

Autori: Aleksandra Grujić, Saša Stojković, Željko Despotović, Vera Petrović

Studijski program: Nove energetske tehnologije

U tekstu je prikazan način projektovanja i dimenzionisanje fotonaponske elektrane na krovu Visoke škole elektrotehnike i računarstva (VIŠER) strukovnih studija u Beogradu, instalisane snage 19,89 kWp. Prikazani su rezultati predikcije proizvedene električne energije na godišnjem i mesečnom nivou kao i ekonomski parametri fotonaponske elektrane, izračunati pomoću softverskog alata SAM (System Advisor Model). Analiziran je i uticaj senke, uslovljen rasporedom nizova fotonaponskih panela. Za ekonomsku analizu korišćen je „Life Cycling Costs (LCC)“ metod, kojim se svi troškovi svode na sadašnju vrednost. Analiza pokazuje da je projekat ekonomski opravdan, jer se očekuje da se za oko devet godina vrate uloženi investicioni troškovi, posle čega se očekuje prihod.

Sve veća potreba za električnom energijom kao najkorisnijim vidom energije dovela je do rapidnog razvitka fotonaponske industrije u celom svetu, kao i u Srbiji. Sunce je neposredno ili posredno, izvor gotovo sve raspoložive energije na Zemlji. Kada ne bi bilo energije Sunca, ne bi postojala ni energija dobijena iz drugih oblika obnovljivih izvora.

Sunčeva energija je besplatna, ali delovi koji sačinjavaju fotonaponski sistem još nisu ekonomski konkurentni konvencionalnim elektranama. Ako se u budućnosti u cenu kWh proizvedene električne energije iz sunčeve energije bude ukalkulisala i cena zagađenja životne sredine, fotonaponske (PV) elektrane će postati konkurentne konvencionalnim elektranama. Uredbu o merama podsticaja za proizvodnju električne energije korišćenjem obnovljivih izvora energije Vlada Srbije je donela kao podsticajnu meru koja je znatno ubrzala povećanje instaliranih kapaciteta fotonaponskih elektrana u Srbiji.

Prve PV elektrane na tlu, značajnije instalisane snage, u Srbiji su instalirane počev od 2013. godine. Krovne PV elektrane instalirane su u proteklih nekoliko godina na obrazovnim objektima, kao i na industrijskim objektima u Srbiji. Postoje tri osnovna cilja, kada se radi o obrazovnim institucijama. Prvi je edukativni – cilj da se studenti Visoke škole elektrotehnike i računarstva strukovnih studija u Beogradu (VIŠER-a) upoznaju sa elementima i konstrukcijom PV elektrane. Drugi cilj je promovisanje obnovljivih izvora električne energije, a treći – da se ostvare uštede u troškovima za električnu energiju koje danas škola ima. Električna energija dobijena fotonaponskom konverzijom sunčeve energije u električnu je od posebnog značaja u urbanim sredinama jer predstavlja daleko najpogodniji vid energije za eksploataciju u odnosu na ostale oblike obnovljivih izvora energije. Na taj način se nadkrovne površine objekata različite namene (nadstrešnice parkinga, krovne površine objekata, nadstrešnice sedećih mesta na stadionima i sportskim terenima...) mogu u potpunosti iskoristiti za proizvodnju ekološki čiste električne energije.

VIŠER planira izgradnju PV elektrane instalisane snage 19,89 kWp na kosom krovu objekta, kao i povezivanje sa specijalizovanim energetske laboratorijama što bi imalo mnogostruke pozitivne efekte. Prvo, studenti bi mogli da stiču najsavremenija iskustva iz oblasti obnovljivih izvora energije, koja predstavlja multidisciplinarnu oblast, i na taj način postanu konkurentniji na tržištu rada prilikom zaposlenja. Drugo, povećao bi se, doduše u manjem obimu, udeo obnovljivih izvora energije u proizvedenoj električnoj energiji u Srbiji i smanjilo bi se emitovanje štetnih gasova u atmosferu. Treće, proizvodnjom električne energije i dobijanjem statusa povlašćenog proizvođača električne energije investicioni troškovi bi bili vraćeni za približno polovinu životnog veka same PV elektrane, što bi ostavilo prostora za buduće investicije u smislu povećanja energetske efikasnosti celog objekta. U nastavku rada će biti prikazan opis projektovanja i dimenzionisanja, kao i opis opreme i tehničkih rešenja korišćenih za realizaciju PV elektrane.

Matematičko modelovanje PV elektrana omogućava primenu razvijenih softverskih alata od strane vodećih kompanija, a sve u cilju što tačnije procene dobijene električne energije i vremena povratka uložene investicije. Matematički modeli za analizu i projektovanje PV elektrana, kao i primeri izgrađenih PV elektrana sličnih predstavljenoj elektrani u ovom radu, detaljno su prikazani u literaturi [1-5].

