

UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET U BEOGRADU

Vladan R. Durković

RAZVOJ NOVIH TEHNIČKIH RJEŠENJA I
MATEMATIČKIH MODELA ZA ANALIZU
PROIZVODNJE FOTONAPONSKIH ELEKTRANA
VELIKE SNAGE

Doktorska disertacija

Beograd, 2021

University of Belgrade
School of Electrical Engineering

Vladan R. Durković

DEVELOPMENT OF NEW TECHNICAL
SOLUTIONS AND MATHEMATICAL MODELS
FOR PRODUCTION ANALYSIS OF LARGE
PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2021

PODACI O MENTORU I ČLANOVIMA KOMISIJE:

MENTOR:

dr Željko Đurišić, vanredni profesor,
(Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet)

ČLANOVI KOMISIJE:

dr Željko Đurišić, vanredni profesor,
(Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet)

dr Jovan Mikulović, redovni profesor,
(Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet)

dr Čedomir Zeljković, vanredni profesor,
(Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet)

dr Zoran Radaković, redovni profesor,
(Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet)

Datum usmene odbrane: _____

ZAHVALNICA

Zahvalnost izražavam mentoru dr Željku Đurišiću vanrednom profesoru na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu za višegodišnju pomoć i usmjeravanje u mom ukupnom stručnom i naučnom radu a posebno za dragocjene savjete i prijateljsku podršku u toku izrade ove disertacije.

RAZVOJ NOVIH TEHNIČKIH RJEŠENJA I MATEMATIČKIH MODELA ZA ANALIZU PROIZVODNJE FOTONAPONSKIH ELEKTRANA VELIKE SNAGE

Rezime:

Predmet doktorske disertacije je razvoj novih tehničkih rješenja i matematičkih modela za analizu proizvodnje fotonaponskih elektrana velike snage. Najvažniji doprinosi disertacije su sljedeći:

1. Predstavljeno je idejno rješenje koncepta rotirajuće plivajuće fotonaponske elektrane

Koncept plivajuće fotonaponske elektrane je jedno od mogućih rješenja za smanjenje uzurpacije relativno velikih površina zemljišta koje je neophodno za gradnju fotonaponskih elektrana velike instalisane snage. Mirne, neaktivne vodene površine su potencijalne lokacije za plivajuće fotonaponske elektrane koje se sastoje od platforme na kojoj su postavljeni fotonaponski moduli. Izmještanjem fotonaponskih elektrana sa kopna na neaktivne vodene površine kao na primjer akumulaciona jezera, rezervoare, bazene, oslobađa se zemljište za druge namjene a ujedno se povećava efikasnost pretvaranja sunčeve u električnu energiju. Povećanje efikasnosti pretvaranja sunčeve u električnu energiju proizlazi iz činjenice da je temperatura ambijenta iznad vode manja u odnosu na temperaturu iznad kopna. U disertaciji je predloženi mehanizam koji omogućava da platforma plivajuće fotonaponske elektrane prati azimutni ugao Sunca. Predložena rotirajuća platforma omogućava značajno veću proizvodnju plivajuće fotonaponske elektrane u odnosu na postojeća rešenja za plivajuće fotonaponske elektrane. Postojeća rješenja za plivajuće fotonaponske elektrane podrazumijevaju fiksiranu platformu, pa je samim time i azimutni ugao takvih elektrana fiksiran. Koristeći poznati model za proračun iradijacije i proizvodnje analiziranih koncepta plivajućih fotonaponskih elektrana dobijeni rezultati pokazuju da je sa predloženim rješenjem moguće dobiti značajno veću proizvodnju u odnosu na postojeća rješenja za plivajuće fotonaponske elektrane. Sprovedena ekonomska analiza za dvije konkretne lokacije, u kojima je usvojeno da se proizvedena električna energija otkupljuje po tržišnim cijenama, ukazuje da ovakve elektrane imaju i ekonomsku opravdanost. U ovoj disertaciji je pokazano da smanjenje ispravanja vode sa otvorenih vodenih površina na koje su postavljene fotonaponske elektrane pored ekoloških ima i ekonomskih benefita ukoliko se takve elektrane postave na akumulacionim jezerima hidroelektrana. Ulazni podaci za sprovedene analize su višegodišnji mjerni meteo podaci, a za tehničke podatke fotonaponskih modula usvojene su tipične vrijednosti za realne fotonaponske module.

2. Predstavljeno je rješenje za unapređenje rotirajućih plivajućih fotonaponskih elektrana

U dosadašnjoj literaturi reflektori, napravljeni od različitih materijala, su prepoznati kao potencijalno efikasna mjera za povećanje tehno-ekonomske efikasnosti fotonaponskih elektrana. S obzirom na to da je predmet istraživanja disertacije fotonaponske elektrane velike snage nameće se zahtjev da novčana ulaganja u reflektore moraju biti značajno manja u odnosu na investiciju u fotonaponske module i priključnu opremu. Shodno tome, prethodni zahtjev sugerise da je za reflektore pogodno koristiti aluminijske ploče i folije. U disertaciji je predstavljeno idejno rješenje fotonaponske elektrane gdje su reflektori postavljeni između dva fotonaponska reda tako da spajaju gornju ivicu jednog reda i donju ivicu drugog fotonaponskog reda sa uključenim prostorom za održavanje modula. S obzirom na to da se radi o rotirajućim plivajućim fotonaponskim elektrana, optimalni nagibni ugao fotonaponskih redova kod ovakvih elektrana je veći od fotonaponskih elektrana sa fiksnim azimutnim uglom. U disertaciji je pokazano da je zbog većeg nagibnog ugla fotonaponskih redova i praćenja azimutnog ugla Sunca predloženim rješenjem moguće dobiti značajno veću proizvodnju i manju cijenu proizvedenog kWh u odnosu na postojeća rješenja

plivajućih fotonaponskih elektrana sa i bez aluminijumskih reflektora. Sprovedena analiza se bazira na satnim meteo podacima uvažavajući najvažnije tehničke karakteristike plivajućih fotonaponskih elektrana.

3. Predložen je novi analitički model za proračun iradijacije kod velikih fotonaponskih elektrana sa modulima sa dvostrano aktivnim površinama

Razvoj tehnologije proizvodnje modula je omogućio da su fotonaponski moduli sa dvostrano aktivnim površinama današnja realnost. Fotonaponski moduli sa dvostrano aktivnim površinama omogućavaju da se povećava efikasnost pretvaranja sunčeve u električnu energiju na istoj površini koju bi zauzela fotonaponska elektrana sa jednostrano aktivnim površinama. Karakteristika fotonaponskih modula sa dvostrano aktivnim površinama je značajno veće učešće reflektovane komponente sunčevog zračenja u odnosu na fotonaponske elektrane sa jednostrano aktivnim površinama. Postojeći model iradijacije, često korišćen u literaturi, za proračun proizvodnje električne energije iz velikih fotonaponskih elektrana pretpostavlja da na prostor između dva susjedna reda pada cjelokupna difuziona iradijacija. Ovaj opšte prihvaćeni model pretpostavlja da na prostor između dva fotonaponska reda pada isti iznos difuzione iradijacije na zasjenčeni i nezasjenčeni dio prostora između dva fotonaponska reda. Upravo, veličina prostora je u direktnoj zavisnosti sa doprinosom reflektovane komponente u ukupnoj proizvodnji velikih fotonaponskih elektrana realizovanih sa modulima sa dvostrano aktivnim površinama. Uvažavajući značaj reflektovane komponente kod velikih fotonaponskih elektrana, u ovoj disertaciji je predložen novi analitički model za proračun iradijacije posebno pogodan za velike fotonaponske elektrane. Ovaj model iradijacije uzima u obzir da na zasjenčeni i nezasjenčeni dio prostora ne pada cjelokupna difuziona iradijacija kao i da pomenuta dva dijela prostora nijesu ozračena sa istom količinom sunčeve energije. Novi analitički model, uvažavajući fizičke karakteristike velikih fotonaponskih elektrana, omogućava precizniji proračun u odnosu na postojeći model iradijacije. Od značaja je naglasiti da predloženi model iradijacije je zasnovan na metodologiji proračuna faktora viđenja, koja se koristi i kod postojećeg modela iradijacije. Dobijeni rezultati ukazuju da odstupanje između predloženog i postojećeg modela iradijacije zavisi od tri tipična parametra fotonaponske elektrane: nagibnog ugla fotonaponskih redova, rastojanja između fotonaponskih redova i koeficijenta refleksije podloge između fotonaponskih redova. Predloženi model je testiran i na primjeru fotonaponske elektrane koja je orijentisana u pravcu istok-zapad a realizovana sa vertikalnim modulima sa dvostrano aktivnim površinama. Uvažavajući da je ovaj tip elektrane u literaturi prepoznat kao efikasna mjera za povećanje većeg učešća fotonaponskih elektrana u elektroenergetski sistem, detaljno su analizirane karakteristike ove elektrane. Sprovedena je uporedna analiza sa južno orijentisanim elektranama sa jednostranim modulima u planinskim uslovima. Pokazano je da se u ovakvim predjelima, usljed uticaja sniježnog prekrivača, vrlo malo razlikuje proizvodnja elektrane sa dvostrano aktivnim površinama koji su postavljeni vertikalno u odnosu na proizvodnju elektrane sa južno orijentisanim jednostranim modulima postavljenim pod optimalnim nagibnim uglom. Razvijeni model iradijacije je primjenjiv na satne meteo podatke, što omogućuje preciznu procjenu proizvodnje a time i procjenu tehno-ekonomskih indikatora ove elektrane. Važno je naglasiti da novi predloženi model nema ograničenja po pitanju najvažnijih tehničkih parametara fotonaponske elektrane.

4. Predložen je prošireni model za proizvodnju električne energije iz fotonaponskog modula koji obuhvata vremensku konstantu zagrijavanja modula

U literaturi se može naći veliki broj radova čija je tematika modelovanje i ispitivanje električnih osobina fotonaponskog modula. Takođe, značajan broj radova je posvećen istraživanju termičkih karakteristika fotonaponskih modula. Na osnovu prethodnih istraživanja prepoznato je da povećanje temperature iznad nominalne dovodi do pada efikasnosti fotonaponskih modula. Opšte prihvaćen pristup modelovanju uticaja temperature na proizvodnju fotonaponskih modula se zasniva na

stacionarnom modelu za proračun temperature modula. Drugim riječima, postojeći model ne uvažava činjenicu da prilikom promjene ambijentalnih uslova (iradijacije i/ili temperature) temperatura modula se ne mijenja skokovito već postepeno. Razlog za ovakvu pretpostavku je zbog toga što fotonaponski moduli, kao i svako fizičko tijelo, ima određenu termičku konstantu zagrijavanja. U disertaciji je prostim matematičkim aparatom izvršena modifikacija opšte prihvaćenog modela za proračun proizvodnje fotonaponskog modula sa ciljem uvažavanja vremenske konstante zagrijavanja modula. Dobijeni rezultati ukazuju na značaj obuhvatanja vremenske konstante zagrijavanja fotonaponskog modula tokom promjenljivo oblačnih dana. Takođe, pokazano je da tokom vedrih dana, kada nema naglih promjena ambijentalnih uslova, vremenska konstanta zagrijavanja modula se može zanemariti. Za potrebe sprovedene analize korišćeni su realni višegodišnji meteo podaci.

Ključne riječi: fotonaponska elektrana, efikasnost, fotonaponski moduli sa dvostrano aktivnim površinama, plivajuće fotonaponske elektrane, reflektori, temperatura.

Naučna oblast: Tehnika - Elektrotehnika.

Uža naučna oblast: Elektroenergetski sistemi.

DEVELOPMENT OF NEW TECHNICAL SOLUTIONS AND MATHEMATICAL MODELS FOR PRODUCTION ANALYSIS OF LARGE PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS

Abstract:

The subject of the doctoral dissertation is the development of new technical solutions and mathematical models for the analysis of production large photovoltaic power plants. The most important contributions of the dissertation are the following:

1. A conceptual design for the concept of a rotating floating photovoltaic power plant has been presented.

The concept of a floating photovoltaic power plant is one of the possible solutions for reducing the occupation of relatively large portions of land which are required for building large photovoltaic power plants. Calm and inactive water areas represent possible locations for floating photovoltaic power plants which consist of a platform where the photovoltaic modules have been placed. Relocation of photovoltaic power plants from the land to the inactive water surfaces such as accumulation lakes, reservoirs and basins makes the land available for other purposes and at the same time increases the efficiency of conversion solar into electric power. An increase in efficiency of conversion solar into electric power emerges from the fact the temperature of the ambient above the water is less than the temperature above the land. The dissertation contains the suggested mechanism which enables the platform of the floating photovoltaic power plant to adjust to the azimuth angle of the Sun. The suggested rotating platform enables a significantly larger production of the floating photovoltaic power plant when compared to the existing solutions for the floating photovoltaic power plants. The existing solutions for the floating photovoltaic power plants implicate a fixed platform which also causes the azimuth angle of such platforms to be fixed. The results of using the familiar model for calculation of irradiation and production of analysed concepts of floating photovoltaic power plants indicate that the proposed solution would make it possible to get a significantly greater production in comparison to existing solutions for floating photovoltaic power plants. The conducted economic analysis for two specific locations, in which it was adopted that the produced electric energy would be sold at market prices indicates that such electric plants have an economic justification as well. This dissertation shows that reduction in evaporation of water from open water surfaces on which the photovoltaic power plants have been installed has an economic benefit in addition to the ecologic benefit if such power plants are installed on accumulation lakes of hydro-power plants. The input data for the conducted analyses are the meteorological values for multiple years while the typical values for real photovoltaic modules served as the technical data of photovoltaic modules.

2. A solution for enhancement of rotating floating photovoltaic power plants has been presented.

The current literature recognises the reflectors, made from different materials, as the potentially efficient measure for increasing the techno-economic efficiency of photovoltaic power plants. Having in mind that the scope of research of the dissertation is large photovoltaic power plants there is a request that financial investments into the reflectors must be significantly smaller than the investments into photovoltaic modules and connecting equipment. In accordance therewith, the former request suggests that aluminium sheets and foils are convenient to be used for reflectors. The dissertation displays a conceptual solution of a photovoltaic power plant where the reflectors are placed between two photovoltaic rows so that they connect the upper edge of one row with the lower edge of another photovoltaic row with included space for maintenance of modules. Since it is

a rotating floating photovoltaic power plant, the optimal tilt angle of photovoltaic rows in such power plants is larger than with the photovoltaic power plants with an azimuth angle. The dissertation shows that it is possible to obtain a significantly larger production and the reduced price of produced kWh with the suggested solution in comparison to the existing solutions of floating photovoltaic power plants with and without aluminium reflectors, due to the larger tilt angle of photovoltaic rows and by following the azimuth angle of the Sun. The conducted analysis is based on hourly meteorological data with the included most important technical characteristics of floating photovoltaic power plants.

3. A new analytical model for calculating the irradiation on large photovoltaic power plants with modules on two-sided active surfaces has been proposed.

