USD/Wac,
- Ostatak sistema (upravljački razvodni ormar, brojilo, provodnici, kablovi, pomoćna oprema, nosači panela, osigurači, prekidači): 0.4 USD/Wdc,
- Dozvole, studije ekološkog uticaja – fiksni trošak: 1600 USD,

- Indirektni investicioni troškovi: projektovanje: 500 USD,
- Pogonski troškovi i troškovi za održavanje: fiksni godišnji troškovi: 200 USD/god.

Porez na dobit (20% od ostvarenog prihoda) uzet je u obzir, dok su ostali troškovi mali i zanemareni su.

ZADACI

Ekonomsku analizu studenti će uraditi uz pretpostavku da nema raspoloživih novčanih sredstava za investiranje, već se uzima zajam od banke, sa kamatom od 6%. Takođe, pretpostavljeno je da se radi o privilegovanom proizvođaču, koji energiju prodaje operatoru sistema po povlašćenoj tarifi, u toku svih 20 godina. Ekonomski parametri u vezi sa finansiranjem dati su u nastavku.

Tarifa po kojoj proizvođač – vlasnik male solarne elektrane prodaje električnu energiju operatoru sistema je 0.28 USD/kWh. Studenti će analizirati uticaj tarife na ekonomske parametre, na primer, na vreme povraćaja kapitala.

Parametri vezani za zajam:

- Zajam se uzima za celokupan trošak (100%),
- Pozajmljeni novac vraća se u periodu od 10 godina,
- Kamata iznosi 6%/god.

Parametri vezani za analizu su:

- Analizirani period (trajanje projekta): 20 godina,
- Stopa inflacije: 2.5%/god.,
- Nominalna diskontna stopa: 8,65%/god,
- Takse i osiguranje: 0%, i
- Preostala vrednost: 0 USD.

U ovoj vežbi korišćeni su meteorološki podaci o globalnoj solarnoj radijaciji i o temperature u vidu epw fajla, koji u softverskom alatu SAM postoji za Beograd.

ZADATAK 1

Tehno-ekonomska analiza povezuje tehničke, ekonomske i meteorološke parametre. Softverski alat SAM daje rezultate – mesečne, godišnje i u obliku jedne vrednosti (tehničke, ekonomske i meteorološke). Prvi tehnički parametar je godišnja energija koju PV sistem prodaje operatoru sistema, koja predstavlja zbir proizvedenih energija po svakom satu. U vežbi treba pretpostaviti da, zbog starenja elemenata sistema, proizvodnja opada 0.5% godišnje. Pretpostavljeni gubici zbog nečistoće na panelima iznose 5%, ukupni gubici u DC delu sistema 4.44%, a 1% u AC delu sistema.

1. Koliko iznosi nominalna ukupna električna energija usled solarne radijacije (direktna i difuzna komponenta), u trenutku kada je upadni zrak normalan na površinu modula?

Odgovor :

2. Koliko iznosi proizvedena nominalna DC energija?

Odgovor :

3. Koliko iznosi ukupna DC energija, posle odbijanja DC gubitaka u nizu sa panelima, a koliko posle odbijanja AC gubitaka u invertoru i spojnim provodnicima?

Odgovor :

4. Koliko iznosi ukupna električna energija predata operatoru sistema u toku 20 godina?

Odgovor :

5. Koliko se električne energije proizvede po 1m^2 panela i zašto nam je taj podatak bitan?

Odgovor :