#### PROJEKTOVANJE I DIMENZIONISANJE PV ELEKTRANE NA KROVU VIŠER-A

PV elektrana je složen sistem sastavljen iz PV panela, DC razvodnih ormana, sistema zaštite, invertora, AC razvodnih i mernih ormana, kao i mesta priključenja na distributivnu mrežu. Za projektovanje i dimenzionisanje PV elektrane potreban je vrlo kompleksan i zahtevan rad. DC razvodni ormari i sistemi zaštitne sadrže tipске elemente za prekostrujnu zaštitu (zaštita PV panela od inverznih struja), za prenaponsku zaštitu (zaštita od prenapona usled pojave direktnog ili indukovanog atmosferskog pražnjenja), kao i rastavnu sklopku (uloga rastavne funkcije u slučaju kvara).

#### Opis lokacije i insolacije

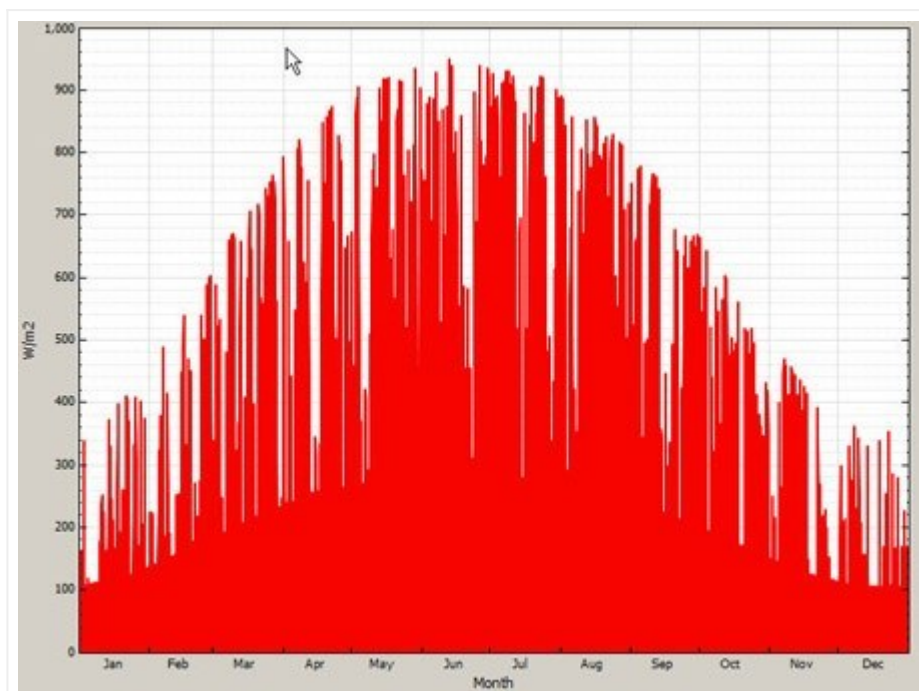
Objekat na čijem krovu će biti izgrađena instalacija PV elektrane je zgrada Visoke škole elektrotehnike i računarstva strukovnih studija u Beogradu na adresi Vojvode Stepe 283. U WGS koordinatnom sistemu predmetna lokacija je na geografskoj širini od 44°46'5"N i geografskoj dužini od 20°28'48"E. Ovaj krov je izveden kao dvostruki krov sa dve vode, strana dimenzija 36,88x14,53x5m, pod nagibom u odnosu na horizontalu od 12,4°. Sleme krova je orijentisano u odnosu na pravac jug – istok pod uglom od 30°. Sam objekat se nalazi na ravnom terenu i u njegovoj blizini se ne nalaze građevine ili drveće koji bi mogli da bacaju senku na stranu na kojoj se planira postavljanje fotonaponskih panela.

Na slici 1 prikazana je pozicija odabrane mikrolokacije na satelitskom snimku terena (Google Earth).



