



Simulacija utjecaja zasjenjenja na proizvodnju električne energije fotonaponske elektrane ***Simulation of the shading effect on electricity generation of photovoltaic power plant***

I. Radmanović¹, G. Knežević^{1,*}, D. Topić¹, K. Fekete¹

¹Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, Hrvatska

*Autor za korespondenciju. E-mail: goran.knezevic@ferit.hr

Sažetak

Prema trenutnim tržišnim istraživanjima, instalirana snaga fotonaponskih (FN) elektrana u svijetu na kraju 2015. godine iznosila je 235 GW. Predviđanja tržišta su da će se instalirana snaga FN elektrana udvostručiti do kraja 2018. godine. Instalirana snaga FN elektrana u EU na kraju 2015. iznosila je 95,4 GW čime se može proizvesti godišnje 100 TWh električne energije što čini skoro 4% ukupne potražnje električne energije u EU. Zasjenjenje ima ogroman utjecaj na proizvodnju električne energije iz FN modula. Ako mali dio fotonaponskog modula bude pod utjecajem zasjenjenja, dolazi do velikog smanjenja korisnosti cijelog FN modula. Razlog tome je što se FN modul sastoji od serijski spojenih FN ćelija. Kada se izlazna snaga pojedine ćelije značajno smanji, izlazna snaga cijelog sustava spojenog u seriju svodi se na razinu struje koja prolazi kroz ćeliju na kojoj se apsorbira najmanje svjetlosti. U ovome radu prikazan je utjecaj zasjenjenja na proizvodnju električne energije promatrane FN elektrane. Uz to, prikazana je uloge prenosne diode u slučaju zasjenjenja dijela FN modula. Uz pomoć programskog paketa PV*SOL, simulirana su četiri scenarija. U prvom scenariju simulirana je FN elektrana bez utjecaja zasjenjenja, u drugom scenariju objekt zasjenjenja predstavljao je dimnjak. U trećem scenariju predmet zasjenjenja predstavljalo je drvo s krošnjom te u četvrtom scenariju objekt koji je zasjenjivao FN elektranu bila je zgrada. Za svaki scenarij prikazana je godišnja bilanca proizvodnje i potrošnje električne energije promatranog sustava na mjesečnoj razini. Analizirani su godišnji gubici električne energije zbog zasjenjenja.

Ključne riječi: fotonaponski modul, zasjenjenje modula, gubici električne energije zbog zasjenjenja

Abstract

According to current market research, the installed power of photovoltaic (PV) power plants in the world at the end of 2015 was 235 GW. According to current market forecast, installed power of the FN power plant will be doubled by the end of 2018. The installed

power of the PV power plant in the EU at the end of 2015 was 95.4 GW, so it could produce 100 TWh of electricity per year, making almost 4% of the total electricity demand in the EU. Shading has a huge impact on the production of electricity from the PV module. If a small part of the PV module is under the influence of shading, there is a large reduction in the efficiency of the entire PV module. The reason is that the PV module consists of serial-connected PV cells. When the output power of a particular cell is significantly reduced, the output power of the whole serial-connected system is reduced to the current passing through the cell at which the least light is absorbed. This paper presents the impact of shading on the electricity production of the observed PV power plant. Additionally, the role of the bypass diode is shown for a partial shading of the PV module. In PV*SOL program package, four cases of shading are simulated. In the first case, the power plant was simulated without the effect of shading, in the second case the shading object was a chimney. In the third case the shading was represented by a tree with a crown and in the fourth case the shading object was a building placed in front of PV power plant. For each case, the annual balance of electricity production and consumption of the observed system is presented on a monthly basis. Annual electricity losses due to shading were analyzed.