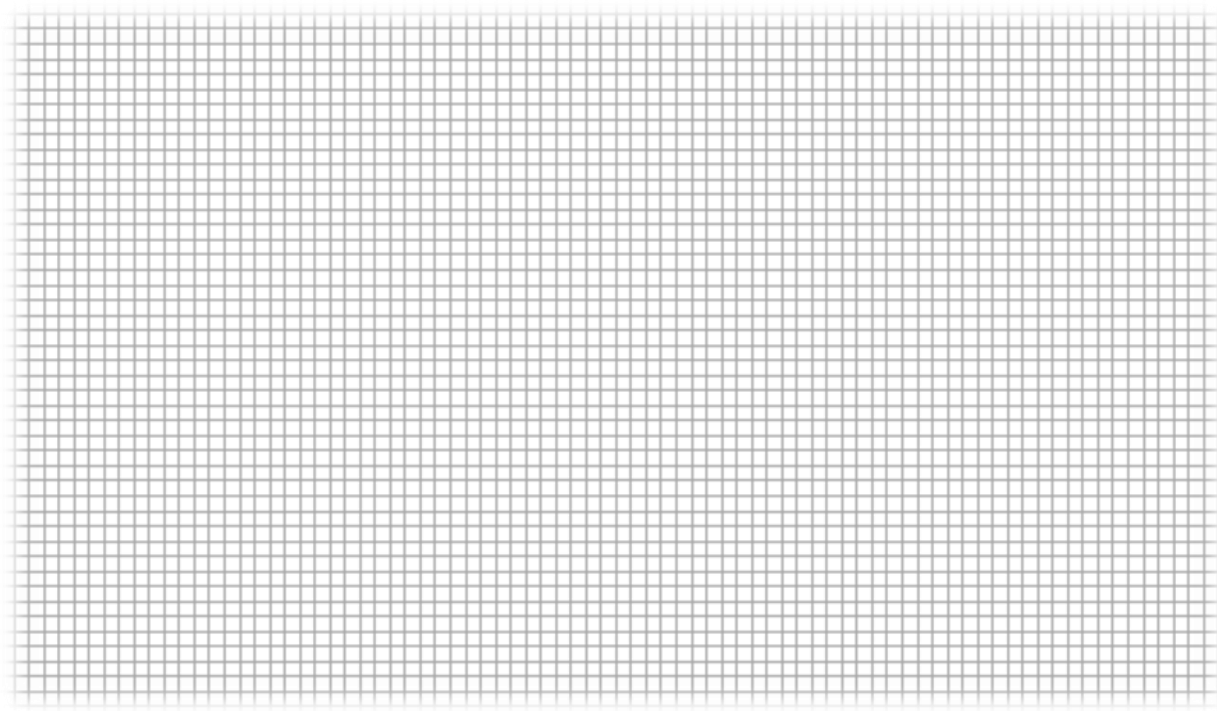
6. Šta je faktor kapaciteta (kako se računa) i koliko iznosi?

Odgovor :

7. Šta pokazuje faktor koji je nazvan na engleskom „First year kWhAC/kWDC“?

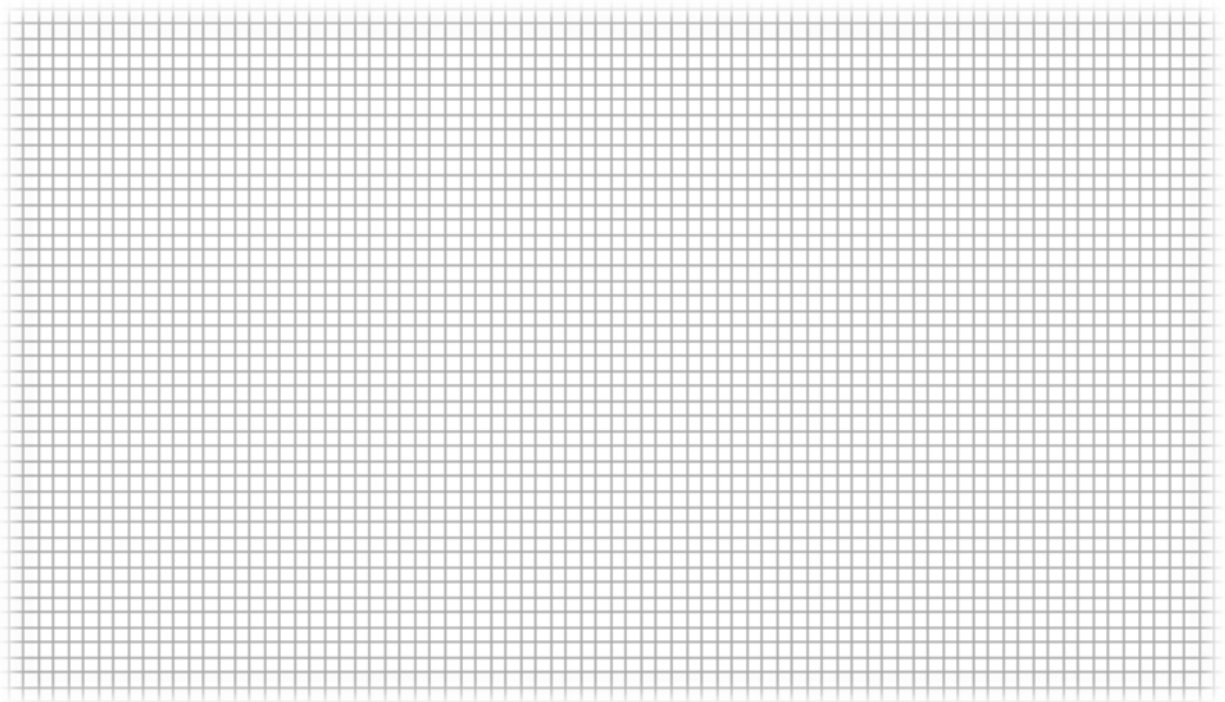
Odgovor :