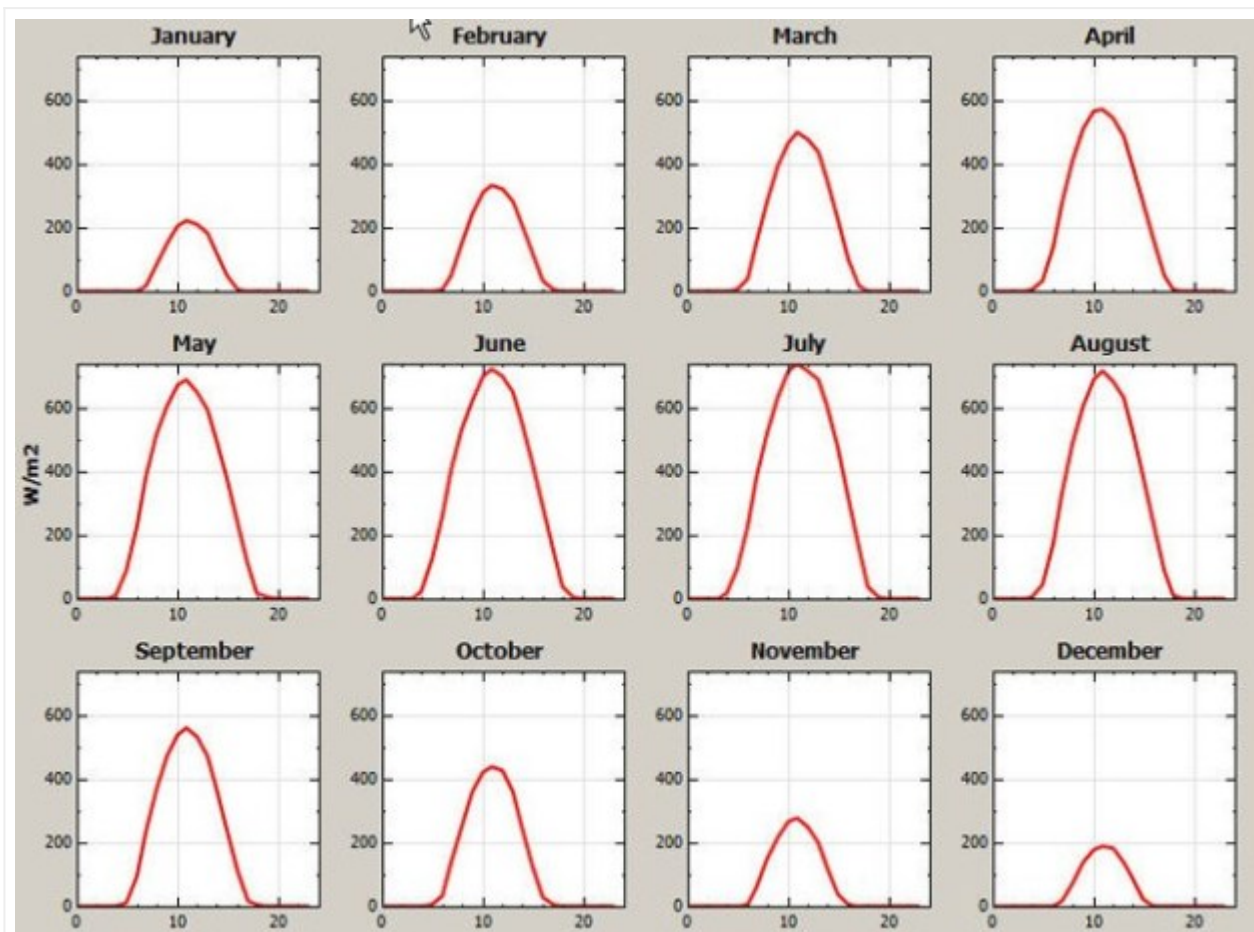
Slika 1: Lokacija Visoke škole elektrotehnike i računarstva u Beogradu

Softverski alat SAM (System Advisor Model) je korisnički orijentisan alat koji korisniku omogućava detaljnu analizu PV sistema, vetrogeneratorskih sistema i svih sistema koji koriste obnovljive izvore energije [6]. Na slici 2 je prikazana raspodela površinskog sunčevog zračenja ( $W/m^2$ ) na satnom nivou, za period od godinu dana, za lokaciju Beograd, korišćena u softverskom alatu SAM (System Advisor Model). SAM koristi ASHRE meteorološke ulazne podatke u vidu tzv. epw fajla, dostupnog na internetu, a raspoloživog u samom softverskom alatu [6]. Slika 2 prikazuje globalno površinsko sunčevo zračenje ( $W/m^2$ ) na horizontalnu površinu, na teritoriji Beograda.