Key words: photovoltaic module, module shading, power losses due to shading

1. Uvod

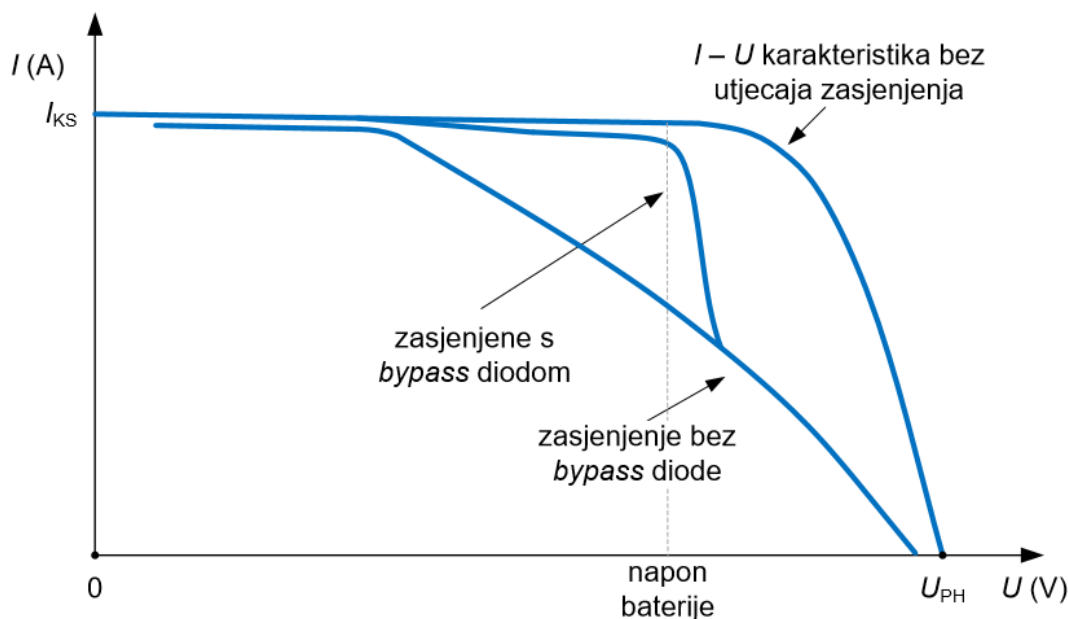
U 2015. godini ulaganja u svijetu u obnovljive izvore energije dosegla su rekordnu visinu. Ulaganja u projekte obnovljivih izvora energije, bez velikih hidroelektrana, dosegla su 260 milijardi eura, što je više za 5% nego u 2014. godini. Prema trenutnim tržišnim predviđanjima, instalirana snaga fotonaponskih (FN) elektrana, krajem 2015. godine iznosila je 235 GW. Predviđanja tržišta ukazuju da će se instalirana snaga FN elektrana udvostručiti do kraja 2018. godine. Instalirana snaga FN elektrana u EU na kraju 2015. iznosila je 95,4 GW čime se može proizvesti godišnje 100 TWh električne energije što čini skoro 4% ukupne potražnje električne energije u EU [1]. Instalirana snaga FN elektrana povlaštenih proizvođača u RH u mjesecu travnju 2017 iznosila je 51 449 kW [2].

Kako bi FN elektrana bila što isplativija, od velike je važnosti položaj instalacije elektrane kako bi se iskoristilo što više sunčeve energije. Fotonaponski sustavi najčešće se postavljaju na južnu stranu krova građevine. Prilikom postavljanja fotonaponskog sustava vrlo je važno izbjeći utjecaj zasjenjenja. U ovome radu prikazan je učinak parcijalnog zasjenjenja modula fotonaponske elektrane na očekivanu proizvodnju električne energije. Nadalje, uz pomoć programskog paketa PV*SOL, simulirana su četiri scenarija parcijalnog zasjenjenja te su analizirani godišnji gubici električne energije zbog zasjenjenja.

2. Učinak zasjenjenja

Zasjenjenje može imati ogroman utjecaj na korisnost fotonaponskih modula. Fotonaponski modul sastoji od serijski spojenih fotonaponskih ćelija. U slučaju kada se izlazna snaga pojedine ćelije značajno smanji, izlazna snaga cijelog sustava spojenog u seriju svodi se

na razinu struje koja prolazi kroz ćeliju na kojoj se apsorbira najmanje svjetlosti. Utjecaj zasjenjenja može se djelomično ublažiti dodavanjem premosne diode. Proizvođači dodaju jednu premosnu (engl. *bypass*) diodu po modulu da bi zaštitili FN niz ili dodaju nekoliko dioda unutar jednog modula, po jednu za svaku grupu od nekoliko ćelija [3]. Na slici 1. može se vidjeti utjecaj premosne diode na I-U karakteristiku FN modula.



Slika 1. Utjecaj premosne diode na I-U karakteristiku FN modula [3]

Uz premosnu diodu, može se koristiti i blokirajuća dioda – u slučaju kada je niz modula spojen paralelno. Uloga blokirajuće diode je da sprječava povratnu struju (struja mraka) kroz module koji ne funkcioniraju ispravno [3].

3. Simulacija utjecaja zasjenjenja na proizvodnju električne energije iz fotonaponske elektrane

3.1. Opis promatranog sustava

Osnovni podaci FN modula korištenog u promatranjoj FN elektrani prikazani su u tablici 1.