The development of technology in production of modules has made it possible for photovoltaic modules with two-sided active surfaces to be a reality today. Photovoltaic modules with two-sided active surfaces make it possible to increase the efficiency conversion of the solar energy into electric energy on the same surface which would be occupied by photovoltaic power plants with single-sided active surfaces. The characteristic of photovoltaic modules with two-sided active surfaces is a significantly larger share of the reflected component of solar irradiation in comparison to single-sided active surface photovoltaic power plants. The existing model of irradiation, which is often used in literature, for calculating the production of power from large photovoltaic power plants assumes that the complete diffusion irradiation falls onto the space between two photovoltaic rows. This generally accepted model assumes that the same amount of diffusion irradiation falls onto the area between two photovoltaic rows to the shaded and the unshaded part of the area between two photovoltaic rows. Precisely, the size of the space is directly dependent on the contribution of the reflected component in the total production of large photovoltaic power plants which consist of photovoltaic modules with two-sided active surfaces. By recognizing the importance of the reflected component in large photovoltaic power plants, a new analytical model for calculation of irradiation which is especially suitable for large photovoltaic power plants is proposed within this dissertation. This model of irradiation takes into account that the shaded and unshaded parts of the space do not receive the entire diffusion irradiation and that the mentioned two parts of the space are not irradiated with the same amount of solar energy. A new analytical model, which takes into consideration the physical characteristics of large photovoltaic power plants, enables a more precise calculation in comparison to the existing model of irradiation. It is important to mention that the proposed model of irradiation is based on the methodology of calculation of the view factor, which is also used with the existing model of irradiation. Obtained results indicate that the deviation between the proposed and the existing model of irradiation depends on three typical parameters for photovoltaic power plants: tilt angle of photovoltaic rows, distance between photovoltaic rows and the coefficient of reflection of surface between photovoltaic rows. The proposed model has been tested on an example of a photovoltaic power plant which is oriented towards east-west and which is completed with vertical modules with two-sided active surfaces. Taking into consideration that this type of a power plant is recognized within the literature as an effective measure to increase the greater share of photovoltaic power plants in the electric power system, the characteristics of this power plant were analysed in detail. A comparative analysis with south oriented power plants containing one-sided modules in mountain conditions. It was shown that in such areas, due to the influence of the layer of snow, the production of a power plant with two-sided active surfaces which were vertically installed barely differs from the production of power plants with south oriented one-sided modules installed under an optimal tilt angle. The developed model of irradiation is applicable to hourly meteorological data, which enables an accurate assessment of production and thus the assessment of techno-economic indicators of this power plant. It is important to point out that the new proposed model does not have any restrictions on most important technical parameters of a photovoltaic power plant.

4. An extended model for production of the photovoltaic module which includes the thermal constant of module has been proposed.

The literature provides a large number of works based on modelling and examining electrical characteristics of the photovoltaic module. A significant number of works is also dedicated on research of thermal characteristics of photovoltaic modules. Previous researches have shown that increasing the temperature above nominal leads to the decrease in efficiency of photovoltaic modules. A generally accepted approach to modelling of influence of temperature on production of photovoltaic modules is based on the stationary model for calculating the temperature of the module. In other words, the existing model does not take into consideration the fact that while a change is recorded in ambient conditions (irradiation and/or temperature), the module temperature is not changing rapidly but rather in a gradual manner. The reason for such an assumption is that photovoltaic modules, as the case is with all physical bodies, has a determined thermal constant of heating. The dissertation includes a modification of the generally accepted model for calculating the production of a photovoltaic module by a simple mathematical tool with the goal to recognise the thermal constant of module. The obtained results indicate on significance of including the thermal constant of a photovoltaic module during variable cloudy days. It was also indicated that, during clear days, with no sudden changes in ambient conditions, thermal constant of module can be disregarded. Real multiple year meteorological data was used for the needs of the conducted analysis.

Keywords: photovoltaic power plant, efficiency, two sided active photovoltaic module, floating photovoltaic plant, reflectors, temperature.

Scientific filed: Tehnical science – Electrcial engineering.

Scientific subfiled: Power systems.

Sadržaj

1. UVOD	1
2. PREGLED TEHNOLOGIJA I TRENDOVA FN ELEKTRANA VELIKE SNAGE	5
3. UNAPREĐENJE EFIKASNOSTI PFN ELEKTRANA INSTALISANIH NA VODENIM POVRŠINAMA	8
3.1. Uvod	8
3.2. Koncept rotirajućih PFN elektrana	8
3.3. Uticaj vjetra na predloženu koncepciju RPFN elektrane	9
3.4. Tehno-ekonomska analiza predloženog tehničkog rješenja – studija slučaja RPFN elektrana na Skadarskom jezeru	11
3.4.1. Osnovne tehničke karakteristike predložene RPFN elektrane	14
3.4.2. Komparativna analiza predloženog i postojećih koncepata FN elektrana	17
3.3.3. Efekti proizvodnje RPFN elektrane na pokrivanje dijela potrošnje KAP-a	18
3.3.4. Ekonomska analiza RPFN elektrane	19
3.3.5. Ekološki uticaj RPFN elektrane na Skadarskom jezeru	21
3.4. Studija slučaja RPFN elektrane na jezeru Zaovine	26
3.4.1. Idejno rješenje RPFN elektrane na jezeru Zaovine sa osvrtom na tehničke, ekonomske i ekološke procjene	29
3.4.2. Uticaj predložene RPFN elektrane na povećanje efikasnosti RHE Bajina Bašta	32
4. UNAPREĐENJE KONCEPTA RPFN ELEKTRANE PRIMJENOM ALUMINIJUMSKIH REFLEKTORA	35
4.1. Uvod	35
4.2. Opis tehničkog rješenja i metodologije proračuna proizvodnje predložene RPFN elektrane sa reflektorima	36
4.3. Model iradijacije za predloženu RFPV elektranu sa reflektorima	36
4.4. Tehno-ekonomske karakteristike predložene RPFN sa reflektorima	41
5. NOVI MATEMATIČKI MODEL ZA PRORAČUN IRADIJACIJE KOD VELIKIH FN ELEKTRANA SA I BEZ REFLEKTORA	49
5.1. Uvod	49
5.2. Definisane novog matematičkog modela za proračun iradijacije	51
5.3. Usporedna analiza predloženog i postojećeg modela iradijacije	56
5.3.1. Analiza uticaja koeficijenta refleksije, rastojanja između FN redova i nagibnog ugla FN panela na proizvodnju električne energije	56
5.3.2. Predloženi model iradijacije sa segmentiranjem površina	61
5.3.3. Poređenje predloženog modela sa segmentacijom i predloženog modela bez segmentacije	65
5.3.4. Poređenje predloženog modela iradijacije sa segmentacijom i postojećeg modela sa segmentacijom	69
5.4. Komparativna tehno-ekonomska analiza bFN i mFN elektrane	72
5.4.1. Karakteristike proizvodnje bFN elektrane	72
5.4.2. Poređenje tehno-ekonomskih parametara bFN i mFN elektrane	79

5.4.3.	Određivanje granične cijena reflektora	84
5.5	Utjecaj horizontalnog reflektora na karakteristike bFN elektrane sa vertikalno postavljenim FN panelima	86
5.5.1.	Uvod.....	86
5.5.2.	Tehno-ekonomske karakteristike vFN elektrane	86
5.5.3.	Analiza proizvodnje vFN elektrane u regionima sa izraženim sniježnim padavinama	93
6.	UTICAJ VREMENSKE KONSTANTE ZAGRIJAVANJA MODULA NA IZLAZNE ELEKTRIČNE KARAKTERISTIKE FN MODULA	96
6.1.	Uvod	96
6.2.	Modelovanje FN modula	97
6.3.	Model FN modula sa uvažavanjem vremenske konstante zagrijavanja FN modula	99
6.4.	Numeričke simulacije i diskusija rezultata	100
7.	Zaključak	107
	LITERATURA	110

Lista slika

Slika 1.1. Trend porasta instalisane snage obnovljivih izvora električne energije u svijetu od 2010. godine do 2019. godine.....	1
Slika 1.2. Procentualno učešće pojedinih elektrana u proizvodnji električne energije u EU-27	2
Slika 2.1. Skica plivajućih nosača za FN panele koji je razvila francuska firma <i>Ciel&Terre</i> [24].....	6
Slika 2.2. PFN elektrana u Holandiji, čija je instalisana snaga 1.85 MWp [26].....	6
Slika 2.3. FN elektrana sa vertikalno postavljenim FN panelima sa dvostrano aktivnom površinom	7
Slika 3.1. Koncept predložene platforme za RPFN elektranu	9
Slika 3.2. Ilustracija za koeficijent sile pritiska vjetra (C_F) na FN panel pri pozitivnom (a) i negativnom smjeru (b) djelovanja vjetra	10
Slika 3.3. Pozicioniranje FN panela pri jakom vjetru	10
Slika 3.4. Dijagram potrošnje KAP-a za 2014. godinu.....	12
Slika 3.5. Dio Skadarskog jezera koji predstavlja potencijalnu lokaciju RPFN elektrane	13
Slika 3.6. Konfiguracija perspektivne RPFN elektrane na Skadarskom jezeru.....	14
Slika 3.7. Zavisnost dnevne insolacije i nagibnog ugla FN panela.....	14
Slika 3.8. Proračun minimalnog rastojanja između susjednih nizova FN panela u RPFN [40]	15
Slika 3.9. Mjesečna proizvodnja predložene RPFN elektrane.....	16
Slika 3.10. Dnevna proizvodnja RPFN, PFN i ZFN elektrane	18
Slika 3.11. Prosječna dnevna proizvodnja RPFN elektrane i dnevna potrošnja KAP-a.....	19
Slika 3.12. Zavisnost troškova proizvodnje RPFN na Skadarskom jezeru od interesne stope.....	21
Slika 3.13. Mapa zoniranja Nacionalnog parka Skadarsko jezero.....	22
Slika 3.14. Prosječno mjesečno smanjenja kote površine Skadarskog jezera usljed isparavanja vode	25
Slika 3.15. Dnevno prosječno mjesečno smanjenje isparavanja vode sa Skadarskog jezera nakon izgradnje RPFN elektrane	26
Slika 3.16. Promjena kote površine jezera Zaovine u toku 2016. godine.	27
Slika 3.17. Zaovinsko jezero sa naznačenom konturom kada je korisna akumulacija prazna	27
Slika 3.18. Komponente horizontalne iradijacije za prosječan dan u toku 2014. godine	28
Slika 3.19. Izmjerene temperature vazduha i vode na jezeru Zaovini u toku 2016. godine	28
Slika 3.20. Idejno rješenje RPFN elektrana na jezeru Zaovine	30
Slika 3.21. Idejno rješenje povezivanja FN elektrane Zaovine na elektroenergetski sistem	30
Slika 3.22. Mapa zoniranja nacionalnog parka Tara sa naznačenom lokacijom perspektivne FN elektrane na jezeru Zaovine i trasom priključnog dalekovoda	31
Slika 3.23. Zavisnost troškova proizvodnje RPFN elektrane Zaovine od interesne stope.....	31
Slika 3.24. Prosječno mjesečno smanjenje kote površine jezera Zaovine usljed isparavanja vode ..	33
Slika 3.25. Akumulisana energije 1 cm vodenog stuba u jezeru Zaovine pri različitim kotama površine jezera	33
Slika 4.1. Rotirajuća platforma sa tri FN reda	36
Slika 4.2. Zarotirani jedan FN red i reflektor za ugao od Σ_r u suprotnom smjeru kazaljke na satu ..	38
Slika 4.3. Sunčevi zraci koji se odbijaju od tačke x ne padaju na FN red	39
Slika 4.4. Sunčevi zraci koji se odbijaju od tačke x padaju na FN red	39
Slika 4.5. Procentualno poređenje proizvodnje varijante RPFN 1 u odnosu na varijantu RPFN 0 elektrane za različite nagibne uglove FN redova i rastojanja između FN redova.....	43

Slika 4.6. Procentualno poređenje proizvodnje varijante RPFN 2 u odnosu na varijantu RPFN 0 elektrane za različite nagibne uglove FN redova i rastojanja između FN redova.....	43
Slika 4.7. Doprinos reflektora u proizvodnji RPFN 1 elektrane po m ² površine reflektora u zavisnosti od nagibnog ugla FN modula i rastojanja između FN redova	44
Slika 4.8. Godišnji dijagram proizvodnje RPFN 1 elektrane po m ² površine FN modula u zavisnosti od nagibnog ugla FN redova i rastojanja između FN redova	45
Slika 4.9. Mjesečna proizvodnja RPFN 1 po m ² površine FN panela (plava boja – direktna komponenta solarnog zračenja koja pada na FN panel; zelena boja – difuziona komponenta solarnog zračenja koja pada na FN panel, crvena boja – reflektovana komponenta solarnog zračenja koja pada na FN panel)	46
Slika 4.10. Prosječni dnevni dijagram proizvodnje po m ² površine FN panela za RPFN 1 i RPFN 0 za sljedeće vrijednosti upravljačkih promjenljivih: $D=10$ m, $\Sigma=45^0$	47
Slika 5.1. Tipičan izgled nekoliko FN redova elektrane.....	51
Slika 5.2. Faktor viđenja između dvije proizvoljne površine	53
Slika 5.3. Faktor viđenja između dvije beskonačno duge površine	53
Slika 5.4. Dužina zasjenčene i nezasjenčene površi između FN redova tokom godine	54
Slika 5.5. Ilustracija sljedećih faktora viđenja: F_{r-s}^f , F_{r-s}^r i $F_{sky \rightarrow s}$	55
Slika 5.6. Ilustracija sljedećih faktora viđenja: F_{ref-us}^f , F_{ref-us}^r i $F_{sky \rightarrow us}$	55
Slika 5.7. Faktori viđenja sa prednje strane FN reda u zavisnosti od D prema postojećem i predloženom modelu.....	58
Slika 5.8. Faktori viđenja sa zadnje strane FN reda u zavisnosti od D prema postojećem i predloženom modelu.....	58
Slika 5.9. Procentualna razlika između dva modela faktora viđenja u zavisnosti od D računata za prednju i zadnju stranu FN reda.....	59
Slika 5.10. Faktori viđenja sa prednje strane FN reda u zavisnosti od Σ prema postojećem i predloženom modelu.....	60
Slika 5.11. Faktori viđenja sa zadnje strane FN reda u zavisnosti od Σ prema postojećem i predloženom modelu.....	60
Slika 5.12. Procentualna razlika između vrijednosti faktora viđenja u zavisnosti od Σ proračunatih korišćenjem predloženog i postojećeg matematičkog modela.....	61
Slika 5.13. Prikaz segmentirana dva FN reda i segmentirano rastojanje između FN redova	62
Slika 5.14. Faktor viđenja sa prednje strane u zavisnosti od Σ za predloženi model bez segmentiranja (VF_n^F) i sa segmentiranjem površina (VF_{ns}^F)	66
Slika 5.15. Faktori viđenja sa zadnje strane u zavisnosti od Σ za predloženi model bez segmentiranja (VF_s^R) i sa segmentiranjem površina (VF_{ns}^R)	66
Slika 5.16. Faktori viđenja sa prednje strane u zavisnosti od D za predloženi model bez segmentiranja (VF_n^F) i sa segmentiranjem površina (VF_{ns}^F)	67
Slika 5.17. Faktori viđenja sa zadnje strane u zavisnosti od D za predloženi model bez segmentiranja (VF_n^R) i sa segmentiranjem površina (VF_{ns}^R)	67
Slika 5.18. Faktori viđenja sa prednje strane u zavisnosti od Σ za predloženi model sa segmentiranjem (VF_{ns}^F) i postojeći model sa segmentiranjem (VF_s^F)	69