Slika 2: Globalno površinsko sunčevo zračenje (W/m<sup>2</sup>) na horizontalnu površinu na satnom nivou za period od godinu dana za Beograd

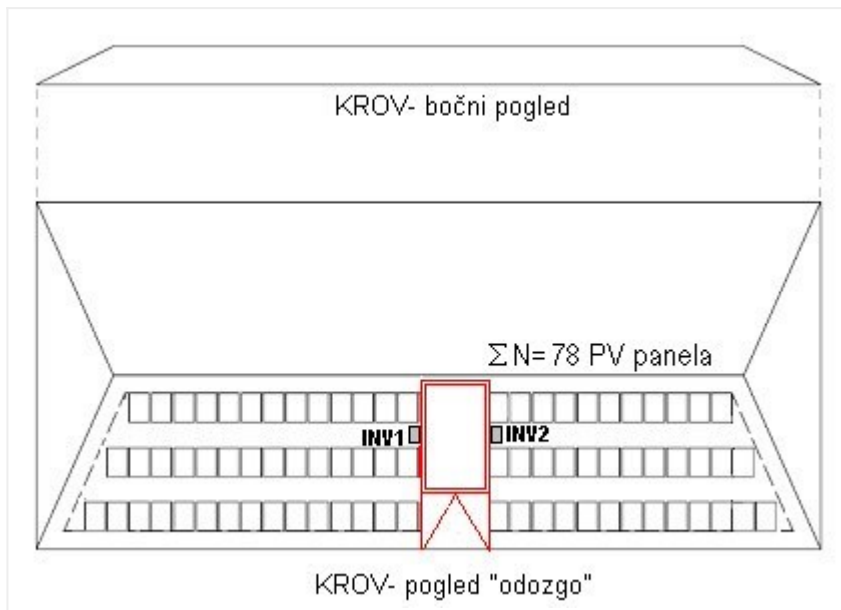
Na slici 3 je prikazano globalno površinsko sunčevo zračenje (W/m<sup>2</sup>) za lokaciju Beograd na mesečnom nivou za prosečnu godinu.



Slika 3: Globalno površinsko sunčevo zračenje (W/m<sup>2</sup>) za lokaciju Beograd na mesečnom nivou za prosečnu godinu

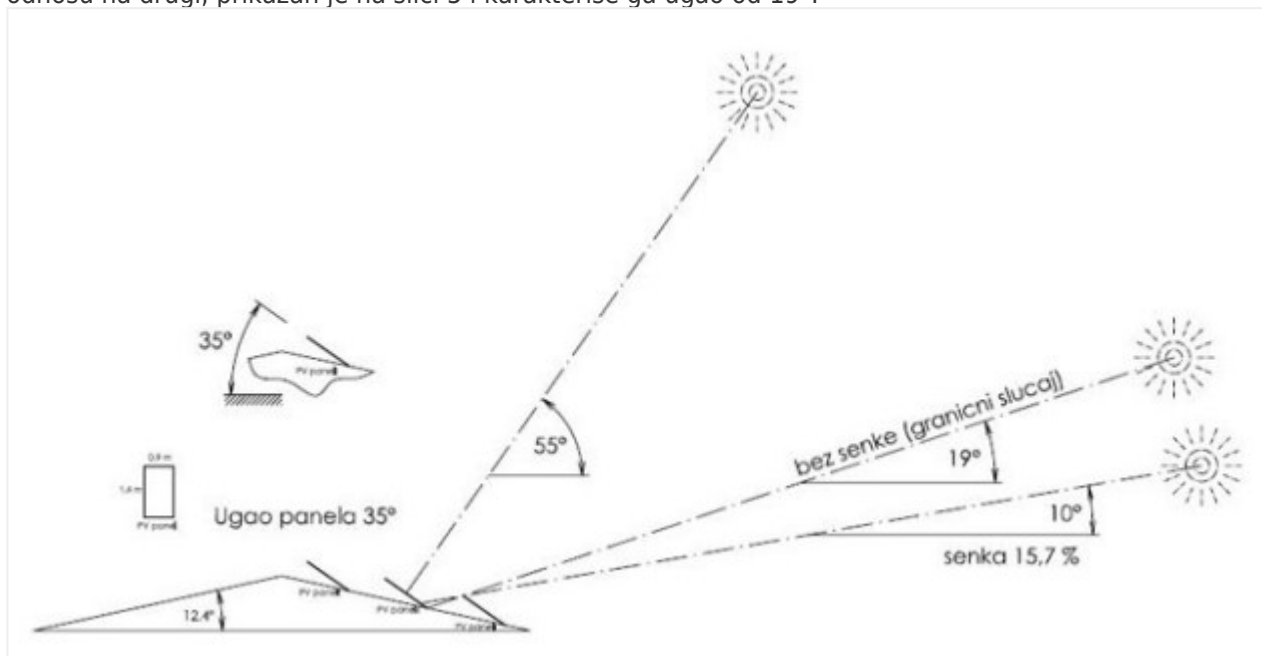
#### Dispozicija PV panela

PV paneli bi bili postavljeni na površini krova koja je orijentisana prema jugo-istoku i to tako da bi ukupan broj PV panela od 255 Wp bio raspoređen kao na slikama 4 i 5. PV paneli bi bili raspoređeni na jednoj vodi krova koja je okrenuta ka ulici Vojvode Stepe u šest nizova po 13 PV panela. Paneli su pod uglom od 35° u odnosu na horizontalnu površinu. Simulacijama je izračunato da je za taj nagib proizvodnja električne energije na teritoriji Beograda maksimalna u toku godine [7-8]. Na slici 4 prikazan je raspored PV panela.