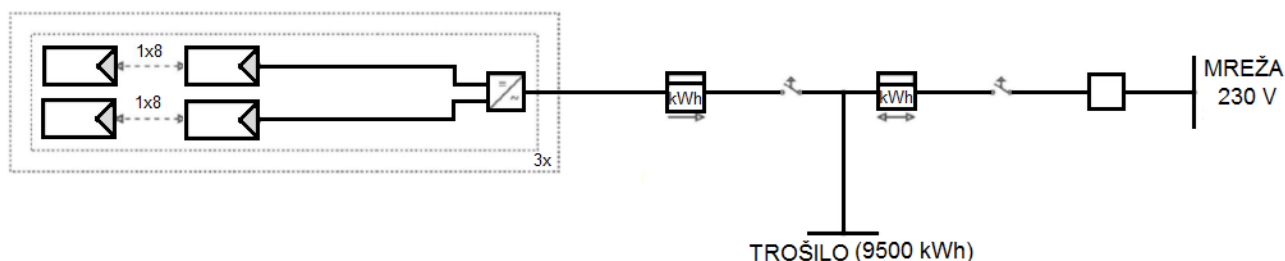
Tablica 1. Prikaz podataka korištenog FN modula

Električni podaci		Mehanički podaci	
Nazivna snaga	200 W	Širina	990 mm
Tip ćelije	Si monokristalni	Visina	1640 mm
Broj ćelija	60	Dubina	30 mm
Broj bypass dioda	3		
Struja KS-a	7,98A		

U tablici 2 prikazani su podaci promatranog sustava koji se sastoji od FN elektrane postavljene na krov objekta te vlastite potrošnje samog objekta. U objektu su pretpostavljena dva obiteljska stana s ukupnom godišnjom potrošnjom od 9500 kWh. Sustav je spojen na mrežu. Shematski prikaz sustava prikazan je na slici 2. Simulacija je provedena za period od jedne godine.

Tablica 2. Prikaz podataka korištenog FN modula

Klimatsko područje	Slavonski Brod
Položaj fotonaponskih modula	Južna krovna zona
Broj, vrsta modula	48 * monokristalnih modula, 200W
Nagib	44°
Orijentacija	Jug 180°
Ukupna potrošnja	9500 kWh



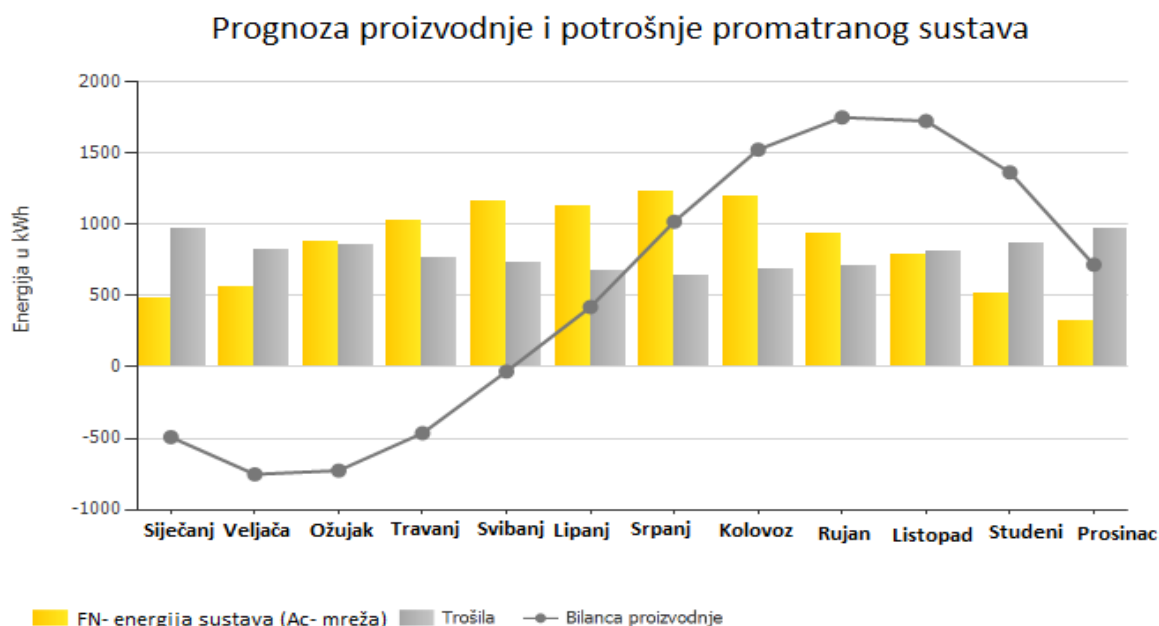
Slika 2. Shematski prikaz instalirane solarne elektrane

3.2. Rezultati simulacije za slučaj bez zasjenjenja

U prvom slučaju simulirana je elektrana kada nema utjecaja parcijalnog zasjenjenja. Rezultati su prikazani u tablici 3. Na slici 3 prikazana je prognoza proizvodnje i potrošnje promatranog sustava po mjesecima te bilanca proizvodnje za promatrani sustav.