Slika 5.19. Faktori viđenja sa zadnje strane u zavisnosti od Σ za predloženi model sa segmentiranjem (VF_{ns}^R) i postojeći model sa segmentiranjem (VF_s^R)	70
Slika 5.20. Faktori viđenja sa prednje strane u zavisnosti od D za predloženi model sa segmentiranjem (VF_{ns}^F) i postojeći model sa segmentiranjem (VF_s^F)	70
Slika 5.21. Faktori viđenja sa zadnje strane u zavisnosti od D za predloženi model sa segmentiranjem (VF_{ns}^R) i postojeći model sa segmentiranjem (VF_s^R)	71
Slika 5.22. Optimalni nagibni uglovi FN redova za različita rastojanja između FN redova i koeficijenta refleksije podloge između FN redova	73
Slika 5.23. Odnos insolacije koja pada na zadnju stranu i insolacije koja pada na prednju stranu FN redova postavljenih pod optimalnim fiksnim nagibnim uglom, za različite vrijednosti D i ρ	75
Slika 5.24. Odnos sunčeve energije koja dopijeva na prednju stranu FN redova i ukupne sunčeve energije koja pada na horizontalnu površinu bFN elektrane, za različite vrijednosti D i ρ	77
Slika 5.25. Odnos godišnje sunčeve energije koja dopijeva na zadnju stranu FN redova i sunčeve energije koja pada na horizontalnu površinu bFN elektrane, za različite vrijednosti D i ρ	78
Slika 5.26. Odnos godišnje sunčeve energije koja dopijeva na prednju i zadnju stranu FN redova i sunčeve energije koja pada na horizontalnu površinu bFN elektrane, za različite vrijednosti D i ρ	78
Slika 5.27. Doprinos pojedinih komponenti insolacije na proizvodnju električne energije bFN elektrana za svaki mjesec	79
Slika 5.28. Algoritamski koraci za rješavanje optimizacionih zadataka J_1 i J_2	81
Slika 5.29. Poređenje bFN i mFN elektrane prema proizvedenoj energiji i LCOE.....	83
Slika 5.30. Procentualno povećanje profita za Scenarije 2, 3 i 4 u odnosu na Scenario 1 za bFN i mFN elektrane.....	85
Slika 5.31. vFN elektrana orijentisana u pravcu istok-zapad.....	87
Slika 5.32. Prosječni dnevni dijagram proizvodnje vFN elektrane za tri različita koeficijenta refleksije reflektora za vrijednost rastojanja između FN redova od 4 m	88
Slika 5.33 Prosječni dnevni dijagram proizvodnje vFN elektrane za tri različita koeficijenta refleksije reflektora za vrijednost rastojanja između FN redova od 8 m	88
Slika 5.34. Prosječni dnevni dijagram proizvodnje vFN elektrane za tri različita koeficijenta refleksije reflektora za vrijednost rastojanja između FN redova od 12 m	89
Slika 5.35. Prosječni dnevni dijagram proizvodnje vFN elektrane za tri različite vrijednosti rastojanja između FN redova (4 m, 8 m i 12 m) pri čemu je koeficijent refleksije reflektora 0.5.....	89
Slika 5.36. Zavisnost godišnje proizvodnje vFN elektrane po m^2 površine FN panela od rastojanja između FN redova za različite koeficijente refleksije reflektora	90
Slika 5.37. Zavisnost troškova proizvodnje vFN elektrane od rastojanja između FN redova za različite koeficijente refleksije reflektora.	91
Slika 5.38. Prosječna cijena električne energije u toku 2019 godine.....	91
Slika 5.39. Zavisnost koeficijenta c_{PVM} u funkciji rastojanja između FN redova za različite koeficijente refleksije podloge između FN redova	92
Slika 5.40. Satna promjena snage vFN elektrane za četiri različita scenarija.....	93
Slika 6.1. Zamjenska električna šema FN panela	97
Slika 6.2. Zavisnost snage i napona FN modula pri različitim vrijednostima iradijacije	98
Slika 6.3. Dnevna horizontalna iradijacija za tipično oblačan dan	100
Slika 6.4. Ambijentalna temperatura za analizirani promjenljivo oblačan dan	101

Slika 6.5. Izlazna dnevna snaga FN modula za nekoliko vrijednosti vremenske konstante zagrijavanja modula	101
Slika 6.6. Izlazna snaga FN modula za oblačni dan za period od 13:20 h do 14:20 h.....	102
Slika 6.7. Horizontalna iradijacija i temperatura ambijenta za oblačan dan u periodu od 13:20 h i 14:20 h.....	102
Slika 6.8. Temperatura FN modula za vedar dan u period od 13:20 h do 14:20 h	103
Slika 6.9. Dnevna horizontalna iradijacija za tipično vedar dan.....	104
Slika 6.10. Ambijentalna temperatura za vedar dan	104
Slika 6.11. Izlazna dnevna snaga FN modula za nekoliko vrijednosti vremenske konstante zagrijavanja modula	105
Slika 6.12. Izlazna snaga FN modula za vedar dan od 13.40 h do 14.20 h	105
Slika 6.13. Horizontalna iradijacija i temperatura ambijenta za vedar dan u periodu od 13:20 h i 14:20 h.....	106
Slika 6.14. Temperatura FN modula za vedar dan u period od 13:20 h do 14:20 h	106

Lista tabela

Tabela 3.1. Horizontalna insolacija mikrolokacije i površinska temperatura vode jezera za prosječan dan u svakom mjesecu	12
Tabela 3.2. Mjesečna proizvodnja električne energije i dnevna insolacija koja pada na FN panele RPFN elektrane	17
Tabela 3.3. Godišnja proizvodnja i prosječna dnevna insolacija koja pada na FN panele kod: ZFN, PFN i RPFN elektrane iste snage na lokaciji Skadarsko jezero.....	17
Tabela 3.4. Procijenjeni ulazni ekonomski parametri za proračun IRR	21
Tabela 3.5. Ulazni meteorološki parametri i proračunato isparavanje vode sa Skadarskog jezera za prosječan dan u toku svakog mjeseca	25
Tabela 3.6. Prosječne dnevne insolacije na površini FN panela za različita razmatrana konceptijska rješenja FN elektrana	29
Tabela 3.7. Očekivana godišnja proizvodnje RPFN, PFN i ZFN elektrana na jezeru Zaovine.....	31
Tabela 3.8. Ulazni meteorološki parametri i proračunato isparavanje jezera Zaovine za prosječan dan u toku svakog mjeseca.....	32
Tabela 4.1. Prosječne mjesečne vrijednosti za horizontalnu insolaciju i temperaturu	41
Tabela 4.2. Usvojene vrijednosti za tehno-ekonomske parametre za RPFN elektranu sa reflektorima	41
Tabela 4.3. Razmatrani scenariji za RPFN elektranu	42
Tabela 4.4. Procentualno učešće direktne, difuzione i reflektovane komponente sunčevog zračenja koja pada na površinu FN panela za RPFN 1 elektranu po mjesecima	46
Tabela 4.5 Rezultati za $LCOE^P$, $LCOE^0$ i $\Delta LCOE$ za nekoliko vrijednosti Σ . Za D su usvojene sljedeće vrijednosti: 8 m, 9 m i 10 m	48
Tabela 4.6. Rezultati za $LCOE^P$, $LCOE^0$ i $\Delta LCOE$ za nekoliko vrijednosti Σ . Za D su usvojene sljedeće vrijednosti: 11 m i 12 m	48
Tabela 5.1. Numerički rezultati za Δw za nekoliko vrijednosti Σ i D i za koeficijente refleksije površine između FN redova u iznosu od 0.2 i 0.4.....	57
Tabela 5.2. Numerički rezultati za Δw za nekoliko vrijednosti Σ i D i za koeficijente refleksije površine između FN redova u iznosu od 0.6 i 0.8.....	57
Tabela 5.3. Reflektovana komponenta iradijacije prema modelima (5.1) i (5.15)	57
Tabela 5.4. Srednje vrijednosti faktora viđenja	65
Tabela 5.5. Numerički rezultati za Δw_p za nekoliko vrijednosti Σ i D i za koeficijente refleksije površine između FN redova u iznosu od 0.2 i 0.4.....	68
Tabela 5.6. Numerički rezultati za Δw_p za nekoliko vrijednosti Σ i D i za koeficijente refleksije površine između FN redova u iznosu od 0.6 i 0.8.....	68
Tabela 5.7. Numerički rezultati za Δw_s (%) za nekoliko vrijednosti Σ i D i za koeficijente refleksije površine između FN redova u iznosu od 0.2 i 0.4.....	71
Tabela 5.8. Numerički rezultati za Δw_s (%) za nekoliko vrijednosti Σ i D i za koeficijente refleksije podloge između FN redova u iznosu od 0.6 i 0.8	72
Tabela 5.9. Učešće pojedinih komponenti sunčevog zračenja u ukupnoj proizvodnji bFN elektrane	73
Tabela 5.10. Prosječna dnevna insolacija koja pada na prednju i zadnju stranu bFN panela za koeficijent refleksije površine između FN redova u iznosu od $\rho=0.2$ i $\rho=0.4$	74

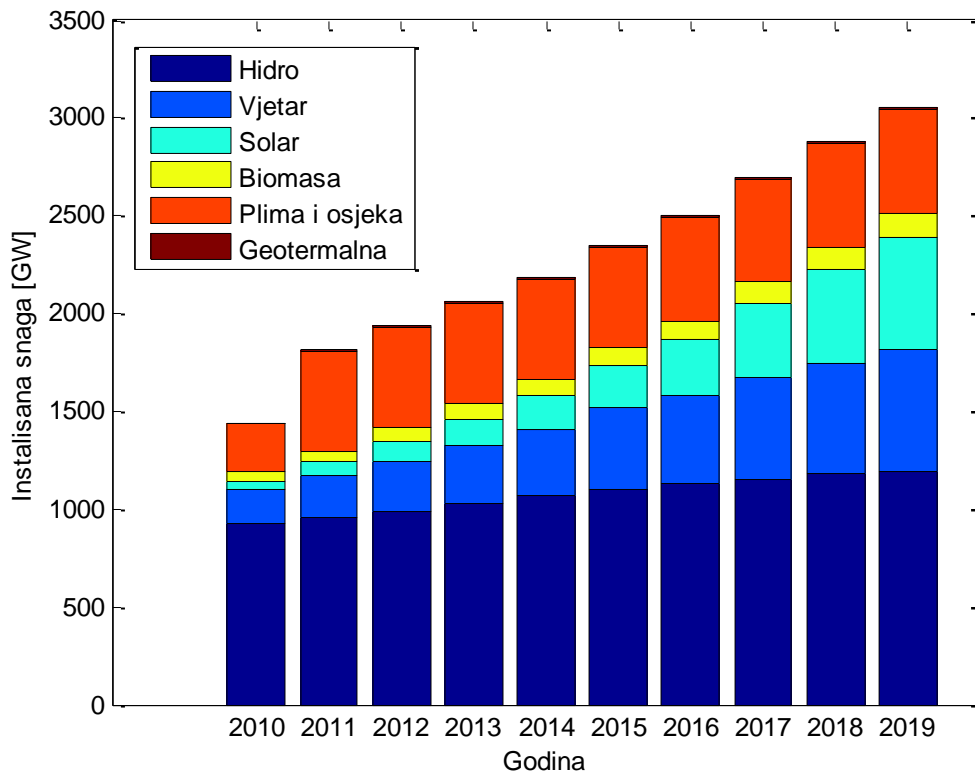
Tabela 5.11. Prosječna dnevna insolacija koja pada na prednju i zadnju stranu bFN panela za koeficijent refleksije površine između FN redova u iznosu od $\rho=0.6$ i $\rho=0.8$	74
Tabela 5.12. Prosječna dnevna sunčeva energija koja pada na horizontalnu površinu FN elektrane, prednju i zadnju stranu FN redova za koeficijent refleksije $\rho=0.2$ i $\rho=0.4$	76
Tabela 5.13. Prosječna dnevna sunčeva energija koja pada na horizontalnu površinu FN elektrane, prednju i zadnju stranu FN redova za koeficijent refleksije $\rho=0.6$ i $\rho=0.8$	76
Tabela 5.14. Karakteristike bFN elektrane	79
Tabela 5.15. Korišćene vrijednosti za proračun cijene proizvedene električne energije	80
Tabela 5.16. Rješenja optimizacionog zadatka J_1 za bFN elektranu	82
Tabela 5.17. Rješenja optimizacionog zadatka J_2 za bFN elektranu	82
Tabela 5.18. Rješenja optimizacionog zadatka J_1 za mFN elektranu	82
Tabela 5.19. Rješenja optimizacionog zadatka J_2 za mFN elektranu	82
Tabela 5.20. Rješenja optimizacionog zadatka J_3 za bFN elektranu	84
Tabela 5.21. Rješenja optimizacionog zadatka J_3 za mFN elektranu	84
Tabela 5.22. Granična cijena reflektora za mFN i bFN elektrane	86
Tabela 5.23. Meteo podaci za mikrolokaciju Duga Poljana	94
Tabela 5.24. Komparativno poređenje mFN i vFN elektrane instalisane snage 8 MW _p	95
Tabela 5.25. Uticaj snijega na proizvodnju mFN i vFN elektrane.	95
Tabela 6.1. Tipične vrijednosti FN modula	98

Lista simbola

FN elektrana/modul	fotonaponska elektrana/modul
PFN elektrana	plivajuća fotonaponska elektrane
RPFN elektrana	rotirajuća plivajuća fotonaponska elektrana
bFN elektrana	fotonaponska elektrana sa bifacijalnim modulima
mFN elektrana	fotonaponska elektrana sa monofacijalnim modulima
vFN elektrana	fotonaponska elektrana sa vertikalno postavljenim bifacijalnim modulima
ZFN elektrana	fotonaponska elektrana instalisana na kopnu (zemlji)
KAP	kombinat aluminijuma u Podgorici
RHE	reverzibilna hidroelektrana

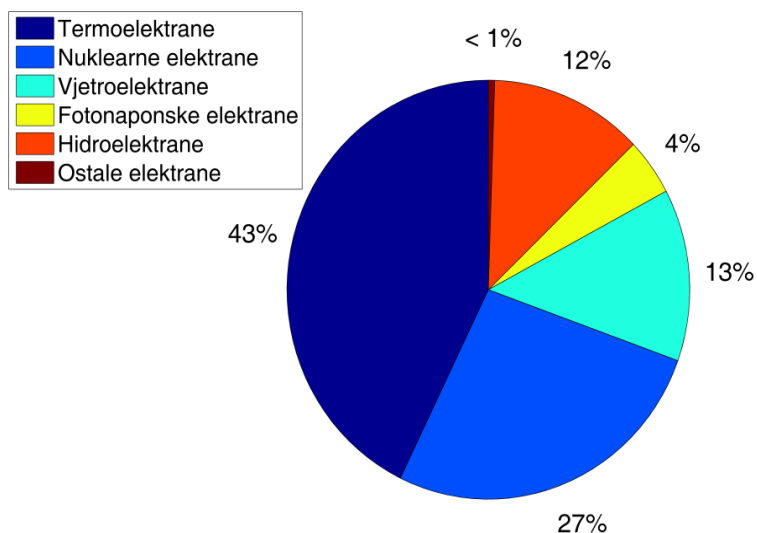
1. UVOD

Elektroenergetski sistemi u poslednjih pola vijeka, iz godine u godinu, se mijenjaju, kako po načinu funkcionisanja, tako i po elementima sistema. Sa promjenom ekonomske paradigme poslovanja u različitim oblastima, savremene elektroenergetske sisteme karakteriše da su tržišno orijentisani, odnosno da elektroenergetski sistemi nijesu više vertikalno organizovani. Tehnološki razvoj elektronskih komponenata, koje mogu da podnesu visoke vrijednosti napona i struja, je učinio da realnost u domenu elektroprenosnih sistema čine vodovi i postrojenja za prenos jednosmjerne struje. Na distributivnom nivou, primjena energetske elektronike omogućuje efikasnu integraciju postojećih potrošača, kao i distribuirane elektrane male snage. Razlog za sve većom integracijom distribuirane proizvodnje iz obnovljivih izvora energije nije samo u smanjenju gubitaka prenosa električne energije iz udaljenih velikih elektrana ka potrošačima, već je to jedan od najvažnijih mehanizama za popravljavanje ekološke slike svijeta, kao i rješavanje problema iscrpljenosti fosilnih goriva na kojima se još uvijek dominantno oslanja proizvodnja električne energije u svijetu. U tržišnim uslovima, gdje privatne kompanije mogu da investiraju u energetski sektor, uvođenjem subvencija za plasman električne energije proizvedene u elektranama sa obnovljivom energijom usmjerena je pažnja na značaj obnovljivih izvora. Napredak u proizvodnji i eksploataciji elektrana sa obnovljivim izvorima energije, i na stručnom i na naučnom nivou, se ogleda kroz stalni pad specifične cijene, odnosno cijene po MW instalisane snage elektrane. Kao rezultat svih navedenih napora i težnji, u 2020. godini može se reći sa velikom sigurnošću da je, sa aspekta tehnologije proizvodnje električne energije, prve dvije decenije 21. vijeka obilježila ekspanzija gradnje vjetroelektrana i fotonaponskih (FN) elektrana. Na slici 1.1 je prikazana instalisana snaga obnovljivih izvora električne energije u svijetu za period od 2010-2019. godine [1].



Slika 1.1. Trend porasta instalisane snage obnovljivih izvora električne energije u svijetu od 2010. godine do 2019. godine

Prema [2], u 2019. godini učešće FN elektrana od svih izgrađenih elektrana je iznosilo 22.8%. Ipak, doprinos proizvodnje FN elektrana u ukupnoj proizvedenoj električnoj energiji je i dalje relativno mali jer se postojeći sistemi zasnivaju najvećim dijelom na generisanju električne energije iz termoelektrana i nuklearnih elektrana. U 2019. godini električna energija dobijena iz nuklearnih i termoelektrana čini 43%, odnosno 27% od ukupne proizvedene električne energije u zemljama koje su članice Evropske unije [3]. Prema ovim podacima, oko 4% električne energije je dobijeno iz FN elektrana, slika 1.2.