8. Prikazati na grafiku kako se menja proizvedena električna energija po mesecima tokom godine za optimalan položaj fotonaponskog modula.



Grafik 1.: Mesečna proizvodnja el. energije za optimalan položaj fotonaponskog modula

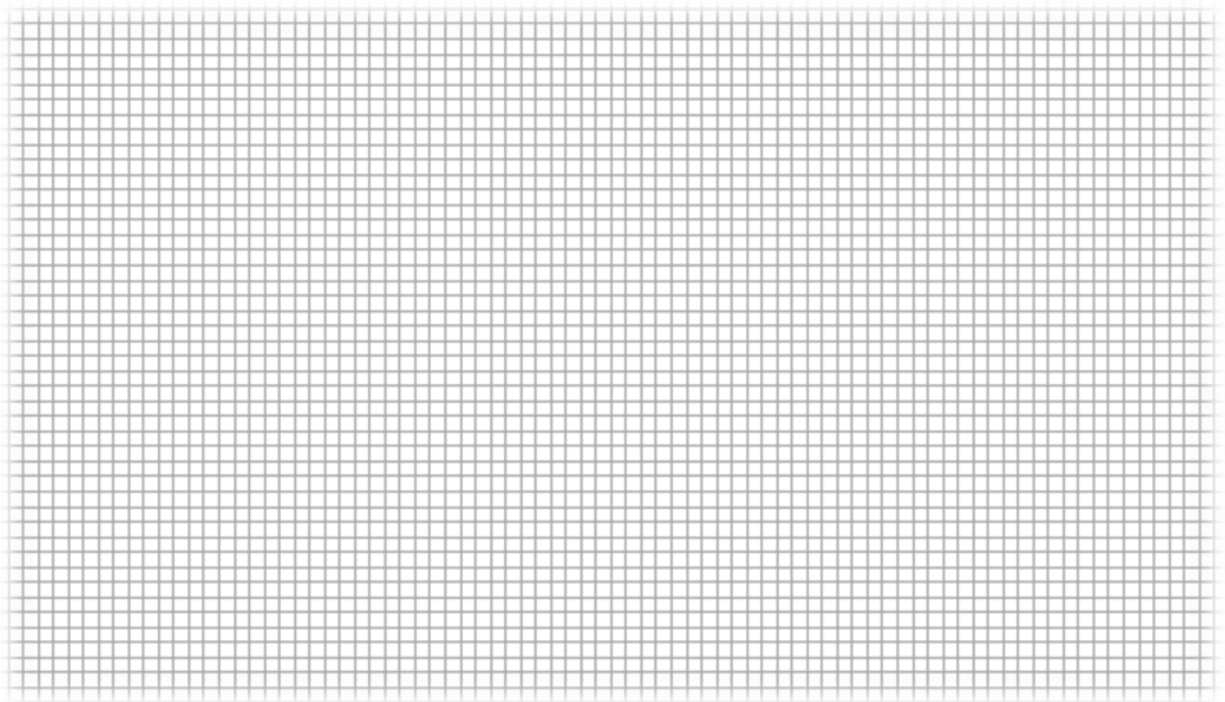
9. Prikazati grafički godišnju proizvodnju el. energije za nagibe od 28° do 48° i azimute od 160° do 200° .