Tablica 3. Rezultati simulacije bez zasjenjenja FN elektrane

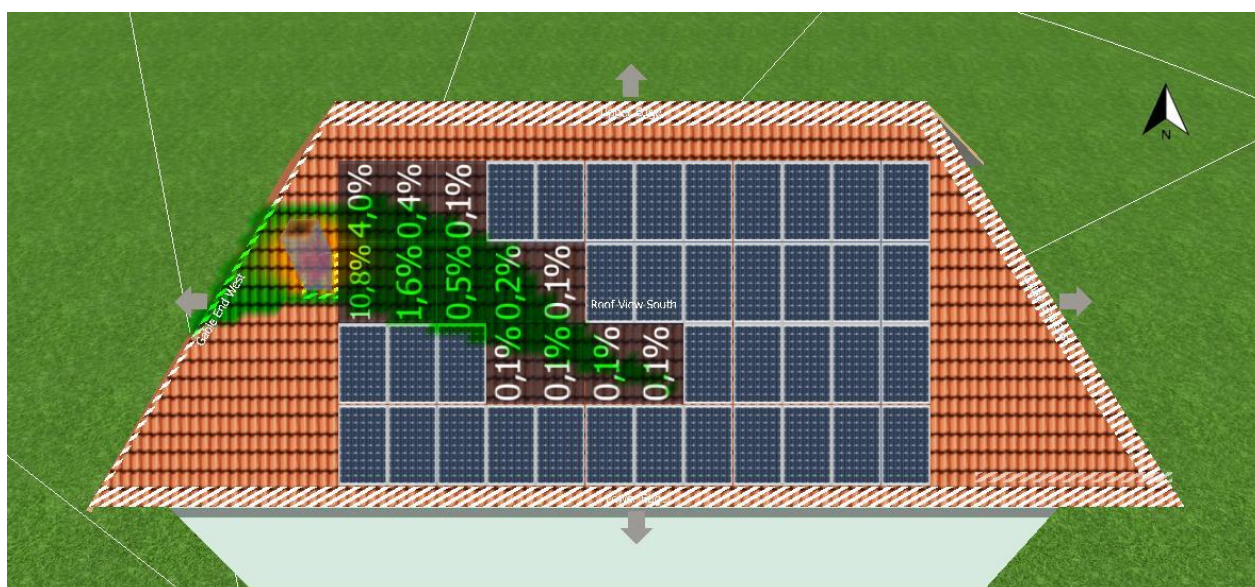
Ukupno proizvedena el. energija FN elektrane	10 242 kWh
Ukupna potrošnja sustava	9 500 kWh
Vlastita potrošnja namirena iz FN sustava	3 291 kWh
Vlastita potrošnja namirena iz mreže	6 209 kWh
Isporučena energija u mrežu	6 951 kWh
Ukupna bilanca sustava na kraju godine	742 kWh
Godišnji gubici zbog zasjenjenja	0



Slika 3. Proizvodnja i potrošnja promatranog sustava prikazana po mjesecima

3.3. Rezultati simulacije za slučaj zasjenjenja dimnjakom

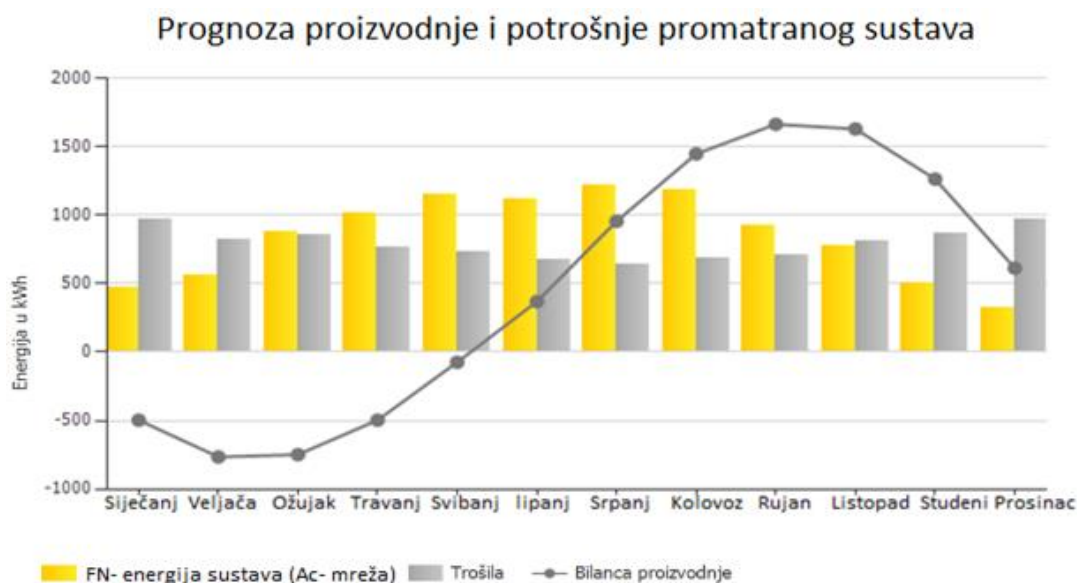
Na slici 4 prikazan je utjecaj zasjenjenja dimnjaka na fotonaponski sustav izražen u postotcima (%). Za razliku od prvog slučaja gdje nije bilo utjecaja zasjenjenja, u drugom slučaju vidi se kako dimnjak visine 1 m zasjenjuje fotonaponske module. Rezultati simulacije prikazani su u tablici 4 i slici 5.