Slika 1.2. Procentualno učešće pojedinih elektrana u proizvodnji električne energije u EU-27

FN elektrane mogu biti jedan od značajnih faktora u cilju dekarbonizacije elektroenergetskog sektora, kao na regionalnom, tako i na globalnom nivou. Dekarbonizacija proizvodnje podrazumijeva izgradnju FN elektrana velike snage, koje će perspektivno zauzimati velike površine. Rezultati istraživanja, obuhvaćeni ovom disertacijom, su usmjereni ka predlogu novih konceptijskih rješenja za FN elektrane koji će potencijalno omogućiti bolje tehničke performanse i ekonomske parametre perspektivnih FN elektrana velike snage. Pored novih konceptualnih rješenja, u disertaciji su predstavljene novi analitički modeli za proračun proizvodnje FN elektrane. Predloženi analitički modeli omogućavaju precizniji proračun FN elektrana kako na godišnjem nivou tako i na destominutnoj vremenskoj rezoluciji. Precizniji proračun na godišnjem nivou omogućava bolje sagledavanje karakteristika FN elektrane koje posebno dolaze do izražaja kod planiranja proizvodnje i analize isplativosti investiranja u ovakve elektrane. Sa druge strane, precizniji proračun na destominutnom vremenskom intervalu omogućava bolje sagledavanje uticaja rada FN elektrana priključenih na elektroenergetsku mrežu. Imajući u vidu značaj solarne energije u globalnoj i regionalnoj energetici sprovedena istraživanja odlikuje aktuelnost i praktični značaj koji može biti od koristi inženjerima prilikom planiranja i projektovanja novih FN elektrana.

Akcent ove disertacije je na FN elektranama velike instalisane snage iz razloga što su mnogi problemi vezani za FN elektrane male snage već detaljno razrađeni. FN elektrane male snage karakteriše da već u fazi planiranja tehnička ograničenja u velikoj mjeri definišu i glavne tehničke karakteristike takvih elektrana, pa ostaje relativno mali prostor za dalji napredak po pitanju veće energetske efikasnosti. Karakteristika FN elektrana velikih snaga je mala površinska gustina snage, odnosno zauzimaju velike površine zemljišta po instalisanom MW. Sa druge strane, tržišno orijentisani sistem otkupa električne energije nameće vlasniku takvih elektrana da postigne što bolju efikasnost elektrane. Prosječni dijagram proizvodnje FN elektrane velike snage karakteriše i relativno mali stepen korelisanosti sa prosječnim dijagramom konzuma. Tačnije, najveća

proizvodnja električne energije iz FN elektrane se događa oko podneva dok je najveća potrošnja konzuma između 19 h i 20 h. Jasno je da navedena karakteristika FN elektrane utiče i na ekonomsku isplativost FN elektrane. Eksploatacija solarne energije posredstvom FN panela karakteriše i negativan uticaj temperature na proizvodnju FN panela. Naime, pored toga što porast temperature utiče na smanjenje ukupne proizvedene električne energije, ova karakteristika utiče i na dinamiku izlazne električne snage FN panela pri naglim promjenama meteoroloških parametara.

U ovoj disertaciji su predložena konceptijska rješenja koja omogućavaju ublažavanje negativnih karakteristika FN elektrana velikih snaga. Predložena rješenja odlikuje prije svega jednostavnost. Pošto se neka konceptijska rješenja zasnivaju na novim tehnologijama poput FN panela sa dvostrano aktivnim površinama, u disertaciji su predloženi noviji i precizniji modeli za proračun izlaznih parametara takvih elektrana. S obzirom na to da se neka rješenja zasnivaju na drugačijem dizajnu u odnosu na postojeće FN elektrane, predstavljeni su i odgovarajući prilagođeni modeli za proračun iradijacije. Imajući u vidu da je plasman električne energije dobijene iz FN elektrana tržišno orijentisan, jasno je da prognoza proizvodnje elektrane od vitalnog značaja za projektovanje i eksploataciju električne energije. S obzirom na to da je sprovedeno istraživanje u domenu planiranja rada FN elektrane predložene su nove metode za proračun iradijacije, odnosno godišnje proizvodnje FN elektrane. Predloženi novi način proračun iradijacije omogućava precizniji proračun proizvodnje FN elektrane koji posebno dolazi do izražaja kod FN panela sa dvostrano aktivnim površinama.

U trećem poglavlju, kao potencijalno rješenje za smanjenje zahtijevanih površina za gradnju FN elektrana, predložen je novi koncept za plivajuće FN elektrane [4]. Gradnjom plivajućih FN elektrana značajno se smanjuje uzurpacija kopnenih površina jer je za izgradnju 1 MW instalisane snage FN elektrane potrebno od 1.5 ha do 2.5 ha zemljišta [5]. Pored navedenog efekta, gradnju FN elektrana na vodi, umjesto na zemlji, karakteriše i smanjenje negativnog uticaja temperature na FN konverziju. Postojeća rješenja za plivajuće FN elektrane podrazumjevaju da je nagibni ugao FN panela relativno mali dok je azimutni ugao fiksiran i FN elektrana je orijentisana ka jugu [6], [7]. U ovom poglavlju predloženo je tehničko rješenje za unapređenje postojećeg koncepta plivajućih FN elektrana koje se zasniva na praćenju azimutnog ugla Sunca [8]. Uporedna analiza predloženog i postojećih koncepta FN elektrana na kopnu i vodi, afirmiše predloženo rješenje. Analiza je izvršena kroz poređenje najznačajnijeg tehničkog parametra jedne elektrane a to je moguća godišnja proizvodnja. Predloženo rješenje za FN elektranu omogućava značajno veću proizvodnju uz relativno mala finansijska ulaganja u odnosu na postojeći koncept FN elektrane. Pored navedenog, u ovom poglavlju je analiziran efekat povećanja efikasnosti hidroelektrana gradnjom FN elektrana na akumulacionim jezerima reverzibilnih i akumulacionih hidroelektrana. Pokazano da je smanjenje isparavanja vode usljed postavljanja FN elektrane na vodu pored ekološkog može doprinijeti i povećanju efikasnosti hidroelektrane ako se FN elektrana locira na akumulacionom jezeru hidroelektrana.

U četvrtom poglavlju je razmatrano dalje povećanje efikasnosti plivajućih FN elektrana ugradnjom reflektora. Model za proračun proizvodnje FN elektrane sa reflektorima različitog tipa se može naći u [9], [10]. Imajući u vidu da je problematika koja je razmatrana u ovoj disertaciji vezana za FN elektrane velike snage, u obzir dolaze reflektori koji ne iziskuju značajne novčane troškove. Razlog za navedeno je što FN elektrane velike snage zauzimaju velike površine pa su i reflektori velikih površina. Položaj reflektora, kao i refleksione karakteristike u značajnoj mjeri određuju i doprinos reflektora u ukupnoj proizvodnji FN elektrane. Koristeći rezultate iz poglavlja 3, plivajuće FN elektrane koje su opremljene sa mehanizmom za praćenje azimutnog ugla Sunca karakteriše relativno veliki nagibni ugao FN panela. Uzimajući u obzir specifičnosti predložene konfiguracije FN panela i reflektora, u ovom poglavlju predstavljen je i prilagođeni model za proračun iradijacije. Rezultati ovoga poglavlja ukazuju da položaj reflektora postavljenih između FN redova sa refleksionim svojstvima relativno jeftinog reflektora omogućava značajno veću proizvodnju ovakve plivajuće FN elektrane u odnosu na plivajuću FN elektrane bez reflektora. Da bi se ispitala i ekonomska opravdanost predloženog rješenja sprovedena je i ekonomska analiza kroz računanje nivelisane cijene proizvedenog kWh električne energije predložene elektrane.

Jedan od doprinosa ove disertacije je i u definisanju novog matematičkog modela za proračun iradijacije, a samim time i proizvodnje FN elektrane velike instalisane snage [11], koji je predstavljen u petom poglavlju. Imajući u vidu da FN elektrane karakteriše relativno veliko rastojanje između FN redova, reflektovana komponenta iradijacije može značajno doprinijeti ukupnoj proizvodnji FN elektrane. Postojeći modeli za proračun iradijacije pretpostavljaju da je prostor između FN redova ozračen cjelokupnom difuzionom iradijacijom [12], [13], [14]. Dakle, pretpostavka postojećih modela za proračun difuzione iradijacije je da FN redovi ne zaklanjaju prostor između FN panela, što nije fizički korektno. Shodno tome, predloženi model iradijacije predstavlja proširenje postojećih modela iradijacije jer uvažava činjenicu da na prostor između FN redova ne pada cjelokupna difuziona iradijacija [11]. Predloženi model iradijacije omogućava precizniji proračun proizvodnje u odnosu na postojeće modele, a samim time i ostalih važnih tehn-ekonomskih parametara elektrana. Značaj predloženog modela iradijacije posebno dolazi do izražaja kod FN elektrana koje su postavljene na podlozi koju karakteriše veći koeficijent refleksije i koja je projektovana sa FN panelima sa dvostrano aktivnim površinama. Rezultati primjene predloženog modela iradijacije omogućavaju precizniji proračun godišnje proizvodnje a samim time i bolju osnovu za tehn-ekonomsku analizu ovakvih FN elektrana. Od značaja je istaći da se primjenom predloženog modela iradijacije dobija manja godišnja proizvodnja FN elektrane u odnosu na dosadašnji opšte prihvaćeni model iradijacije. Dobijeni rezultati su od značaja ako se zna da su elektrane izgrađene sa FN panelima koje imaju dvostrano aktivne površine predstavljaju jednu od potencijalnih mjera za bolju integraciju FN elektrana u elektroenergetski sistem. Posebno do izražaja dolaze FN elektrane kod koje su FN paneli sa dvostrano aktivnim površinama postavljeni vertikalno i orijentisani u pravcu zapad-istok. Sa razvojem tehnologije proizvodnje FN panela sa dvostrano aktivnim površinama, kao i veće korelisanosti proizvodnje ovakve vertikalne FN elektrane i tipičnog dijagrama konzuma, u odnosu na FN elektranu orijentisanu ka jugu, ovakve FN elektrane dobijaju sve više na značaju i ekonomskoj opravdanosti [15]. Primjenjujući razvijeni model iradijacije detaljno je analizirana tehn-ekonomska isplativost ovakve FN elektrane u odnosu na južno orijentisanu FN elektranu. U ovome poglavlju je detaljno ispitan i uticaj horizontalnih reflektora postavljenih između FN redova na proizvodnju FN elektrane. FN elektrane sa vertikalno postavljenim FN panelima karakteriše veći doprinos reflektovane komponente zračenja u odnosu na ovu komponentu kod južno orijentisanih nagnutih FN panela. Korišćenjem realnih mjernih podataka, pokazano je da vertikalno postavljeni FN paneli sa dvostrano aktivnim površinama u planinskim regionima, zbog uticaja snijega, mogu ostvariti slične tehn-ekonomske performanse kao i južno orijentisane FN elektrane sa jednostrano aktivnim površinama jer se smanjuju gubici usljed zadržavanja snijega na FN panelima.

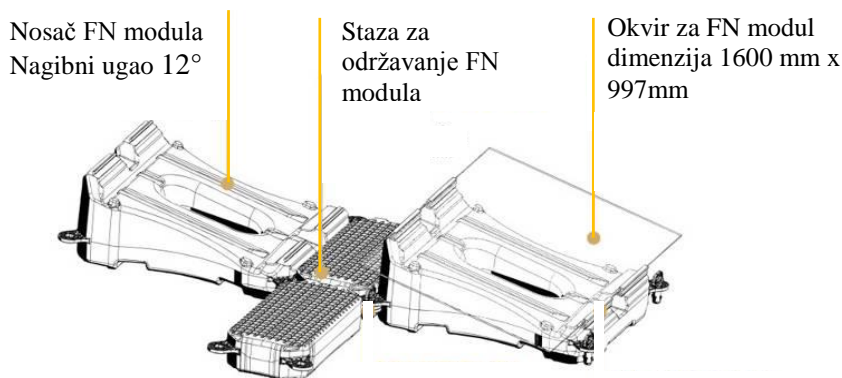
U šestom poglavlju detaljno je analiziran model FN modula. U dostupnoj literaturi postoji nekoliko modela FN modula za proračun električnih izlaznih parametara koji uključuju različite fenomene [16]. Rezultati prikazani u radovima [17] i [18], pokazuju da termička konstanta zagrijavanja FN modula može bitno uticati na dinamičke karakteristike u pogledu generisane snage FN modula. U ovom poglavlju dato je proširenje postojećih modela za FN modula tako što je prilikom modelovanja FN modula uzeta u obzir termička konstanta zagrijavanja samog FN modula. Rezultati ovoga istraživanja pokazuju da vremenska konstanta zagrijavanja FN modula može imati značaj prilikom analize uticaja FN modula na priključnu elektroenergetsku mrežu, pogotovo tokom naglih promjena meteoroloških uslova karakterističnih za promjenljivo oblačne dane. Predložena metodologija obuhvatanja vremenske konstante zagrijavanja FN modula sa aspekta matematičkih relacija je vrlo jednostavna, odnosno, omogućeno je da se obuhvati vremenska konstanta zagrijavanja FN modula bez značajnih modifikacija dobro poznatih matematičkih jednačina koje opisuju proizvodnju FN modula.

2. PREGLED TEHNOLOGIJA I TRENDOVA FN ELEKTRANA VELIKE SNAGE

Sa razvojem ljudske svijesti o očuvanju životne sredine u poslednjih dvadeset godina je uloženo dosta napora u razvoj i primjenu novih tehnologija, koje omogućavaju korišćenje obnovljivih izvora energije za proizvodnju električne energije. Jedna od stalno rastućih grana industrije se tiče tehnologije razvoja i proizvodnje FN panela. Rezultati postignuti u ovoj oblasti omogućavaju da danas FN elektrane pretenduju da u bliskoj budućnosti budu jedan od glavnih izvora električne energije. Istovremeno, prepoznavajući značaj obnovljivih izvora električne energije, mnoge vlade širom svijeta su podsticale ulaganja u FN elektrane, vjetroelektrane, elektrane na biomasu, tako što je otkupna cijena električne energije dobijena iz takvih elektrana bila značajno veća od prosječne cijene kWh na berzi električne energije. Na ovaj način stvoren je podsticajni ambijent za mnoge kompanije da FN paneli budu fokus njihovog poslovanja. Posledica takvog ambijenta i napora stručnjaka širom svijeta, koji rade u ovoj oblasti, je da su danas FN elektrane velike snage realnost u mnogim zemljama svijeta. Stepenn efikasnosti i razvijenost tehnologija FN panela omogućavaju da su FN elektrane danas isplative i po tržišnim cijenama električne energije. Savremeni trendovi, koji ukazuju da će elektroenergetski sistemi biti bazirani na obnovljivim izvorima energije, predstavljaju snažan motiv za dalji razvoj i unapređenje tehnologije proizvodnje FN panela.