Slika 4: Raspored i broj PV panela na krovu VIŠER-a

Iako se sam objekat nalazi na ravnom terenu i u njegovoj blizini se ne nalaze strukture koje bi mogle da bacaju senku na stranu na kojoj se planira postavljanje PV panela, raspored redova PV panela bi bio takav da u maloj meri postoji bacanje senke jednog reda u odnosu na drugi kao što je prikazano na slici 5. Sa slike 5 se može zaključiti da je u položaju Sunca u zenitu, ugao u odnosu na horizontalu  $55^\circ$  i da se tada postiže maksimalno generisanje električne energije. Granični slučaj do trenutka kada nema pojave senke jednog reda PV panela u odnosu na drugi, prikazan je na slici 5 i karakteriše ga ugao od  $19^\circ$ .



Slika 5: Granični slučaj bacanja senke jednog reda u odnosu na drugi red PV panela

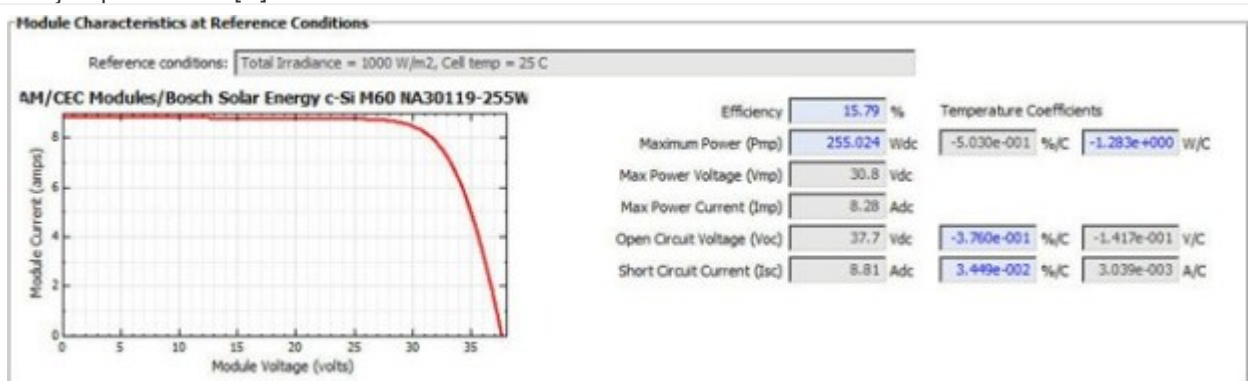
Uticaj senke je zanemarljivo mali i karakteriše ga umanjeње generisane električne energije od 15,7% trenutne proizvodnje, što je zanemarljivo u odnosu na ukupnu proizvedenu električnu energije posredstvom velikog broja PV panela.

#### Opis korišćenih elemenata u okviru PV elektrane

Primenom softverskog alata SAM (System Advisor Model) izvode se proračuni o dimenzionisanju PV elektrane od



19,89 kWp. Na slici 6 su prikazane karakteristike izabranog PV panela snage 255Wp tipa SAM/CEC Modules/Bosch Solar Energy c-Si M 60 NA30119-255Wp. Korišćen je četvoroparametarski De Sotov model, detaljno prikazan u [9].



Slika 6:

Karakteristika PV panela tipa SAM/CEC Modules/Bosch Solar Energy c-Si M 60 NA30119-255Wp. Za PV elektranu su dimenzionisana dva invertora snage od po 10 kW i za prikazan odabir PV panela i invertora zadovoljena su svi kriterijumu prikazani u nastavku rada.. Na slikama 7 i 8 prikazani su karakteristični podaci PV elektrane sa izabranim tipovima PV panela i invertora, respektivno.

**Specify System Size**

Specify desired array size

Specify numbers of modules and inverters

Desired Array Size  kWdc

Modules per String

Strings in Parallel

Number of Inverters

Messages:

Array DC capacity is 95% of inverter DC capacity. Check for more sizing messages after running simulations. See Help for details.

Slika 7: Karakteristični podaci PV elektrane sa izabranim tipovima PV panela  
Sa slike 7 se može zaključiti da je snaga DC strane PV elektrane 95% od snage DC strane invertora, što znači da je PV sistem pravilno dimenzionisan. Na slici 8 se može videti da je ukupna površina PV panela 125,97m<sup>2</sup>.