Slika 4. Prikaz utjecaja zasjenjenja dimnjaka na fotonaponske module izražen u postotcima (%)

Tablica 4. Rezultati simulacije za slučaj zasjenjenja dimnjakom

Ukupno proizvedena el. energija FN elektrane	10 138 kWh
Ukupna potrošnja sustava	9 500 kWh
Vlastita potrošnja namirena iz FN sustava	3 284 kWh
Vlastita potrošnja namirena iz mreže	6 216 kWh
Isporučena energija u mrežu	6 854 kWh
Ukupna bilanca sustava na kraju godine	638 kWh
Godišnji gubici proizvodnje FN elektrane zbog zasjenjenja (u odnosu na osnovni slučaj)	1,025 %



Slika 5. Proizvodnja i potrošnja promatranog sustava prikazana po mjesecima za slučaj zasjenjenja dimnjakom

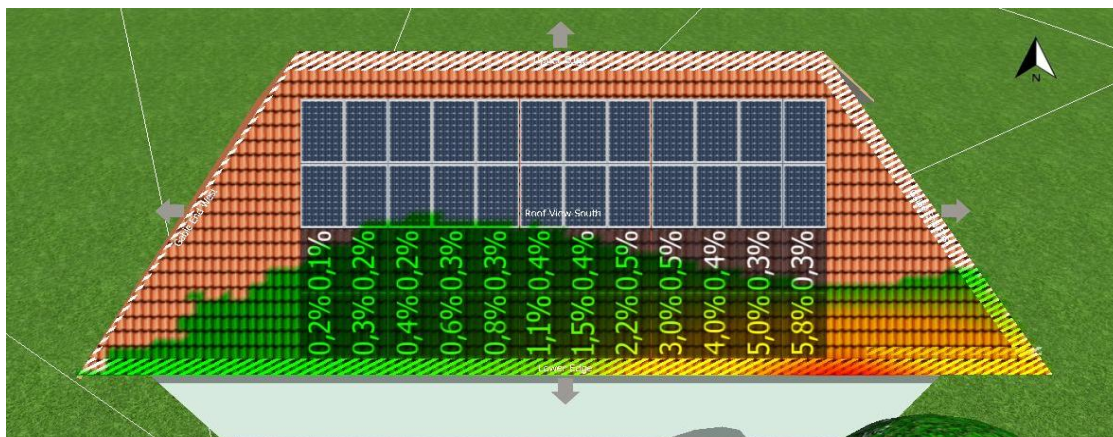
3.4. Rezultati simulacije za slučaj zasjenjenja krošnjom stabla

Simuliran je rad sustava kada su fotonaponski paneli pod utjecajem zasjenjenja stabla. Položaj stabla s krošnjom prikazan je na slici 6.



Slika 6. Vizualni prikaz položaja stabla s krošnjom u odnosu na objekt

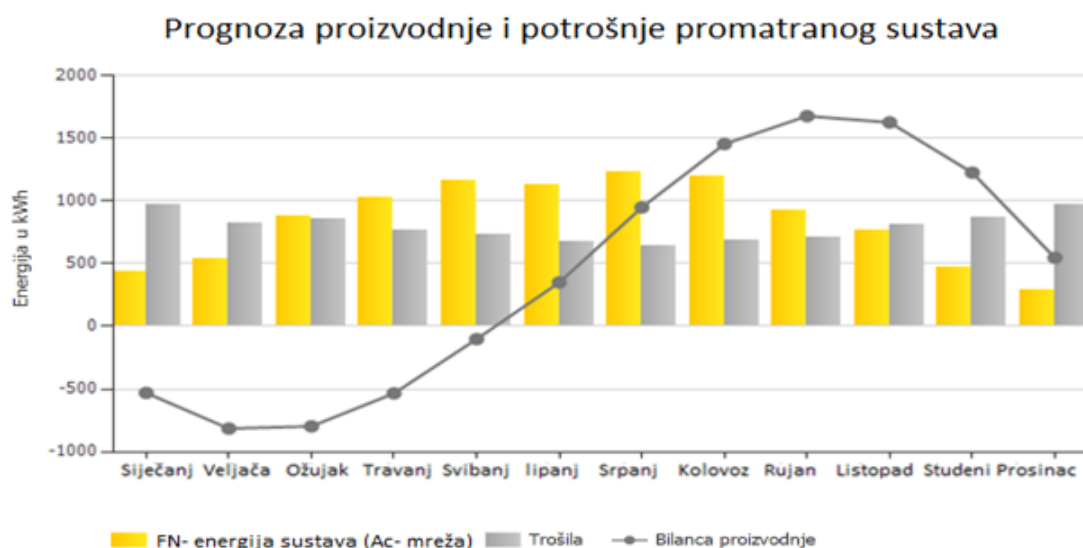
Na slici 7 prikazan je utjecaj zasjenjenja krošnjom stabla na fotonaponski sustav izražen u postotcima (%). Rezultati simulacije prikazani su u tablici 5 i slici 8.