Jedan od trendova u razvoju FN elektrana je gradnja FN panela na mirnim vodenim površinama. Ovakvi FN sistemi su uglavnom realizovani kao relativno male elektrane instalisane na različitim vodenim površinama: akumulacionim bazenima čiste vode, ribnjacima, kanalima i jezerima [4], [19], [6], [20]. U [21] je sprovedena tehno-ekonomska analiza plivajućih fotonaponskih (PFN) elektrana u blizini rudnika uglja u Koreji, koja pokazuje da ovakvo rješenje ima energetske-ekološku opravdanost. U [20], ispitana je mogućnost integracije PFN elektrane u manji elektroenergetski sistem baziran na termoelektranama. Pored PFN panela male snage, u literaturi se mogu naći prijedlozi idejnih rješenja za PFN elektrane velike snage [8] instalisane na mirnim vodenim površinama. Pojačani interes za PFN elektrane velike snage potiče od činjenice da FN elektrane instalisane na kopnu zauzimaju relativno velike površine u odnosu na instalisanu snagu. Navedena činjenica posebno dolazi do izražaja ukoliko se radi o FN elektranama velike snage, gdje površine prekrivene FN panelima mogu biti i veličine nekoliko stotina hektara. Prekrivanje ovako velikih kopnenih površina obično nije prihvatljivo sa aspekta poljoprivrednih aktivnosti i uticaja na životnu sredinu. Površina zemljišta koje FN elektrane zauzimaju, pored instalisane snage, zavisi i od konfiguracije FN elektrane koja je u najvećem broju slučajeva uslovljena konfiguracijom terena na kojoj se planira izgradnja FN elektrane. Na osnovu podataka o izgrađenim FN elektranama u Njemačkoj, odnos površine zemljišta i instalisane snage može biti i do 2.5 ha/MWp [5]. Uzurpacija zemljišta za gradnju i eksploataciju FN elektrana podrazumijeva, u najčešćem broju slučajeva, i zakup relativno velike površine zemljišta, za koju je često potrebno plaćati i visoku cijenu zakupa. Samim time, veći novčani izdaci za investiranje i održavanje zbog zakupa zemljišta uzrokuju smanjenu ekonomsku efikasnost FN elektrana na kopnu u odnosu na PFN elektrane. Važno je napomenuti da je u mnogim radovima potencirano da je efikasnost pretvaranja sunčeve u električnu energiju veća kod PFN u odnosu na FN elektrane instalisane na zemlji zbog niže temperature FN panela. Naime, dobro je poznata činjenica da sa porastom temperature FN panela opada njihov stepen efikasnosti. Imajući u vidu da temperatura vode može biti značajno niža od temperature kopna pri sunčanim danima, jasno je da i efikasnost PFN elektrana je veća od FN elektrana instalisanih na kopnu. Na osnovu studija i eksperimentalnih podataka o većem broju PFN elektrana u svijetu, u radovima [4], [19] i [22] mogu se naći konkretni podaci o povećanju efikasnosti PFN

elektrana u odnosu na FN elektrane instalisane na zemlji. U [4] su prikazani eksperimentalni podaci o povećanju proizvodnje PFN, u zavisnosti od godišnjeg doba i lokacije elektrane. Sprovedene analize u ovoj disertaciji pokazuju da povećanje proizvodnje PFN u odnosu na FN na kopnu može biti i do 15%. Slični rezultati se mogu naći i u [19], gdje je navedeno da se može očekivati povećanje od 11% instalisanjem PFN elektrana u odnosu na FN elektranu na kopnu. Početna istraživanja u vezi PFN elektrana, su ukazivala da su investicioni troškovi PFN elektrana veći i do 20% u odnosu na klasičnu FN elektranu instalisanu na zemlji [19]. Međutim, ako se zna da PFN elektrane ne zauzimaju kopnenu površinu i da se veća proizvodnja postiže sa PFN elektranama u odnosu na FN elektrane na zemlji, ekonomski indikatori su na strani PFN elektrane [23]. Pored veće efikasnosti, u radovima je naglašeno da gradnja PFN elektrane ima i pozitivan efekat na smanjenje isparavanja vode. Naime, pokazano je da se gradnjom PFN elektrana može smanjiti isparavanje vode i do 70%, što takođe, u određenim slučajevima, može dati bitnu ekonomsku i ekološku korist. Standardni FN silicijumski paneli koji se koriste za FN elektrane na kopnu se koriste i kod PFN elektrana. Na slici 2.1 prikazana je skica nosača koji proizvodi francuska kompanija *Ciel&Terre* [24].



Slika 2.1. Skica plivajućih nosača za FN panele koji je razvila francuska firma *Ciel&Terre* [24]

Treba napomenuti da postoje i ideje da se razviju fleksibilni tanki FN filmovi koji bi plivali po vodenim površinama i ne bi zahtijevali noseće konstrukcije, [7].

Na slici 2.2 prikazana je PFN elektrane u Holandiji, čija je instalisana snaga 1845 kWp i zauzima 3.3 ha. Najveća realizovana PFN elektrana, instalisane snage 70 MWp, je izgrađena u Kini krajem 2018 godine [25].



Slika 2.2. PFN elektrana u Holandiji, čija je instalisana snaga 1.85 MWp [26]

Drugi trend u solarnoj energetici se zasniva na korišćenju FN modula sa dvostrano aktivnim površinama (eng. *bifacial photovoltaic module*), slika 2.3. U poslednje vrijeme, FN moduli sa dvostrano aktivnim površinama (bFN moduli) prepoznati su kao mogućnost za dalje smanjenje troškova proizvodnje električne energije i ujedno povećanje efikasnosti FN elektrana.



Slika 2.3. FN elektrana sa vertikalno postavljenim FN panelima sa dvostrano aktivnom površinom

Iako, još 1982. godine, u [14] je navedeno da je moguće dobiti povećanje proizvodnje električne energije za oko 50% korišćenjem bFN modula, umjesto FN modula sa jednom aktivnom stranom (eng. *monofacial photovoltaic module*), tek je u skorije vrijeme poraslo interesovanje za FN elektrane sa bFN modulima. Karakteristika do sada izgrađenih FN elektrana je korišćenje FN modula sa jednom aktivnom stranom (mFN) ili bFN modula koji su orijentisani ka jugu pod optimalnim nagibnim uglom [11], [27], [28], [29]. Prosječni dijagram proizvodnje južno orijentisanih FN elektrana čiju su mFN moduli nagnuti pod određenim nagibnim uglom u odnosu na podlogu karakteriše da je najveća proizvodnja oko podneva, dok je jutarnjim i popodnevnim časovima ta proizvodnja značajno manja.

Sa druge snage, prosječni konzum karakteriše da se najveća potreba za električnom energijom u posle podnevnim časovima, u periodu od 17 h do 22 h. Shodno tome, dalje povećanje instalisane snage FN elektrana dovodi do većeg debalansa između proizvodnje FN elektrana i potrošnje konzuma. Naime, u elektroenergetskim sistemima sa značajnim učešćem FN elektrana u periodu dana oko solarnog podneva generisanje ostalih izvora energije u cilju zadovoljenja potreba za električnom energijom je značajno manje u odnosu na večernje sate kada postoji veća potreba za električnom energijom, a učešće FN elektrana ne postoji ili je veoma malo. Shodno tome, a posebno u elektroenergetskim sistemima koji se pored FN elektrana baziraju i na termoelektanama, nameću se vrlo strmi skokovi za proizvodnju termoelektana a koji nastaju kao posledica veće penetracije FN elektrana [30]. Sa druge strane, efekat jednovremene proizvodnje FN elektrana i relativno mali stepen korelisanosti dijagrama proizvodnje južno orijentisanih FN elektrana i potrošnje prouzrokuje da cijena otkupa električne energije na tržištu pada. Jedna od mogućih aplikacija bFN modula je da kod elektrana sa vertikalno postavljenim bFN modulima koji su orijentisani ka istoku i zapadu. Takva orijentacija i dizajn FN elektrane omogućavaju veće učešće bFN elektrana u elektroenergetskom sistemu jer je dnevni dijagram proizvodnje takvih elektrana znatno prilagođeniji postojećim elektroenergetskim sistemima i dnevnom dijagramu potrošnje.

3. UNAPREĐENJE EFIKASNOSTI PFN ELEKTRANA INSTALISANIH NA VODENIM POVRŠINAMA

3.1. Uvod

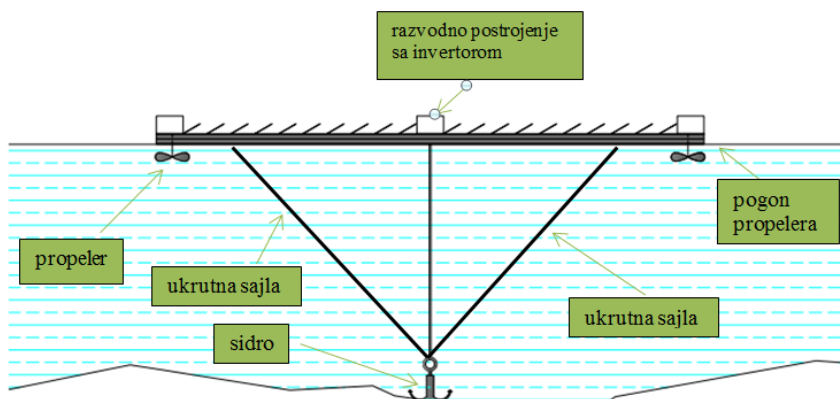
Motivacija za gradnju PFN elektrana na vodenim površinama potiče od činjenice da FN elektrane zauzimaju relativno velike površine. U cilju smanjenja uzurpacije zemljišta, koje može biti korišćeno i za druge namjene, mirne vodene površine su prepoznate kao pogodne lokacije za gradnju PFN elektrana. Većina dosadašnjih rješenja za PFN elektrane podrazumijeva da su FN moduli postavljeni horizontalno ili pod malim nagibnim uglom usljed postojećih konstrukcijskih rješenja za FN platforme. Karakteristika PFN elektrana je da su FN paneli fiksno postavljeni i orijentisani ka jugu. Jedan od doprinosa ove disertacije je konceptijsko rješenje koje podrazumijeva obrtanje FN platforme oko svoje ose. Predloženo tehničko rješenje, koje omogućava obrtanje FN platforme, bi se koristilo u cilju praćenja azimutnog ugla Sunca. Kao što je poznato, FN paneli koji imaju mogućnost praćenja azimutnog ugla Sunca proizvode veću godišnju energiju i preko 30% u odnosu na fiksne FN panele postavljene pod optimalnim nagibnim uglom [31]. Dakle, imajući u vidu navedeno, za očekivati je da predloženo rješenje PFN elektrane sa rotirajućom FN platformom (RPFN elektrane) omogući značajno veću proizvodnju električne energije u odnosu na postojeća konceptijska rješenja PFN elektrane. Dakle, predloženo rješenje omogućava veću efikasnost pretvaranja sunčeve u električnu energiju u odnosu na postojeća rješenja PFN elektrana.

U ovom poglavlju će biti analizirane tehničke karakteristike RPFN elektrane na dvije lokacije: Skadarsko jezero [8] i jezero Zaovine [32]. Sagledavanje karakteristika predloženog rješenja za RPFN elektrane će biti upoređeno sa karakteristikama dosadašnjeg rješenja za PFN elektrane i FN elektrane instalisane na kopnu. Koncept PFN elektrana omogućava i smanjenje isparavanja vode pa je tome posvećen poseban dio ovoga poglavlja. Na primjeru prirodnog Skadarskog jezera smanjenje isparavanja vode ima ekološki značaj, dok na primjeru vještačkog jezera Zaovine smanjenje isparavanja vode ima ekonomski značaj.

3.2. Koncept rotirajućih PFN elektrana

Koncept RPFN elektrane podrazumijeva da se platforma usidri u centralnom dijelu, pri čemu bi sajla sidra predstavljala osovinu oko koje bi mogla da rotira cijela platforma, slika 3.1. Za pokretanje platforme predviđeno je korišćenje propelernih hidroelektričnih agregata koji treba da imaju dovoljnu snagu da savladaju otpore rotaciji platforme. Pored navedenih obaveznih elemenata koji čine jednu platformu, i naravno FN panela, u zavisnosti od snage elektrane i priključenja na elektroenergetski sistem, na samoj platformi bi bilo potrebno instalirati i koncentratorko postrojenje sa invertorima i rasklopnom opremom.

Jedan od glavnih razloga zašto se na kopnu uglavnom instaliraju FN elektrane sa fiksnim azimutnim uglom je činjenica da je rotaciju FN panela kompleksno realizovati. U praksi se uglavnom realizuje FN panel sa jednoosnim i ređe dvoosnim praćenjem Sunca, pri čemu tehnička realizacija ovakvih sistema zahteva instalaciju manjih FN panela.



Slika 3.1. Koncept predložene platforme za RPFN elektranu

Ovakvo rješenje, kod većih FN elektrana, zauzima dosta zemljišta, a uz to je dosta skuplje i zahtijeva veće troškove održavanja zbog relativno složenih mehaničkih pokretnih mehanizama. Kod vodenih površina moguće je realizovati rotaciju cijelog FN panela s obzirom na to da se radi o ravnoj površini koja pruža vrlo mali otpor rotaciji. Egzaktni proračun sile otpora je dosta kompleksan problem. Generalno na kretanje (rotaciju) ravne ploče koja se kreće po površini vode utiču dosta sile otpora, kao što su: sila trenja, sile usljed talasa i otpor vazduha. Ipak, kod sporo pokretnih objekata glavna komponenta je sila trenja. Ova komponenta zavisi od dosta parametara, a glavni su: veličina površine platforme, hrapavost kontaktne površine i brzina kretanja. Jednačina koja definiše otpor kretanju je data generalnim izrazom [33]

$$R = A \cdot f \cdot v^n \quad (3.1)$$

gdje je R sila otpora, A je površina platforme koja je u dodiru sa vodom i v je brzina kojom se kreće platforma (m/s). Koeficijenti f i n zavise od veličine i hrapavosti površine platforme. Generalno, f i n su manji za veće površine platforme.

U normalnim uslovima upravljanja azimutnim uglom platforma se ravnomojno obrće, pri čemu u toku 24 sata napravi dva poluoobrta. Od izlaska do zalaska Sunca platforma napravi približno rotaciju od 180° . Kada Sunce zađe, platforma rotira u suprotnom smjeru da ne bi došlo do uvrtnja kablova. Prilikom projektovanja platforme, potrebno je uvažiti i sile pritiska vjetra na elemente platforme i pažljivo dimenzionisati broj i jediničnu snagu pogonskih agregata pri hidromehaničkom projektovanju platforme. Predloženi koncept ima idejni karakter, dok detaljno tehničko rješenje treba da uvaži praktična iskustva vezana za proračun platforme, zateznih sajli, detaljno dimenzionisanje pogonskih motora za propelere, antikorozivnu zaštitu kao i sistem uzemljenja. Imajući u vidu značaj djelovanja vjetra na dizajn platforme kao i na samu RPFN elektranu, u narednom potpoglavlju dat je pregled osnovnih karakteristika uticaja vjetra na mehaničku konstrukciju platforme.

3.3. Uticaj vjetra na predloženu koncepciju RPFN elektrane

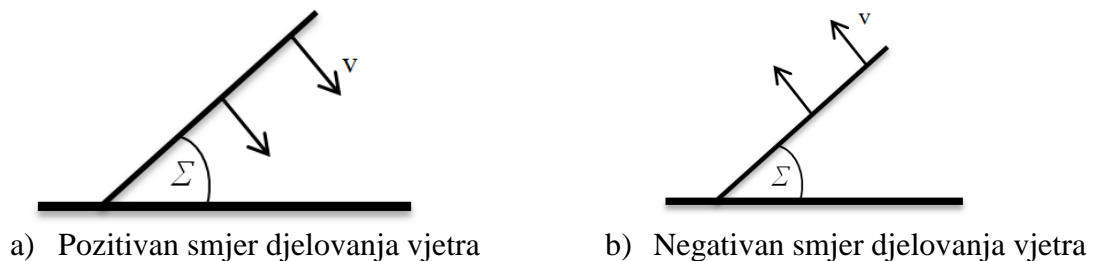
Za razliku od FN elektrana instalisanih na zemlji, gdje se nosači FN panela fundiraju u više tačaka, sila pritiska vjetra kod RPFN elektrane se prenosi na cijelu noseću konstrukciju i može prouzrokovati velika mehanička naprezanja u pojedinim njenim elementima, kao i kretanja konstrukcije po površini jezera. U mehaničkom pogledu vjetar uzrokuje sile uzgona i otpora [34]. Sila uzgona nastaje usljed strujanja vazduha preko površine FN panela i upravna je na pravac brzine vazduha dok je sila otpora usmjerena u pravcu vektora brzine vjetra.