Actual Layout			
Modules	Inverters		
Nameplate Capacity	19.8919 kWdc	Total Capacity	20 kWac
Number of Modules	78	Number of Inverters	2
Modules per String	13	Vdcm <sub>max</sub> (dc-inverter)	600 V
Strings in Parallel	6	MPPT <sub>low</sub>	230 V
Total Module Area	125.97 m <sup>2</sup>	MPPT <sub>hi</sub>	500 V
V <sub>oc</sub> (String)	490.1 V	Nameplate capacity and V <sub>mp</sub> are at module reference conditions. Voc is at 1000 W/m <sup>2</sup> irradiance and 25 °C cell temperature.	
V <sub>mp</sub> (String)	400.4 V		

Slika 8: Karakteristični podaci PV elektrane sa izabranim tipovima invertora  
 Pored izabranih tipova PV panela i invertora, potrebni elementi PV elektrane su još i DC spojna kutija (DC razvod) sa prenaponskom zaštitom, razdelnik na naizmeničnoj (AC) strani, potkonstrukcija za montažu PV panela na kosi krov, kablovi za solarnu instalaciju (DC strana), merno-priključni ormarić, sistem za daljinski nadzor, dijagnostiku i praćenje rada elektrane sa licencom aplikacije, kao i gromobranska instalacija (nivo zaštite II). Prilikom montiranja sistema nosača PV panela potrebno je voditi računa o mehaničkoj izdržljivosti sistema, pri čemu treba voditi računa o svim mogućim opterećenjima (masa PV panela, sneg i led, mogući udari vetra...).

#### TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA PV ELEKTRANE NA KROVU VIŠER-A

Pomoću softverskog alata SAM dobijeni su podaci prikazani na slikama 7 i 8 za ukupno 78 PV panela (po 13 u šest redova) i dva invertora. Proračun je dobijen za koeficijent refleksije od 0,2, a ukupna površina koju zauzima PV elektrana sa dodatnom opremom na krovu je 252 m<sup>2</sup>. Sa slike 8 se može zaključiti da je ukupna instalisana snaga PV elektrane 19,89 kW, sa 78 PV panela raspoređenih u 6 paralelno vezanih redova, sa po 13 PV modula po redu (stringu). Ukupna površina PV panela je 125.97 m<sup>2</sup>. VOC je maksimalni napon otvorenog kola modula za ceo string, i mora da zadovoljava uslove:

$$V_{OC} = V_{dc\ max} \quad (1)$$

$$V_{OC} = MPPT_{hi} \quad (2)$$

gde je: Vdcm<sub>max</sub> - vrednost napona pri maksimalnoj generisanoj snazi na DC strani invertora.

Uslovi (1) i (2) su ispunjeni za konkretnu konfiguraciju PV elektrane, prikazanu u ovom radu, što potvrđuju i dobijene vrednosti za napone VOC i Vdcm<sub>max</sub> prikazane na slici 8.

Drugi uslov koji mora biti ispunjen je:

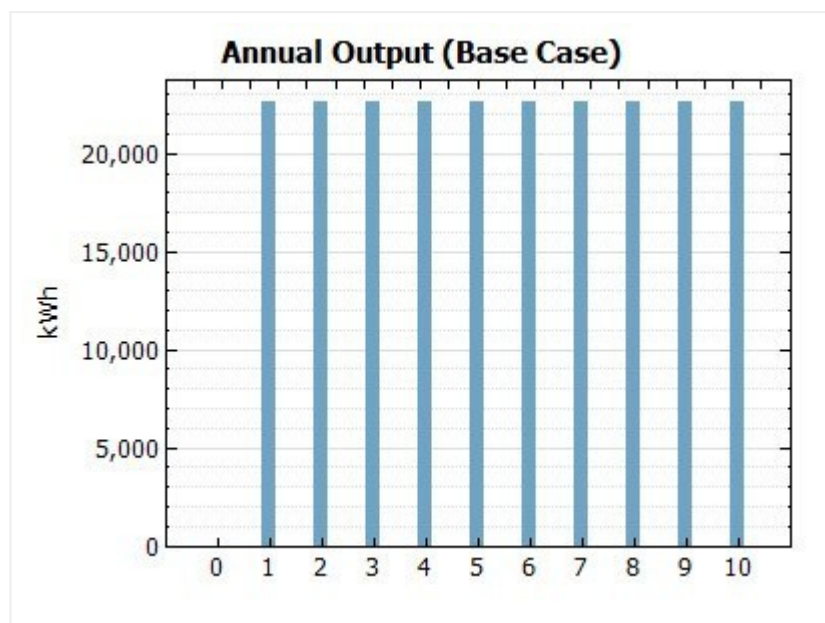
$$MPPT_{low} = V_{mp} = MPPT_{hi}$$

gde je: V<sub>mp</sub> - vrednost napona modula celog stringa pri maksimalnoj generisanoj snazi