Grafik 2.: Godišnja proizvodnja el. energije za nagibe od 28° do 48° i azimute od 160° do 200°

Parametar poznat kao „Levelized Cost of Energy (LCOE)“ (uporedan trošak proizvodnje el. energije) predstavlja ukupne investicione i operativne troškove u toku celog životnog veka, izražene u dolarima po kilovatčasu proizvedene energije. Izračunavanje LCOE-a preporučuje se kada se zahteva rangiranje alternativa kada je budžet ograničen. LCOE predstavlja trošak, tj. ne uzima u obzir prihod od prodaje el. energije. Ukoliko je predviđeno da se sva energija prodaje operatoru sistema, a želimo da sistem bude ekonomski opravdan, potrebno je da cena prodatog kilovatčasa bude veća od LCOE. U ovoj analizi, nominalan, koji uzima u obzir inflaciju, iznosi 26.94 ¢/kWh, a realan, koji ne uzima u obzir inflaciju 22.6 ¢/kWh. Ovaj parametar za kilovatčas proizveden u velikim elektranama u Republici Srbiji iznosi 6-7 ¢/kWh.

10. Prikazati grafički promenu LCOE kada se cena panela menja od 1 USD/Wdc do 1.8 USD/Wdc.



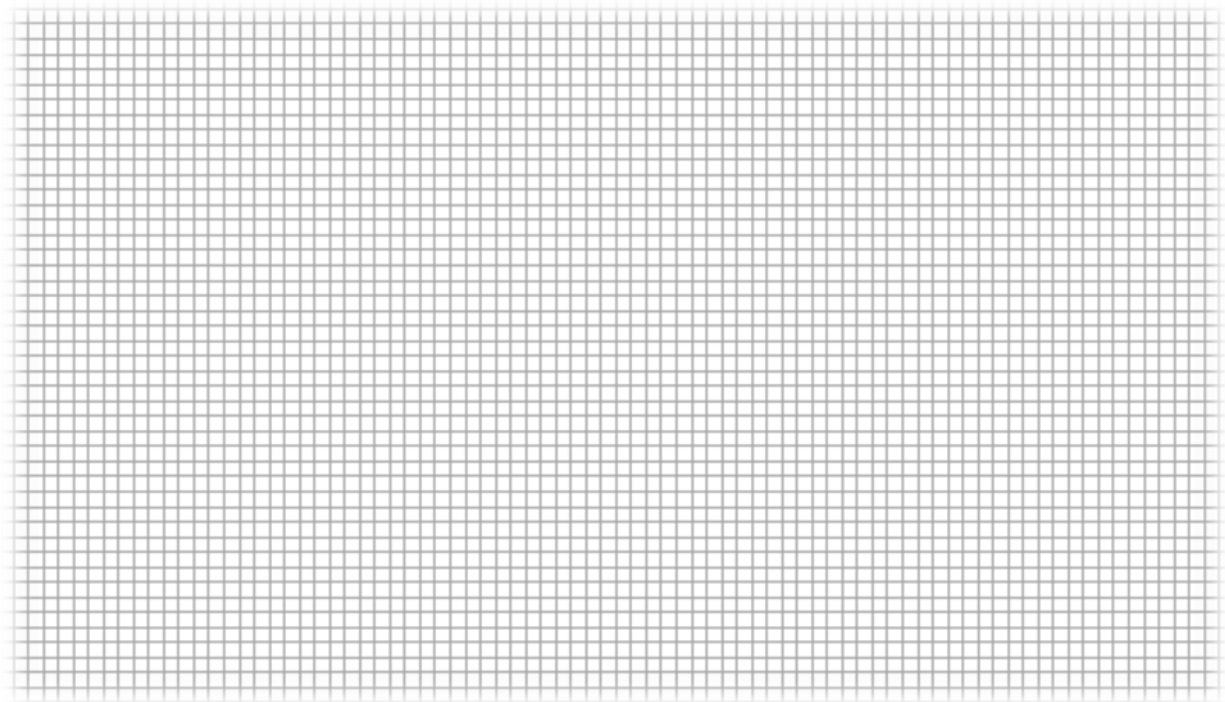
Grafik 3.: Promena LCOE kada se cena panela menja od 1 USD/Wdc do 1.8 USD/Wdc