Slika 7. Prikaz utjecaja zasjenjenja krošnjom stabla na fotonaponske module izražen u postotcima (%)

Tablica 5. Rezultati simulacije za slučaj zasjenjenja krošnjom stabla

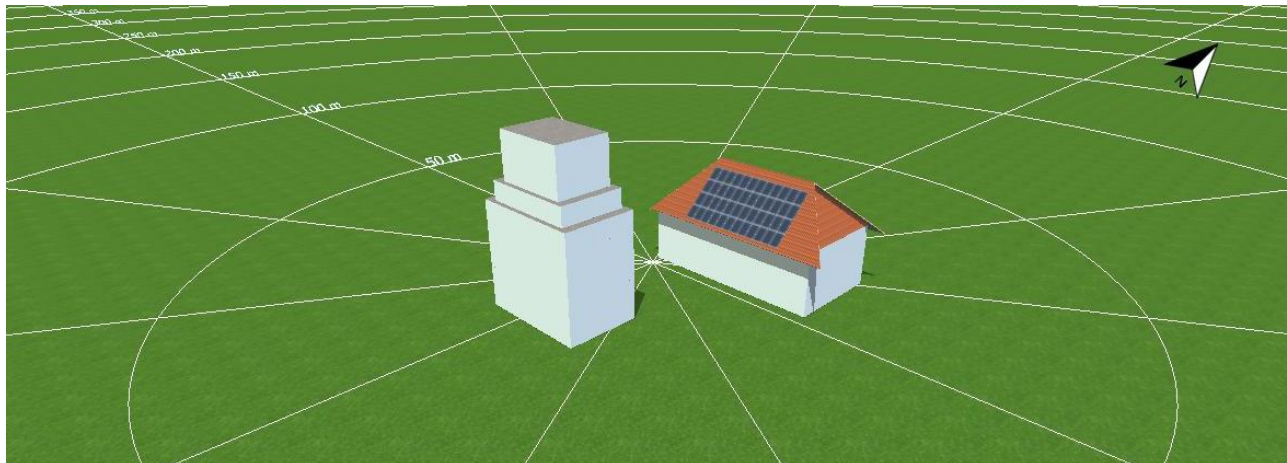
Ukupno proizvedena el. energija FN elektrane	10 071 kWh
Ukupna potrošnja sustava	9 500 kWh
Vlastita potrošnja namirena iz FN sustava	3 273 kWh
Vlastita potrošnja namirena iz mreže	6 227 kWh
Isporučena energija u mrežu	6 798 kWh
Ukupna bilanca sustava na kraju godine	571 kWh
Godišnji gubici proizvodnje FN elektrane zbog zasjenjenja (u odnosu na osnovni slučaj)	1,67 %



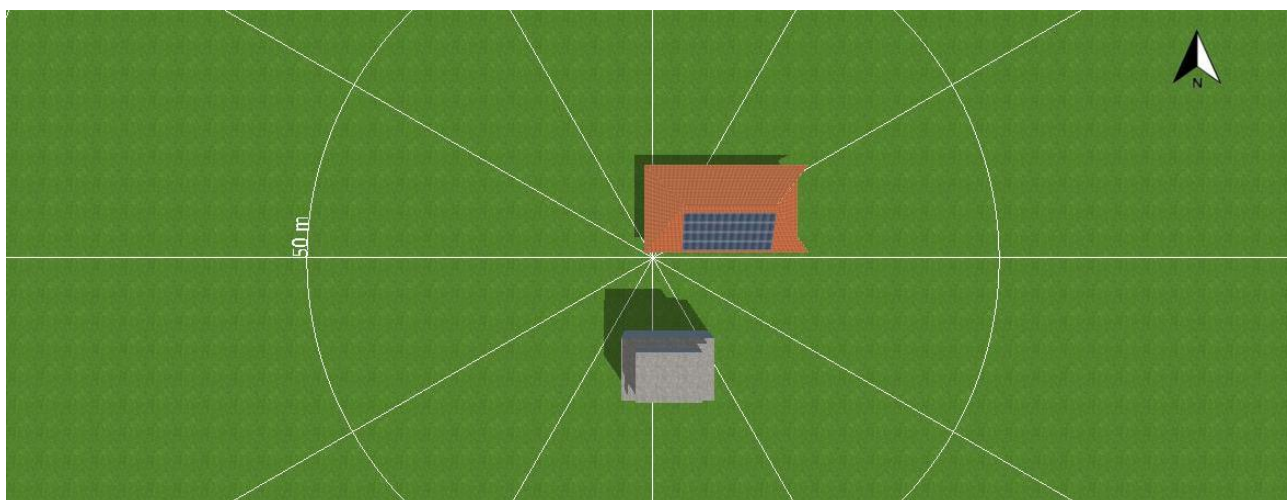
Slika 8. Proizvodnja i potrošnja promatranog sustava prikazana po mjesecima za slučaj zasjenjenja krošnjom stabla