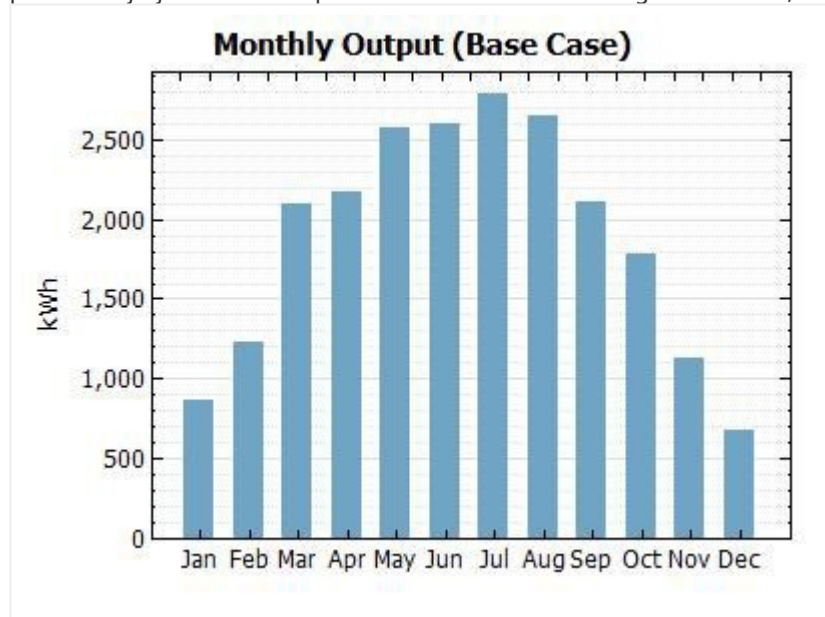
MPPT<sub>low</sub> - minimalni napon na DC strani invertora pri kome se generiše maksimalna snaga

MPPT<sub>hi</sub> - maksimalni napon na DC strani invertora pri kome se generiše maksimalna snaga.

Uslov (3) je ispunjen za konkretnu konfiguraciju PV elektrane, prikazanu u ovom radu, što potvrđuju i dobijene vrednosti za napone V<sub>mp</sub>, MPPT<sub>low</sub> i MPPT<sub>hi</sub>, prikazane na slici 8. Pomoću pomenutog softverskog alata za ovako konfigurisanu PV elektranu mogu se dobiti rezultati srednje godišnje proizvodnje električne energije (slika 9) i proizvedena električna energija na mesečnom nivou za jednu prosečnu godinu (slika 10). Na slici 9 prikazana je proizvodnja električne energije u toku 10 godina, Očigledno je, da radi jednostavnosti, nije uzeto u obzir smanjenje snage modula usled starenja, koje uobičajeno do 0.5% godišnje.



Slika 9: Srednja godišnja proizvodnja električne energije (kWh) za svaku godinu u desetogodišnjem periodu. Proizvedena godišnja električna energija analizirane PV elektrane iznosi 23591 kWh. Prosečna godišnja proizvodnja je 1179 kWh po kilovatu instalisane snage elektrane, a rezultat je sličan rezultatu dobijenom u [7].



Slika 10: Srednja mesečna proizvodnja električne energije (kWh) u toku jednogodišnjeg perioda. Analizirajući sliku 10 može se zaključiti da je najveća proizvedena električna energija na mesečnom nivou analizirane PV elektrane u mesecu julu i iznosi 2800 kWh, a najmanja proizvedena električna energija na mesečnom nivou je u mesecu decembru i iznosi 700 kWh. Dobijene vrednosti su očekivane zbog relativno velikih razlika vrednosti mesečnih insolacija u letnjim i zimskim mesecima, kao što je prikazano na slikama 2 i 3. Za konkretnu PV elektranu direktni i indirektni troškovi prikazani su u tabeli.