Imajući u vidu da je proračun sile uzgona i otpora na elemente relativno složene i gabaritne konstrukcije platforme teško analitički proračunati, u upotrebi su eksperimentalne analize i numeričke metode. Najosnovnija analitička relacija koja omogućava kvalitativnu ocjenu uticajnih parametara na rezultantnu silu pritiska vjetra F koja djeluje na platformu, je data sljedećom jednačinom:

$$F=0.5 \cdot C_F \cdot A \cdot v^2 \quad (3.2)$$

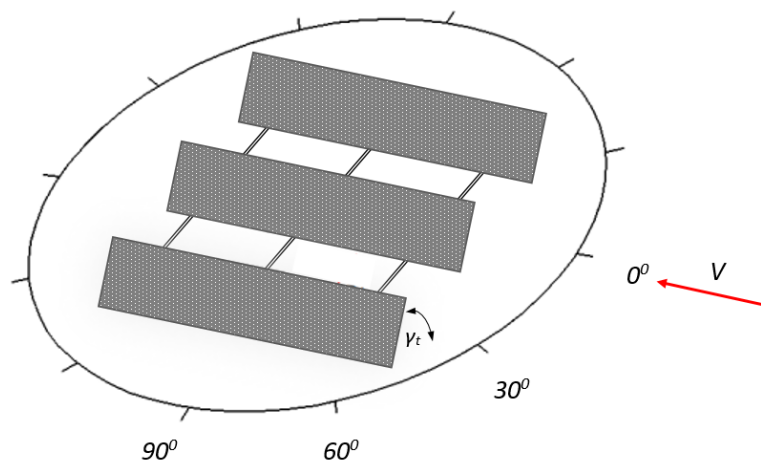
gdje su C_F ekvivalentni aerodinamički koeficijent konstrukcije, A je ekvivalentna površina na koju djeluje vjetar (m^2), v je brzina vjetra (m/s).

Postoji više radova i studija u kojima su vršene analize sile pritiska vjetra na FN panele. U [35], je pokazano da je sila vjetra proporcionalna nagibnom uglu FN panela, dok u preporukama Japanskog standarda [36] koji se tiče za projektovanja FN elektrana, koeficijent za silu pritiska vjetra definisan na sljedeći način u zavisnosti od nagibnog ugla FN panela. Za nagibne uglove FN panela do 15° , važi da je $C_F=0.95$. Koeficijenti C_F za pozitivan i negativan smjer vjetra, respektivno su $0.65+0.009 \cdot \Sigma$ i $0.71+0.016 \cdot \Sigma$ za nagibni ugao FN panela u opsegu $15^\circ < \Sigma < 45^\circ$. Pozitivan i negativan smjer vjetra su ilustrovani na slici 3.2, [36].



Slika 3.2. Ilustracija za koeficijent sile pritiska vjetra (C_F) na FN panel pri pozitivnom (a) i negativnom smjeru (b) djelovanja vjetra

Predloženo rješenje RPFN elektrane omogućava da se na jednostavan način spriječe velike sile pritiska vjetra na konstrukciju tako što se pri jakim vjetrovima odustaje od azimutnog praćenja Sunca i platforma zarotira tako da azimutni ugao (θ) vjetra u odnosu na redove FN panela bude 0° , kao što je ilustrovano na slici 3.3.



Slika 3.3. Pozicioniranje FN panela pri jakom vjetru

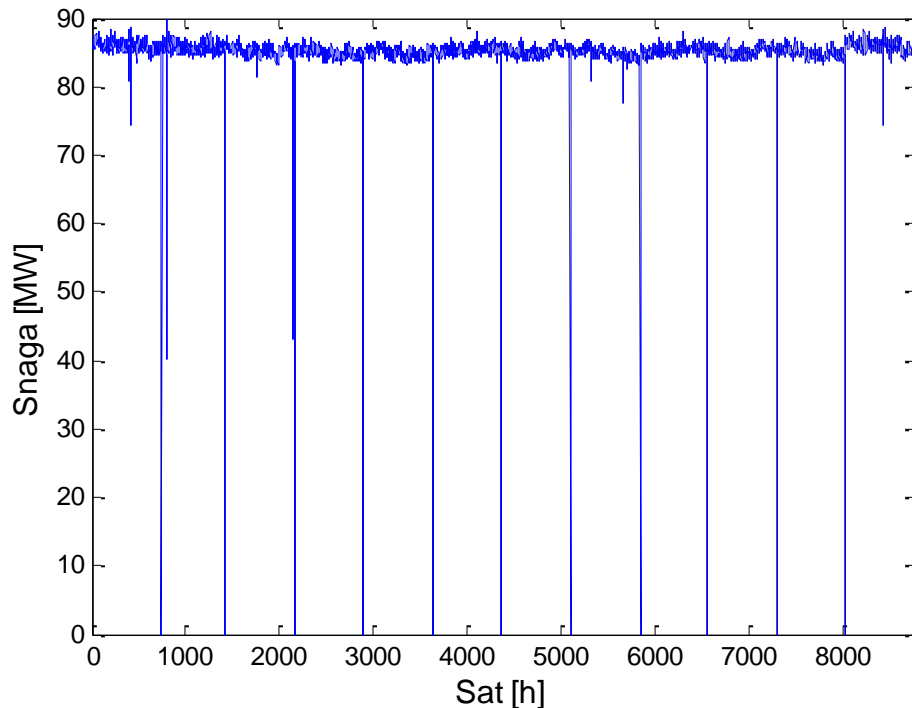
Postavljanjem platforme u poziciju za koju je $\theta=0^\circ$ se višestruko smanjuju komponente sile pritiska vjetra na FN panel. Sila uzgona se smanjuje jer u ovom slučaju vjetar struji i sa jedne i sa druge strane FN panela u redovima sa sličnim brzinama, čime se izjednačavaju pritisci vazduha sa jedne i druge strane FN panela, te je sila uzgona bliska nuli. Sila otpora direktno zavisi od površine koja je

izložena vetru, tako da se predloženim upravljanjem ona višestruko smanjuje. U poziciji $\theta=0^\circ$ konstrukcija je vrlo porozna u odnosu na smer duvanja vetra, te je sila otpora višestruko manja nego u slučaju kada je $\theta=60^\circ$, koji je relevantan za projektovanje fiksno postavljenih konstrukcija. Ovu konstataciju potvrđuju istraživanja prikazana u radu [37], gdje je kroz numeričke simulacije, pokazano da je sila otpora oko 5 puta manja za smjer vjetra $\theta=30^\circ$ u odnosu na $\theta=60^\circ$ koji je kritičan u pogledu sile kod FN panela velikih površina. Strogo teorijski gledano, najkritičniji ugao smjer vjetra iznosi $\theta=90^\circ$ na prvi red FN elektrane, dok su ostali FN redovi u zavjetrini pa samim time su izloženi manjem djelovanju pritiska vjetra. U radu [34] je pokazano da je kritičan ugao u iznosu $\theta=60^\circ$ jer je u tome slučaju pritisak vjetra dovoljno jak na prvi ali i na ostale redove FN elektrane. Važno je naglasiti da u vjetrovitim regionima predloženi koncept zaštite od pojave velikih sila usljed pritiska vjetra može u izvesnoj mjeri uticati na smanjenje efikasnosti RPFN elektrane. Veće smanjenje proizvodnje RPFN elektrane se može očekivati ukoliko jak vjetar duva u toku sunčanog perioda dana. Imajući u vidu da je na velikim platformama smješteno nekoliko FN redova, prilikom mehaničkog dizajna platforme bi bili od značaja i rezultati prikazani u [38]. U radu [38] je pokazano da rastojanje između FN redova ima značajan efekat na silu pritiska vjetra na FN panele. Naime, usljed efekta zavjetrine, sila pritiska na FN redova značajno se smanjuje u odnosu na prethodne FN redove gledano iz pravca djelovanja vjetra. Uvažavajući sva navedena istraživanja može se zaključiti da se kod predloženog koncepta ne moraju predimenzionisati svi mehanički elementi RPFN elektrane prema maksimalnoj mogućoj sili vjetra. Na dalje, to implicira da investicija u RPFN elektrane ne mora biti mnogo veća u odnosu na standardnu PFN elektranu. Ipak, detaljne analize djelovanja vjetra koja uključuju i višegodišnja mjerenja vjetra na ciljanoj lokaciji je potrebno sprovesti, pogotovo ako se radi o RPFN elektrane velike snage koja iziskuje velika investiciona ulaganja. U početnim koracima vezanim za izbor lokacije RPFN elektrane neophodnim se nameće uvažavanje ruže vjetrova za ciljanu mikrolokaciju.

3.4. Tehno-ekonomska analiza predloženog tehničkog rješenja – studija slučaja RPFN elektrana na Skadarskom jezeru

Jedan od doprinosa disertacije je tehnička, ekonomska i ekološka analiza potencijalne primjene koncepta RPFN elektrane za napajanje najvećeg individualnog potrošača električne energije u Crnoj Gori, Kombinata Aluminijskog u Podgorici (KAP). Ukupni konzum električne energije u Crnoj Gori iznosi 3563 GWh/god [2]. Ova električna energija se obezbjeđuje 89.75% iz sopstvene proizvodnje i oko 10.25% iz uvoza [2]. Proizvodne kapacitete električne energije u Crnoj Gori čine jedna termoelektrana, tri veće hidroelektrane, dvije vjetroelektrane i nekoliko manjih hidroelektrana. Termoelektrana Pljevlja ima najveći uticaj na ekološku sliku Crne Gore. Godišnja proizvodnja električne energije u TE Pljevlja iznosi 1406 GWh, pri čemu se sagori 1635 kt uglja, što na kraju rezultuje emisijom ugljen dioksida (CO_2) od oko 1500 kt. S obzirom na to da je termoelektrana realizovana sa rashladnim tornjem postoje dodatni ekološki problemi u ciljnom regionu zbog stvaranja kisjelih magla, kao i problema deponovanja pepela. Sve navedeno upućuje da je proizvodnja ove elektrane jedan od glavnih ekoloških problema u Crnoj Gori.

Sa druge strane, glavni potrošač električne energije u Crnoj Gori je fabrika za proizvodnju aluminijskog KAP, koja je locirana u neposrednoj blizini glavnog grada Podgorice. Izgradnju KAP-a, 1960. godine je iniciralo nalazište rude boksita u blizini Nikšića. KAP ima instalisani kapacitet od 120000 tona likvida aluminijskog godišnje za čiju preradu je potrebno oko 895 GWh električne energije. Ova fabrika čini preko 25% ukupne potrošnje električne energije u Crnoj Gori, odnosno oko 63.7% proizvodnje termoelektrane Pljevlja. Na slici 3.4 prikazan je godišnji dijagram potrošnje električne energije KAP-a, sa koga se može uočiti da kada nema prekida u proizvodnji uzrokovanim specifičnim tehnološkim procesom, potrošnja električne energije je uglavnom konstanta. Prosječna satna potrošnja energije KAP-a varira u vrlo uskim granicama, od 84.5 MWh do 85.5 MWh.



Slika 3.4. Dijagram potrošnje KAP-a za 2014. godinu

Lokacija KAP-a je na terenu koji ima značajan solarni potencijal sa godišnjom insolacijom od oko 1600 kWh/m^2 . KAP je lociran u neposrednoj blizini Skadarskog jezera. Analizirani su tehnički i ekološki uslovi izvodljivosti i ekonomska opravdanost izgradnje RPFN elektrane na dijelu Skadarskog jezera u cilju obezbjeđivanja dijela potrošnje električne energije KAP-a. Za proračun resursa solarne energije korišćena je baza podataka terenskih mjerenja solarne iradijacije iz baze podataka NREL [39]. Imajući u vidu da je relativno malo vazdušno rastojanje između mjerene tačke NREL i ciljane mikrolokacije, koje iznosi oko 3.5 km, može se smatrati da su mjerni podaci reprezentativni za ciljnu lokaciju FN elektrane. U korišćenoj bazi podataka bili su raspoloživi srednji satni podaci o: insolaciji, temperaturi vazduha i brzini vjetrova. Važan meteo podatak za FN elektrane na vodi je temperatura vode na kojoj se planira izgradnja RPFN elektrane. Prosječna mjesečna temperatura vode Skadarskog jezera je dobijena iz Meteorološkog zavoda Crne Gore. U tabeli 3.1 prikazane su vrijednosti prosječne horizontalne insolacije mikrolokacije i površinska temperatura vode jezera za prosječan dan u svakom mjesecu.

Tabela 3.1. Horizontalna insolacija mikrolokacije i površinska temperatura vode jezera za prosječan dan u svakom mjesecu

Mjesec	Horizontalna insolacija [$\text{kWh/m}^2/\text{dan}$]	Temperatura vode [$^{\circ}\text{C}$]
Januar	1.80	5.00
Februar	2.87	8.00
Mart	3.84	13.50
April	5.07	15.50
Maj	6.47	24.00
Jun	7.27	26.00
Jul	7.50	27.00
Avgust	6.71	27.00
Septembar	5.09	20.00
Oktobar	3.25	13.50
Novembar	2.08	11.50
Decembar	1.67	6.50

Na osnovu tabele 3.1 jasno je da se veća insolacija dostiže tokom ljetnjih mjeseci. Najveća prosječna dnevna insolacija iznosi 7.50 kWh/m^2 i dobija se za mjesec jul, dok se u mjesecu decembru dobija najmanja prosječna dnevna insolacija u vrijednosti od 1.67 kWh/m^2 . Prosječna godišnja dnevna horizontalna insolacija je 4.47 kWh/m^2 . Prosječna godišnja temperatura vode iznosi $16.45 \text{ }^\circ\text{C}$, najveća je u mjesecu julu i avgustu ($27 \text{ }^\circ\text{C}$), a najmanja u mjesecu januaru ($5 \text{ }^\circ\text{C}$). Za dalji proračun važno je istaći da prosječna dubina Skadarskog jezera iznosi 4 m - 6 m. S obzirom na to da RPFN elektrana zauzima vrlo mali procenat površine Skadarskog jezera u analizama je pretpostavljeno da se njenom izgradnjom neće biti bitno promijenjena temperatura vode u jezeru. Ovom pretpostavkom se ide na stranu sigurnosti, jer se prekrivanjem dijela površine jezera FN panelima jedan dio dozračene solarne energije pretvara u električnu energiju, što u bilansu rezultuje manjim zagrijavanjem vode u jezeru. S obzirom na to da je prekrivena površina jezera svega 1.1% ukupne površine ovaj efekat neće biti u velikoj mjeri izražen. Imajući u vidu da predloženi koncept podrazumijeva da je platforma RPFN elektrane u direktnom kontaktu sa vodom, pretpostavljeno je da će temperatura platforme biti jednaka sa temperaturom vode jezera. Ova pretpostavka je usvojena i zbog gore navedene činjenice da predložena RPFN elektrana zauzima relativno malu površinu jezera. S obzirom na to da su FN paneli postavljeni direktno na platformu pretpostavljeno je da se za ambijentalnu mjesečnu temperaturu, mjerodavnu za proračun godišnje proizvodnje RPFN elektrane, može usvojiti mjesečna temperatura jezera. Temperatura FN panela je izračunata prema formuli (3.3) koja je i najčešće korišćena:

$$T_{FN} = T_{amb} + \left(\frac{NOCT - 20^\circ}{0.8} \right) \cdot I \quad (3.3)$$

gdje je T_{FN} temperatura FN panela, T_{amb} je temperatura ambijenta, $NOCT$ je nominalna radna temperatura FN panela i I je ukupna iradijacija kojom je ozračen FN panel. S obzirom na to da se FN panel nalazi u površinskom sloju vazduha i da je konstrukcija FN panela u direktnom kontaktu sa površinom vode. Usvojeno je da je temperatura ambijenta jednaka prosječnoj temperaturi vode na površini jezera a za $NOCT$ je usvojena tipična vrijednost od $45 \text{ }^\circ\text{C}$.

Okolni reljef mikrolokacije karakteriše brdo koje se nalazi sa zapadne strane jezera, slika 3.5. Prilikom proračuna insolacije koja pada na RPFN elektranu, sjenka koju stvara brdo na jezeru pri uglu visine Sunca od oko 20° je uzeto u obzir.