3.5. Rezultati simulacije za slučaj zasjenjenja susjednim objektom

Za slučaj zasjenjenja susjednim objektom modelirana je zgrada čiji se položaj u odnosu na promatrani sustav može vidjeti na slikama 9 i 10.

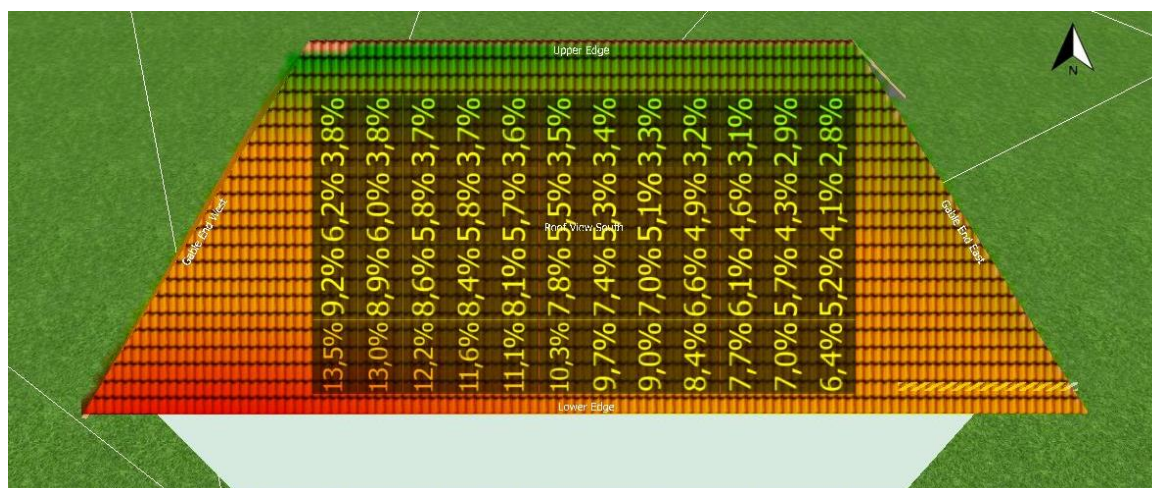


Slika 9. Vizualni prikaz položaja zgrade u odnosu na objekt s instaliranom FN elektranom



Slika 10. Vizualni prikaz položaja zgrade u odnosu na objekt s instaliranom FN elektranom (tlocrt)

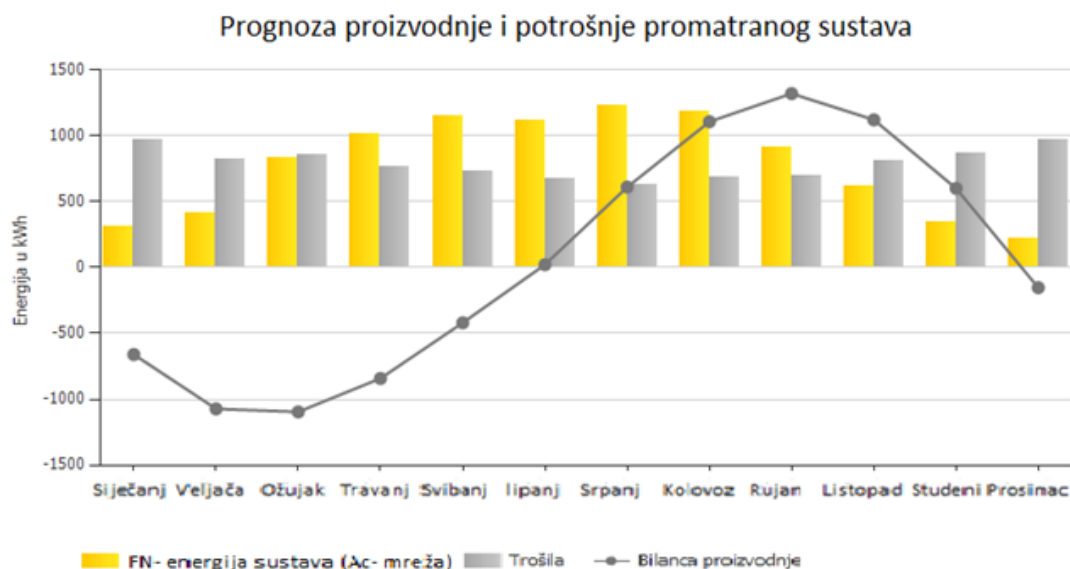
Na slici 11 prikazan je utjecaj zasjenjenja zgrade na fotonaponski sustav izražen u postotcima (%). Rezultati simulacije prikazani su u tablici 6. U odnosu na prethodne slučajeve, ovdje dolazi do značajnog zasjenjenja te umanjenja očekivane proizvodnje FN sustava. Na slici 12 prikazana je prognoza mjesečne proizvodnje i potrošnje promatranog sustava te bilanca proizvodnje slučaj zasjenjenja susjednim objektom.