Tabela 1. Ukupni troškovi PV elektrane na krovu VIŠER-a

Direktni troškovi (€)	
PV paneli	40.688,00
Invertori	9.000,00
Ostala oprema	9.042,00
<b>Ukupni direktni troškovi (€)</b>	<b>58.730,00</b>
Indirektni troškovi(€)	
Dozvole, studije o zaštiti životne sredine	1.819,00
Idejni i glavni projekat PV elektrane	568,00
<b>Ukupni indirektni troškovi (€)</b>	<b>2.387,00</b>
<b>UKUPNO (€)</b>	<b>61.117,00</b>

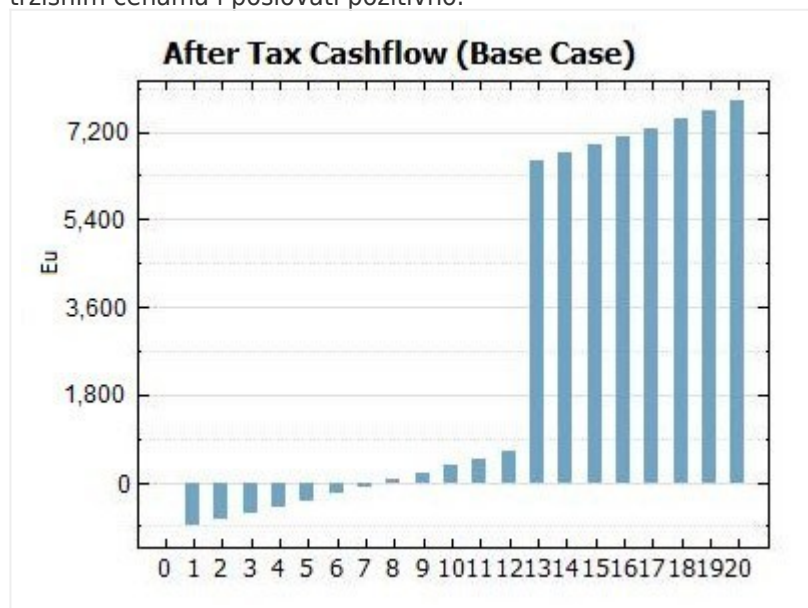
Pod pretpostavkom da je dobijen kredit za izgradnju PV elektrane od banke, koja daje subvencionisane kredite za podsticaj korišćenja obnovljivih izvora energije sa kamatnom stopom od 6%, vreme za koje se povrati uložena investicija iznosi 8,95 godina.

Vlada Republike je donela Uredbu o podsticajnim otkupnim cenama iz obnovljivih izvora energije, koja se na tržištu prodaje po povlašćenim cenama za period od 12 godina, a posle tog perioda postaje konkurentna na tržištu.

Povlašćena cena za krovne PV elektrane instalisane snage 0-30kW je 20,66 c€/kWh.

Na slici 11 su prikazani troškovi odnosno dobiti za dvadesetogodišnji analizirani period u €.

Sa slike 11 se može zaključiti da se već posle 8,95 godina vraća uložena investicija, a da posle 12 godina, koliko traje ugovor o povlašćenim cenama prodaje električne energije, PV elektrana može nastaviti sa radom po tržišnim cenama i poslovati pozitivno.



Slika 11; Troškovi/dobiti za analizirani dvadesetogodišnji period PV elektrane na krovu VIŠER-a  
**ZAKLJUČAK**

U radu su prikazani rezultati tehničke i ekonomske analize PV elektrane snage 19,89 kW koja bi bila priključena na distributivnu mrežu.

Analiza pokazuje da je PV elektrana ekonomski opravdana, pod uslovima koji pretpostavljaju podsticajnu cenu kilovatčasa, kao i pod uslovima vezanim za bankarski kredit i interesnu stopu.

Očekivani povraćaj investicija je oko devet godina, a godišnja proizvedena energija bi iznosila 23591 kWh.

Realni LCOE (Levelized Cost of Energy), trošak za proizvedeni i isporučeni kilovatčas, bi iznosio 15,6 c€/kWh.

Ukupni prihod u toku trajanja projekta, koji često predstavlja činilac za odluku o gradnji male elektrane, iznosi 4800 €, a aktuelna vrednost projekta, koja uključuje prihode i troškove, je 12800 €.

Faktor kapaciteta, koji pokazuje proizvedenu energiju u odnosu na proizvedenu energiju kada bi elektrana u svakom satu godine radila sa solarnom radijacijom standardnom za PV panele (1000W/m<sup>2</sup> i 25°C), iznosi 13.5%, što je tipična vrednost za uslove u Republici Srbiji.

Može se zaključiti da postoji dovoljno podataka na osnovu kojih se može proceniti opravdanost izgradnje ove male PV elektrane.

Osim ekonomskih prihoda, postoje i socijalni aspekti u vidu edukacije studenata i promovisanja obnovljivih izvora energije, kao i smanjenja emisije štetnih gasova.

---

Više informacija: **Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija**, Vojvode Stepe 283, 11000 Beograd/Voždovac, Srbija, tel: 011/2471-099, web: [www.viser.edu.rs](http://www.viser.edu.rs)

Share this:

[Pritisnite da biste podelili na Tviteru\(Otvora se u novom prozoru\)](#)

[Click to share on Facebook\(Otvora se u novom prozoru\)](#)