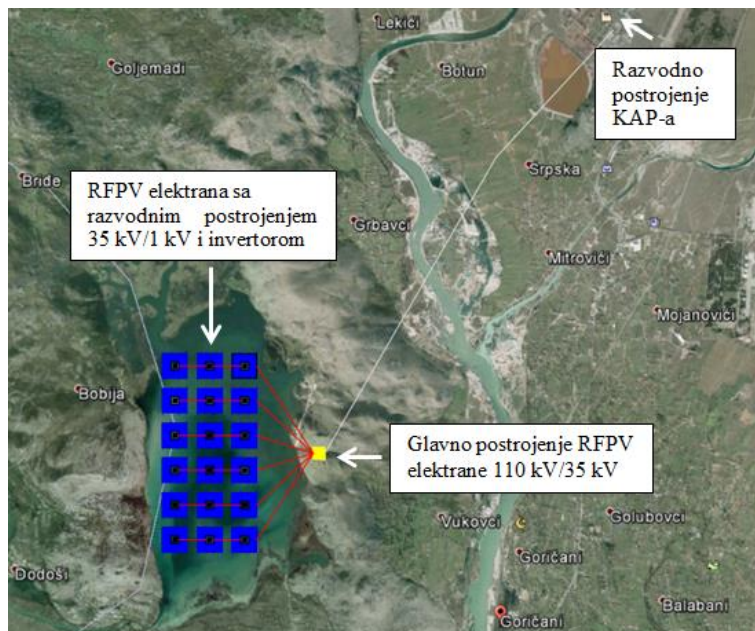


Slika 3.5. Dio Skadarskog jezera koji predstavlja potencijalnu lokaciju RPFN elektrane

Imajući u vidu prezentovane podatke za solarni potencijal, izgradnja FN elektrane za napajanje KAP-a se nameće kao moguće rješenje. Ukoliko bi se potrošnja električne energije za KAP obezbijedila iz obnovljivih izvora električne energije, stekli bi se uslovi za postepeno gašenje termoelektrane Pljevlja i njenu konzervaciju, čime bi se u velikoj mjeri unaprijedila ekološka slika Crne Gore.

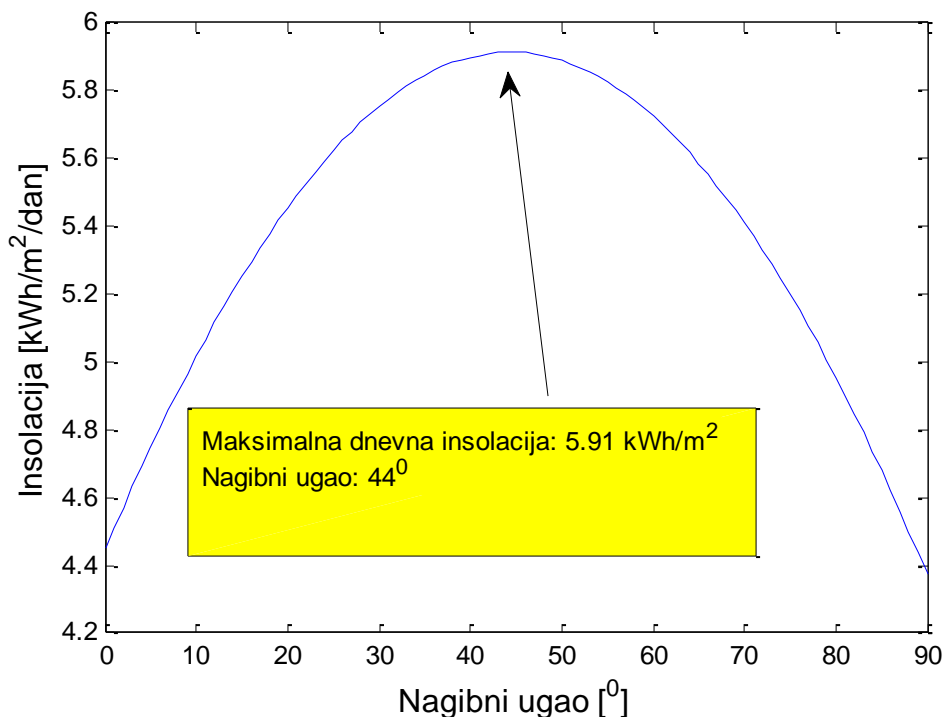
3.4.1. Osnovne tehničke karakteristike predložene RPFN elektrane

U ovoj analizi predstavljeno je idejno rješenje RPFN elektrane na dijelu Skadarskog jezera koje se nalazi na udaljenosti od oko 6 km od KAP-a. Na slici 3.6 prikazana je RPFN elektrana koja se sastoji od 18 jednakih platformi svaka dimenzije 300 m x 300 m.



Slika 3.6. Konfiguracija perspektivne RPFN elektrane na Skadarskom jezeru

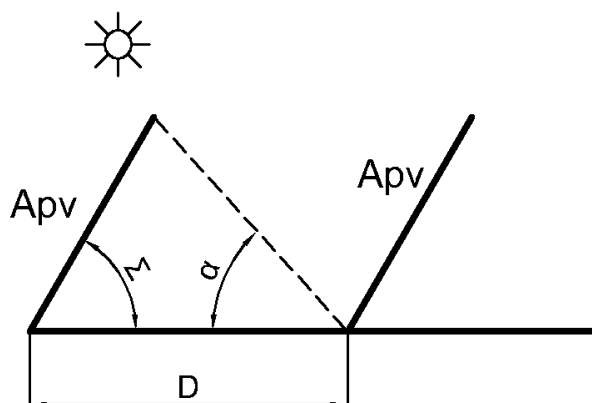
Ukupna instalisana snaga svake platforme je 5 MWp tako da je u zbiru instalisana DC snaga RPFN elektrane 90 MWp. Na svakoj platformi je predviđeno razvodno postrojenje čiji su osnovni elementi inverter i transformator prenosnog odnosa 35/1 kV/kV i nazivne snage 5 MW.



Slika 3.7. Zavisnost dnevne insolacije i nagibnog ugla FN panela

Svako razvodno postrojenje koje se nalazi na platformama je kablovskom vezom povezano sa glavnim razvodnim postrojenjem 110/35 kV/kV koje se nalazi na obali jezera. Glavno razvodno postrojenje je povezano sa razvodnim postrojenjem koje se nalazi u KAP-u kablom dužine 6 km. Instalirana snaga svake platforme je proporcionalna broju FN redova i dužini FN redova na platformi. Dok dužina FN redova zavisi od jedne dimenzije platforme, broj FN redova, pored druge dimenzije FN platforme, zavisi i od nagibnog ugla FN redova. Na slici 3.7 prikazana je prosječna godišnja dnevna insolacija koja pada na FN panel za različite vrijednosti nagibnog ugla FN panele.

Imajući u vidu da je za odabir nagibnog ugla FN reda usvojen kriterijum maksimalne dnevne insolacije, odnosno godišnje, optimalni nagibni ugao FN redova je 44° . Za tu vrijednost nagibnog ugla FN redova dobija se da je prosječna dnevna insolacija 5.92 kWh/m^2 . Za potrebe ove analize, rastojanje između susjednih FN redova je određeno prema dužini sjenke u danu sa najmanjom visinom Sunca, slika 3.8.



Slika 3.8. Proračun minimalnog rastojanja između susjednih nizova FN panela u RPFN [40]

Uvažavajući sliku 3.8, rastojanje između susjednih FN redova je određeno prema sljedećoj jednačini [31]:

$$D = A_{pv} \cdot (\cos\Sigma + \sin\Sigma \cdot \text{ctg}\alpha) \quad (3.4)$$

gdje je A_{pv} dužina kraće stranice FN panela, Σ je nagibni ugao FN panela (44°), α je najmanji ugao visine Sunca koji se javlja 21. decembra i on iznosi 18.74° . S obzirom na koncept RPFN elektrane, zakretanjem panela postiže se da je azimutni ugao svake platforme jednak azimutnom uglom Sunca.

Tipične dimenzije FN panela instalirane snage 300 W su oko 2000 mm x 1000 mm [13], pa je rastojanje između redova $D=2.77 \text{ m}$, shodno formuli (3.4), pod pretpostavkom da je FN panel postavljen na dužoj stranici. Ovo rastojanje obezbjeđuje da se ne javljaju gubici usljed samozasjenčenja FN redova u posle podnevnim satima. S obzirom na usvojene dimenzije platforme i rastojanja između redova FN panela, ovakav dizajn platforme obezbjeđuje da ukupna instalirana snaga FN modula na jednoj platformi iznosi 5 MWp, a ukupna snaga RPFN elektrane koja se sastoji od 18 jednakih platformi je 90 MWp.

Proračun proizvodnje analizirane RPFN elektrane je izvršen pred pretpostavkom da na FN panele pada direktna i difuziona komponenta sunčevog zračenja. Godišnja proizvodnja FN elektrane se računa prema formuli:

$$W = \sum_{t=1}^{8760} I(t) \cdot A_{pv} \cdot L_{pv} \cdot n_{pv} \cdot \Delta t \cdot \eta_{inv} \cdot \eta_{temp} \cdot \eta_M = \sum_{t=1}^{8760} (I_{dir}(t) + I_{dif}(t)) \cdot A_{pv} \cdot L_{pv} \cdot n_{pv} \cdot \Delta t \cdot \eta_{inv} \cdot \eta_{temp} \cdot \eta_M \quad (3.5)$$

gdje je I_{dir} direktna iradijacija koja pada na FN panel, I_{dif} je difuziona iradijacija koja pada na FN panel, n_{pv} je broj FN redova, A_{pv} je dužina FN reda, L_{pv} je širina FN reda, η_{inv} je prosječni stepen

efikasnosti invertora, koji je usvojen da iznosi 0.95, η_M je efikasnost FN modula, η_{temp} je stepen efikasnosti FN panela usljed porasta temperature FN panela, koji se računa prema formuli (3.6):

$$\eta_{temp} = 1 - r \cdot \left(T_{amb} + \left(\frac{NOCT - 20^0}{0.8} \right) \cdot I - 25^0 \right) \quad (3.6)$$

gdje je r smanjenje efikasnosti FN panela za porast temperature iznad nominalne (25^0C). Usvojena vrijednost za r je $0.5 \text{ \%/}^0\text{C}$ [11].

Pošto su u ovoj disertaciji korišćeni satni podaci, onda se usvaja da je $\Delta t = 1 \text{ h}$. Instalirana snaga FN elektrane na DC strani pri standardnim test uslovima je:

$$P = I_{stc} \cdot A_{pv} \cdot L_{pv} \cdot n_{pv} \cdot \eta_M \quad (3.7)$$

gdje je P nazivna snaga FN elektrane, a I_{stc} je iradijacija u standardnim test uslovima koja iznosi 1 kW/m^2 .

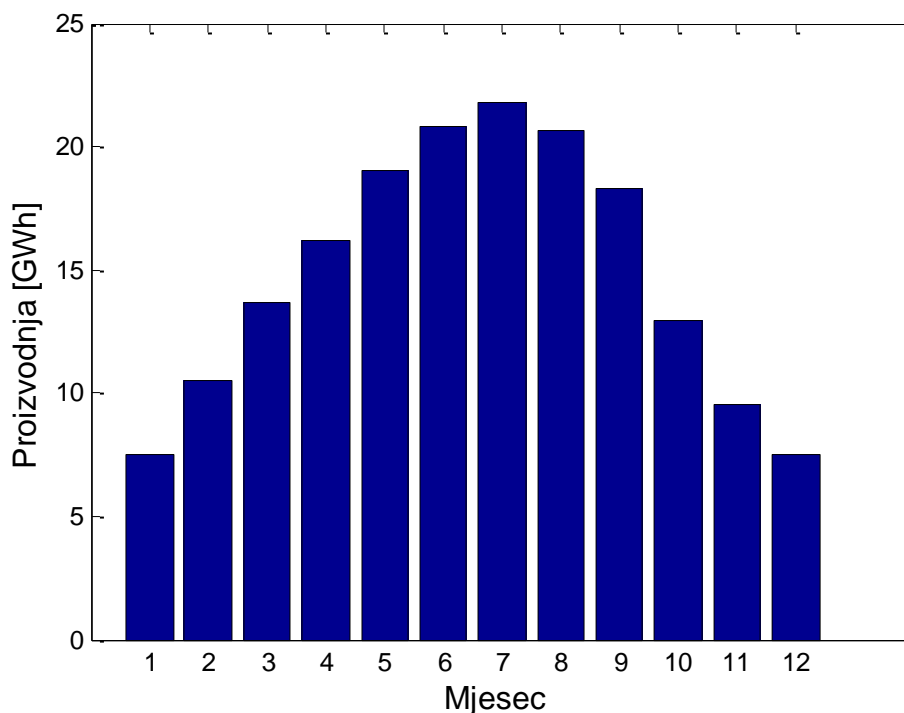
Kombinujući jednačine (3.5) i (3.7), godišnja proizvedena enegije se može izraziti na sledeći način:

$$W = \sum_{t=1}^{8760} P \cdot \frac{(I_{dir}(t) + I_{dif}(t))}{I_{STC}} \cdot \Delta t \cdot \eta_{inv} \cdot \eta_{temp} \quad (3.8)$$

Imajući da je u vidu $I_{stc} = 1 \text{ kW/m}^2$, prethodni izraz se svodi na:

$$W = \sum_{t=1}^{8760} P \cdot (I_{dir}(t) + I_{dif}(t)) \cdot \Delta t \cdot \eta_{inv} \cdot \eta_{temp} \quad (3.9)$$

Godišnja proizvodnja predložene RPFN elektrane iznosi 178.34 GWh , a mjesečna raspodjela proizvodnje je prikazan na slici 3.9. i u tabeli 3.2.



Slika 3.9. Mjesečna proizvodnja predložene RPFN elektrane

Najveća mjesečna proizvodnja se dobija u julu (21.86 GWh) a najmanja u januaru (7.50 GWh). Prosječna dnevna insolacija koja pada na FN panele je 5.91 kWh/m².

Tabela 3.2. Mjesečna proizvodnja električne energije i dnevna insolacija koja pada na FN panele RPFN elektrane

Mjesec	Mjesečna proizvedena energija [GWh]	Insolacija koja pada na FN panele u prosječnom danu [kWh/m ² /dan]
Januar	7.50	2.82
Februar	10.48	4.37
Mart	13.65	5.15
April	16.16	6.30
Maj	19.02	7.55
Jun	20.82	8.71
Jul	21.81	8.89
Avgust	20.63	8.38
Septembar	18.26	7.32
Oktoabar	12.93	4.87
Novembar	9.51	3.70
Decembar	7.53	2.84

3.4.2. Komparativna analiza predloženog i postojećih koncepata FN elektrana

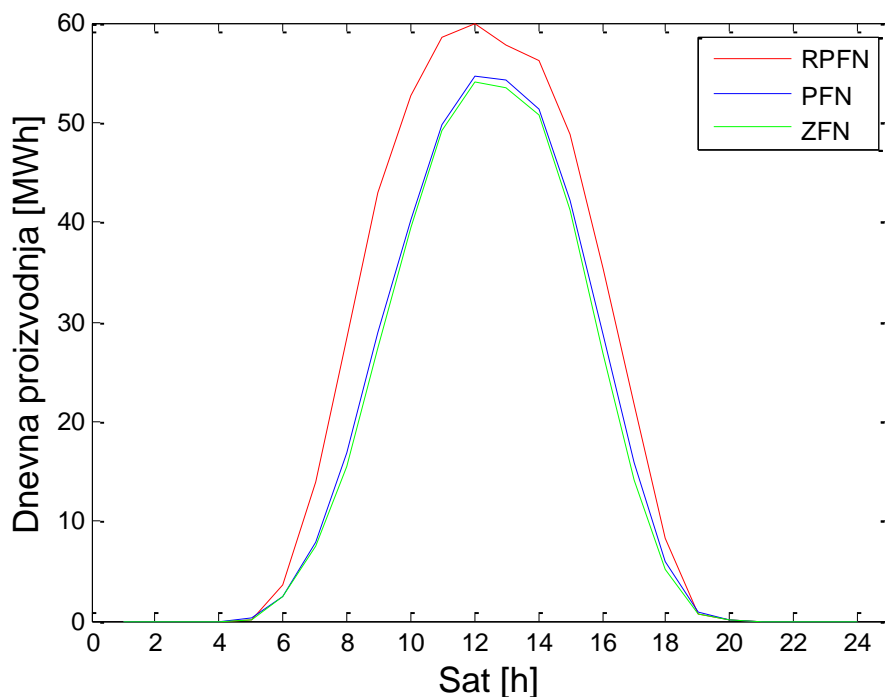
U cilju sagledavanja prednosti predloženog koncepta RPFN elektrane u odnosu na FN elektranu instalisanu na zemlju, kao i u odnosu na ekvivalentnu PFN elektranu sa fiksnim azimutnim uglom i standardnim nosačima, izvršena je uporedna analiza proizvodnje ove tri elektrane. Sve tri FN elektrane karakteriše ista instalisana snaga (90 MWp), rastojanje između FN redova (2.77 m) i podaci o insolaciji. FN elektrana instalisana na zemlji (ZFN elektrana) podrazumijeva da su FN paneli postavljeni pod optimalnim azimutnim i nagibnim uglom. Kriterijum za optimalni nagibni i azimutni ugao FN panela je određen prema istom kriterijumu kao i kod RPFN elektrane. Optimalne vrijednosti za nagibni i azimutni ugao FN panela kod ZFN elektrane su 30° i 0°, respektivno. Dobijena vrijednost za nagibni ugao FN redova od 30° je nešto manja u odnosu na vrijednost koja se dobija pomoću PVGIS kalkulatora. Razlog za navedeno odstupanje je u tome što se radi o različitim bazama podataka, odnosno moguće je da se podaci koji nalaze u NREL-ovj bazi odnose za reprezentativnu godinu u kojoj je nešto više bila izražena difuziona komponenta zračenja. Važno je istaći da prilikom upoređivanja varijantih rešenja FN elektrana su korišćene iste baze podataka. Druga FN elektrana, koja je predmet komparativne analize, je PFN elektrana. Kod PFN elektrane, koja nema mehanizam za praćenje azimutnog ugla, nagibni i azimutni uglovi FN panela su fiksni. Optimalni azimutni ugao FN panela kod PFN elektrane je 0°, dok je nagibni ugao FN panela uslovljen konstrukcijom FN nosača i iznosi 12°. Poređenje godišnje proizvodnje ove tri FN elektrane i prosječne dnevne insolacije koja pada na FN panele je prikazana u tabeli 3.3.