11. Koji zaključak se može izvesti na osnovu grafika 3?

Odgovor :

„Payback period“ (vreme povraćaja kapitala) je broj godina potreban da se povrate troškovi projekta. U konkretnom primeru on iznosi 8.8 godina.

12. Prikazati grafički uticaj cene panela (smanjenje sa 1.8 USD/Wdc na 1 USD/Wdc) na vreme povraćaja kapitala. Koji zaključak se može izvesti?

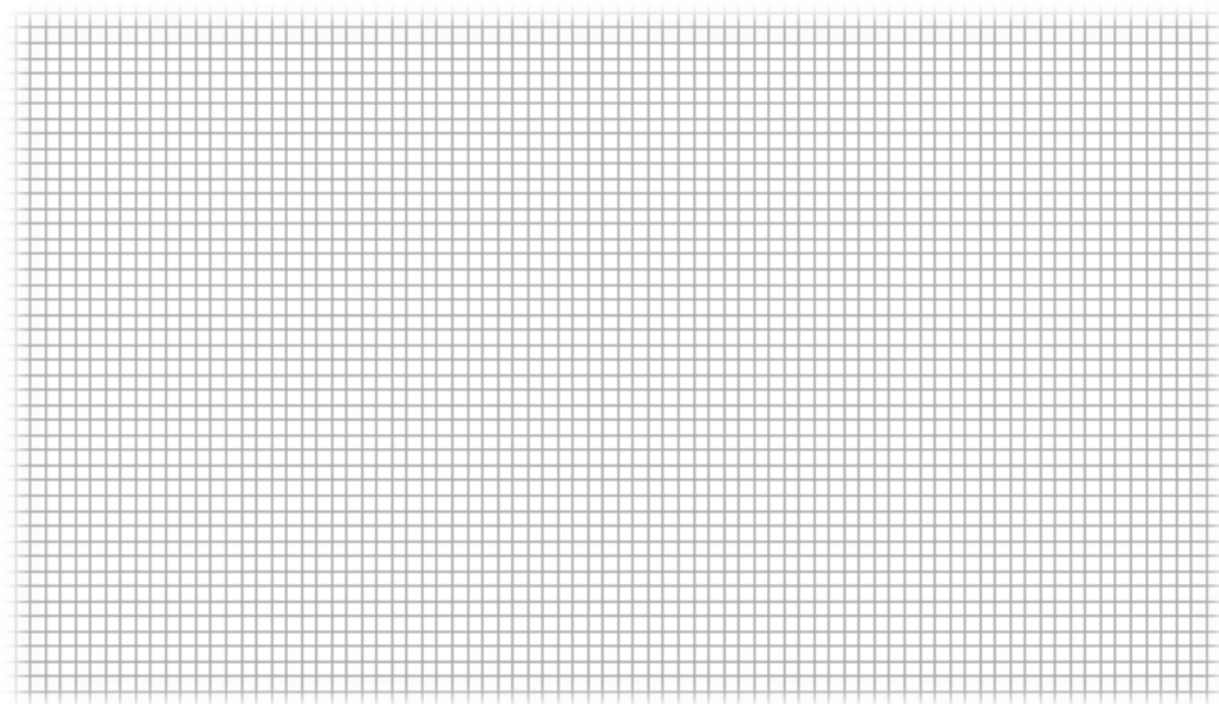


Grafik 4.: Uticaj cene panela (smanjenje sa 1.8 USD/Wdc na 1 USD/Wdc) na vreme povraćaja kapitala

Odgovor :

„Net Present Value“ (sadašnja vrednost projekta) je način analize troškova i prihoda zajedno i predstavlja meru pogodnosti projekta. Pozitivan NPV ukazuje da li je projekat ekonomski opravdan, jer pokazuje koliko će novca vlasnik PV sistema zaraditi do kraja projekta. U našem primeru ova vrednost iznosi \$3942.