Slika 11. Prikaz utjecaja zasjenjenja susjednim objektom na fotonaponske panele izražen u postocima (%)

Tablica 6. Rezultati simulacije za slučaj zasjenjenja susjednom zgradom

Ukupno proizvedena el. energija FN elektrane	9 371 kWh
Ukupna potrošnja sustava	9 500 kWh
Vlastita potrošnja namirena iz FN sustava	3 185 kWh
Vlastita potrošnja namirena iz mreže	6 315 kWh
Isporučena energija u mrežu	6.186 kWh
Ukupna bilanca sustava na kraju godine	-129 kWh
Godišnji gubici proizvodnje FN elektrane zbog zasjenjenja (u odnosu na osnovni slučaj)	8.5 %



Slika 12. Proizvodnja i potrošnja promatranog sustava prikazana po mjesecima za slučaj zasjenjenja susjednim objektom

Tablica 7. Sumarni rezultati simulacija

	Scenariji simulacije			
	Bez zasjenjenja	Zasjenjenje dimnjakom	Zasjenjenje krošnjom stabla	Zasjenjenje susjednim objektom
Ukupna bilanca sustava na kraju godine	742 kWh	638 kWh	571 kWh	-129 kWh
Godišnji gubici proizvodnje FN elektrane zbog zasjenjenja (u odnosu na osnovni slučaj)	0	1,025 %	1,67 %	8.5 %

4. Zaključak

Zasjenjenje fotonaponskog modula ima veliki utjecaj na proizvodnju električne energije FN elektrane. Utjecaj zasjenjenja može se djelomično ublažiti dodavanjem premosne diode. U ovome radu dana je analiza utjecaja zasjenjenja promatrane FN elektrane za slučajeve zasjenjenja dimnjakom, krošnjom stabla i susjednim objektom. U slučaju zasjenjenja dimnjakom koji se nalazi zapadno od FN sustava, do zasjenjenja dolazi tek kada se sunce nalazi na zapadu, godišnje se proizvede 104 MWh manje u odnosu na osnovni slučaj bez zasjenjenja. U slučaju zasjenjenja krošnjom stabla utjecaj zasjenjenja je veći u odnosu na zasjenjenje dimnjakom budući da je stablo smješteno na istočnoj strani, ispred FN sustava. Najveći utjecaj uočljiv je u slučaju zasjenjenja sa susjednim objektom. Iako je zgrada smještena na zapadnoj strani ispred objekta, zbog njene visine dolazi do značajnog zasjenjenja FN sustava u poslijepodnevnim satima što rezultira s 871 MWh manje proizvedene električne energije godišnje u odnosu na slučaj bez zasjenjenja.

5. Literatura

- [1] Jäger-Waldau, Arnulf. PV Status Report 2016. JCR, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2016. (ISBN 978-92-79-63054-5)
- [2] Službena stranica Hrvatskog operatora tržišta električne energije, HROTE, dostupno na: www.hrote.hr (pristupljeno 8.6.2017.)
- [3] Šljivac, Damir; Topić, Danijel. Materijali s predavanja FN sustavi. Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek, 2017.
- [4] Radmanović, Ivan. Simulacija utjecaja zasjenjenja na proizvodnju električne energije fotonaponske elektrane. Diplomski rad, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija, Osijek, 2017.
- [5] Topić, Danijel; Knežević, Goran; Fekete, Krešimir. The mathematical model for finding an optimal PV system configuration for the given installation area providing a maximal lifetime profit // *Solar Energy*, 144(2017); 750-757 (ISSN ISSN: 0038-092X)