13. Prikazati grafički uticaj cene panela na Net Present Value (sadašnju vrednost projekta). Koji zaključak se može izvesti?



Grafik 5.: Uticaj cene panela (smanjenje sa 1.8 USD/Wdc na 1 USD/Wdc) na Net Present Value

Odgovor :

OCENA ZADATKA 1		
Nije urađen	Parcijalno urađen	Potpuno urađen

LITERATURA

1. Grujić A., Petrović V, Tarabić D.: Upotreba softverskog alata SAM (System Advisory Model) u projektovanju vetroelektrana manjih snaga, 33. Savetovanje CIGRE Srbija, Ref. C6-12, Zlatibor, 5. jun – 8. jun 2017, Zbornik radova u elektronskom izdanju, str. 1-8, ISBN 978-86-82317-81-4.
2. Željko Đurišić, Momčilo Bubnjević, Dušan Mikičić, Nikola Rajaković, "Wind atlas of Vojvodina, Serbia".
3. N. Rajaković, Ž. Đurišić, M. Bubnjević, D. Mikičić "Analyses of annual electricity production of perspective small wind-plant in the region of Deliblatska peščara", Sixth International Symposium Nikola Tesla, Beograd 2006.
4. Sam-help-2016-3-14, <https://sam.nrel.gov/>.
5. S. Stojković, S. Damjanović, N. Todorović, P. Stojadinović "Primena softverskog alata system advisor model za projektovanje malih elektrana u obrazovanju studenata energetike", 33. Savetovanje CIGRE Srbija, Ref. C6-11, Zlatibor, 5. jun – 8. jun 2017, Zbornik radova u elektronskom izdanju, str. 1-8, ISBN 978-86-82317-81-4.
6. S. Tomović, Alternativni izvori energije, Tehnička knjiga, Beograd, 2002.
7. M. Đurović, Alternativni izvori energije i budućnost njihove primene u zemlji, Crnogorska akademija nauka i umjetnosti, Podgorica, 2002.
8. Gilbert M. Masters: Renewable and Efficient Electric Power Systems, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2013.
9. Vladica Mijailović: Distribuirani izvori energije – princip rada i eksploatacioni aspekti, Akademska misao, 2011.
10. Clean Energy Trainer, Experiment Guide, Heliocentris.
11. Petrović V., Grujić A.: Application of programmable logic for efficient use of photovoltaic panels, "Computational and Informational Technologies in Science, Engineering and Education" CITech – *Almaty*, Kazakhstan, 24-27 september 2015, ISSN 1560-7534.
12. Grujić A., Stojković S., Despotović Ž., Petrović V.: Povećanje energetske efikasnosti VIŠER-a instaliranjem fotonaponske krovne elektrane, III naučno – stručni skup sa međunarodnim učešćem Politehnika – 2015, Visoka škola strukovnih studija Politehnika, Beograd, Vol.3, No.1, str. 123 - 128, Decembar 2015, ISBN: 976-86-74980-64-4, M63.
13. Stojković S., Dragičević S., Technical Feasibility and Financial Analysis of Hybrid Wind-Photovoltaic System for Supply of One Educational Institution, 16th Symposium on Thermal Science and Engineering Serbia, 22.-25. October, 2013., Sokobanja, Serbia, Paper 3.08, pp. 168-176.
14. Ali Keyhani, Mohammad N. Marwali, Min Dai: Integration of Green and Renewable Energy in Electric Power Systems, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2010.
15. Volker Quaschnig: Understanding Renewable Energy Systems, Earthscan in the UK and USA, 2005.