Tabela 3.3. Godišnja proizvodnja i prosječna dnevna insolacija koja pada na FN panele kod: ZFN, PFN i RPFN elektrane iste snage na lokaciji Skadarsko jezero

	ZFN elektrana	PFN elektrana	RPFN elektrana
Godišnja proizvedena energija [GWh]	141.71	145.72	178.34
Prosječna dnevna insolacija [kWh/m ²]	5.02	4.81	5.91

Na osnovu tabele 3.3, može se zaključiti da je proizvodnja predložene RPFN elektrane u odnosu na proizvodnju ZFN elektrane veća za 25.84%, dok povećanje insolacije iznosi 17.73%. Veće procentualno povećanje energije u odnosu na procentualno povećanje insolacije je direktna posljedica činjenice da je temperatura vazduha iznad površine kopna osjetno veća u odnosu na površinsku temperaturu vode jezera, pa samim time postoji i veći pad efikasnosti konverzije sunčeve u električnu energiju usljed nadtemperature kod FN elektrane instalisane na zemlji u odnosu na RPFN. Uticaj temperature se može i sagledati kroz poređenje insolacije i proizvedene energije ZFN i PFN elektrane. Naime, povećanje insolacije kod ZFN u odnosu na PFN elektrane iznosi 7.72%, dok je godišnja proizvodnja energije veća za 2.75%. Predloženi koncept RPFN elektrane omogućava 22.38% veću godišnju proizvodnju od koncepta uobičajene PFN elektrane iste instalisane snage. Na slici 3.10 su prikazani prosječni dnevni dijagrami proizvodnje, izračunati na osnovu godišnjih podataka, za tri različita razmatrana koncepta FN elektrane. Na slici 3.10 se vidi da se dnevna proizvodnja ZFN i PFN elektrana veoma malo razlikuje, dok je proizvodnja RPFN elektrana u svakom satu veća od proizvodnje ZFN i PFN elektrane.

Dodatno povećanje efikasnosti predložene RPFN elektrane bi se moglo postići kroz implementaciju vještačkog hlađenja FN panela, koje bi u ovom slučaju moglo biti realizovano sa jezerskom vodom koja bi se crpila sa većih dubina kako bi imali što bolji efekat hlađenja. Proračun uticaja predloženog postupka na proizvodnju FN elektrane je prikazan u [41].



Slika 3.10. Dnevna proizvodnja RPFN, PFN i ZFN elektrane

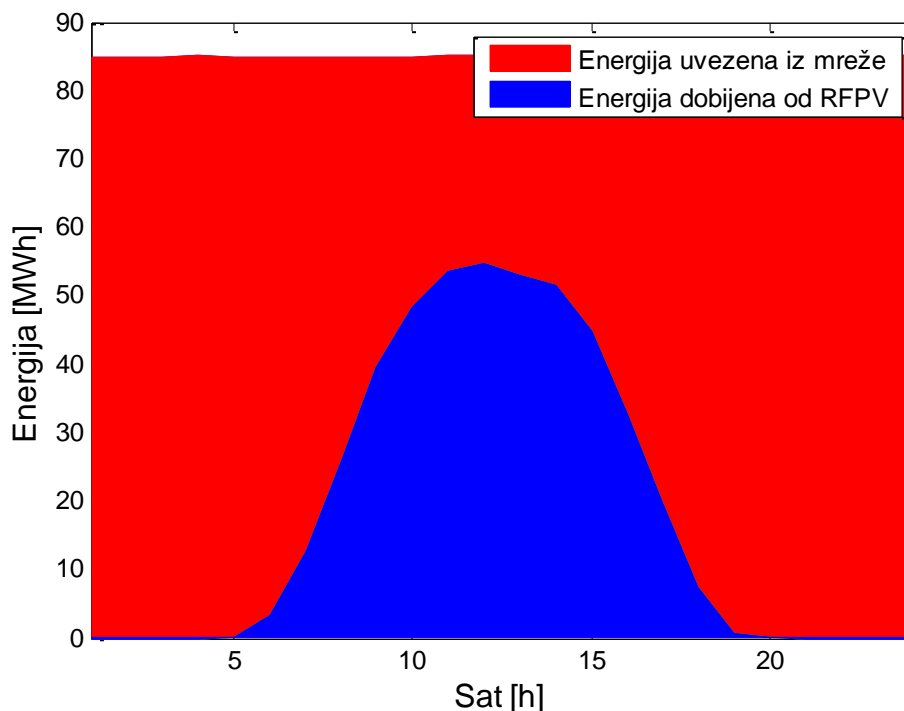
3.3.3. Efekti proizvodnje RPFN elektrane na pokrivanje dijela potrošnje KAP-a

Mjera efikasnosti podmirivanja potrošnje iz lokalne proizvodnje je odnos dobijene energije iz lokalnog izvora i ukupne energije koju zahtijeva potrošač (DCF), [42], [43]. Ovaj odnos, koji je ovdje predstavlja energiju dobijenu iz RPFN elektrane (W_{RPFN}) i energiju koju zahtijeva KAP (W_{KAP}), je definisan na sljedeći način:

$$DCF = \frac{W_{RPFN}}{W_{KAP}}. \quad (3.10)$$

DCF faktor se može proračunati na proizvoljnom vremenskom periodu. U ovoj analizi *DCF*, računat za prosječni dnevnu proizvodnju RPFN elektrane i prosječni dijagram potrošnje KAP-a, iznosi 0.22. Dobijena vrijednost znači da za prosječni dan u toku godine, predložena RPFN elektrana pokriva oko petinu potrošnje KAP-a, slika 3.11.

Poređenjem proizvodnje RPFN elektrane i potrošnje KAP-a za svaki dan u toku godine ukupna energija koja je proizvedena od RPFN elektrane, a koja se ne iskoristi za pokrivanje potrošnje KAP-a, iznosi 217.67 MWh što je svega 0.12% ukupne proizvodnje RPFN, pa se može predložena elektrana okarakterisati kao izvor za pokrivanje sopstvene potrošnje. Međutim, treba naglasiti, da u toku godine kada se tehnološki proces fabrike odvija bez smetnji, odnosno kada je potrošnja KAP-a konstanta i iznosi oko 85 MW, ne postoji period kada je proizvodnja RPFN elektrane veća od potrošnje KAP-a. Uzrok povremenog ‘viška’ energije usljed veće proizvodnje RPFN elektrane u odnosu na potrošnju KAP-a, koji bi se u ovom slučaju plasirao u elektroenergetski sistem Crne Gore, je posledica povremene obustave tehnološkog procesa zbog periodičnog remonta opreme KAP-a.



Slika 3.11. Prosječna dnevna proizvodnja RPFN elektrane i dnevna potrošnja KAP-a

Navedeni kratkotrajni prekidi rad KAP-a se mogu uočiti na slici 3.4. Povećanje vrijednosti *DCF* faktora bi se moglo postići povećanjem instalisane snage RPFN elektrane i razmatranjem korišćenja sistema za skladištenja električne energije [43].

3.3.4. Ekonomska analiza RPFN elektrane

U cilju određivanja troškova proizvodnje, a samim tim i ekonomičnosti RPFN elektrane, pored investicionih troškova potrebno je analizirati troškove održavanja. Za potrebe ove analize usvojen je jednostavan model za procjenu troškova proizvodnje električne energije RPFN elektrane.

Ako se operativni troškovi modeluju kao troškovi po proizvedenom kWh električne energije, onda se mogu proračunati troškovi proizvodnje prema sljedećoj relaciji [31]:

$$c = \frac{\left(\frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right) \cdot C_t}{\eta_r \cdot W} + m \quad (3.11)$$

gdje je c trošak proizvodnje kWh električne energije, C_t je ukupna investicija, η_r je raspoloživost FN elektrane, W je godišnja proizvodnja električne energije FN elektrane, m je specifični operativni troškovi FN elektrane, i je interesna stopa i n je period amortizacije FN elektrane.

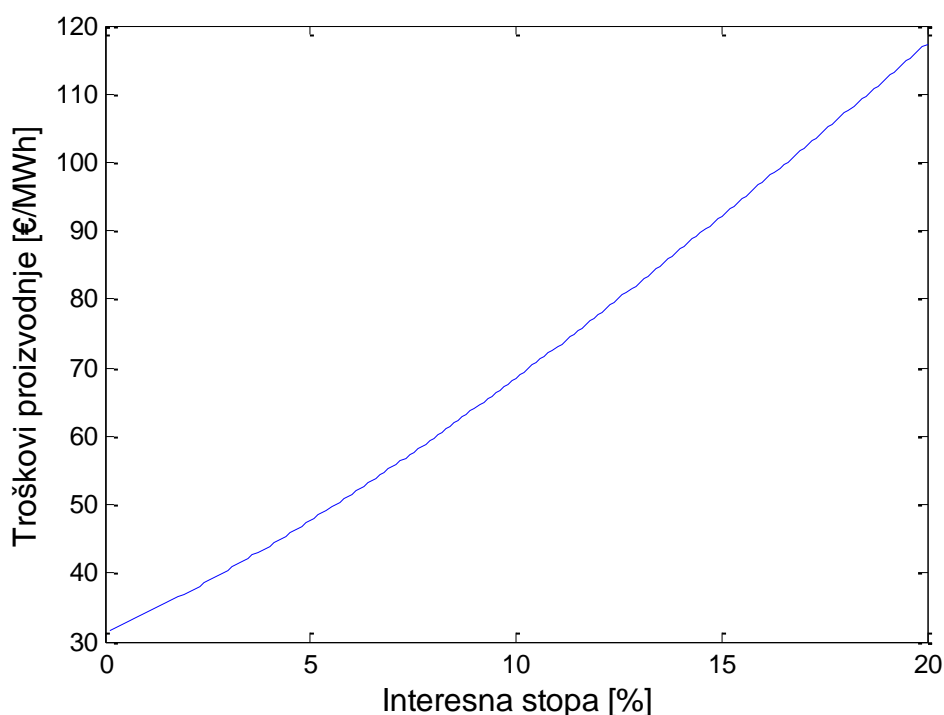
Da bi se izvršila procjena troškova proizvodnje RPFN elektrane korišćenjem modela definisanog relacijom (3.8) potrebne su sljedeće ulazne veličine: procijenjena proizvodnja RPFN elektrane, procijenjeni investicioni troškovi, procijenjeni operativni troškovi, period eksploatacije, raspoloživost RPFN elektrane i interesna stopa. Iskustva u izgradnji i eksploataciji RPFN su relativno mala da bi se mogli pouzdano sagledati investicioni i eksploatacioni troškovi održavanja, naročito u slučaju velikih sistema, kao što je predložen u ovom radu. Razvoj tehnologija platformi za velike RPFN je još uvijek intenzivan. U [44] su analizirani troškovi za konstrukciju RPFN snage 1 MWp u zavisnosti od materijala za konstrukciju. Očekuje se da će sa porastom ukupnih instaliranih kapaciteta RPFN, kao i jediničnih snaga, značajno pasti investicioni troškovi. Cilj ove disertacije je da promoviše novu ideju u pogledu efikasnijeg iskorišćavanja površina jezera i mogućnosti korišćenja RPFN za snabdijevanje električnom energijom velikog potrošača, pa su investicioni troškovi procijenjeni grubo na osnovu istraživanja koja su sprovedena u radu [7]. Prema ovim istraživanjima, investicioni troškovi za RPFN elektranu su za oko 30% veći nego za ekvivalentnu FN elektranu instaliranu na zemlji. Operativni troškovi RPFN se takođe ne mogu egzaktano sagledati zbog nedostatka iskustva, ali se očekuje da će sa porastom instalirane snage specifični troškovi održavanja biti manji. Kod velikih FN elektrana na zemlji specifični operativni troškovi su manji nego kod manjih FN elektrana. U radu [45] je za FN elektranu 20 MWp usvojeno je da su godišnji operativni troškove po cijeni od 10.08 €/kWp instalirane snage. U izvještaju [46], pri procjeni ekonomičnosti FN elektrane velike snage, usvojeni su fiksni godišnji operativni troškovi od 5.46 €/kWp.

S obzirom na jednostavnost predložene konstrukcije i pogona za pokretanje platforme ne očekuje se da će predloženi sistem za praćenje azimutnog ugla Sunca bitno povećati operativne troškove u odnosu na PFN sa fiksnim platformama. U [47] je pokazano da su operativni troškovi FN elektrane na zemlji sa jednoosnim praćenjem Sunca instalirane snage 20 MWp neznatno veći u odnosu na troškove PFN elektrane sa fiksnim nagibnim i azimutnim uglom iste snage. Prosječni operativni troškovi za FN elektrane velike snage su u konstantno padu od 15.97 €/MWh u 2011. godini do 6.72 €/MWh u 2014. godini, [48]. Imajući u vidu da još uvijek ne postoje dovoljna eksploataciona iskustva za PFN elektrane velike snage, kao i da predloženi sistem sadrži inovativni koncept za rotiranje platforme, u ovoj analizi usvojeni su specifični operativni troškovi od 10 €/MWh, što, s obzirom na proračunatu godišnju proizvodnju, iznosi oko, 20 €/kW/god, odnosno oko 1.6% investicionih troškova za godinu dana, što je značajno veće nego uobičajeni troškovi za FN elektrane instalirane na zemlji. Na kraju, u tabeli 3.4. date su procijenjene vrijednosti za ekonomske parametre. Neraspoloživost FN elektrane od 5% obuhvata neraspoloživost mreže i degradaciju efikasnost FN panela tokom vremena eksploatacije elektrane.

Tabela 3.4. Procijenjeni ulazni ekonomski parametri za proračun IRR

Godišnja proizvodnja FN elektrane [GWh]	178.34
Investicioni troškovi [Milion€/MWp]	1
Operativni troškovi [Milion€/GWh]	0.01
Period eksploatacije [godina]	25
Raspoloživost FN elektrane [%]	95

Na slici 3.12 prikazani su procijenjeni troškovi proizvodnje predložene RPFN elektrane za različite interesne stope. Ukoliko se pretpostavi realna interesna stopa od 5%, onda su troškovi proizvodnje električne energije iz RPFN elektrane oko 48 €/MWh. Pretpostavka autora je da bi izgradnja predložene RPFN bila od velikog državnog značaja s obzirom na to da je KAP najveći potrošač električne energije u Crnoj Gori, a da je locirana na terenu koji ima veoma dobre tehničke predušlove za izgradnju predložene elektrane. Njenom izgradnjom bi se u velikoj meri riješio problem deficita električne energije, a bitno bi se smanjili i gubici u prenosnoj mreži.



Slika 3.12. Zavisnost troškova proizvodnje RPFN na Skadarskom jezeru od interesne stope

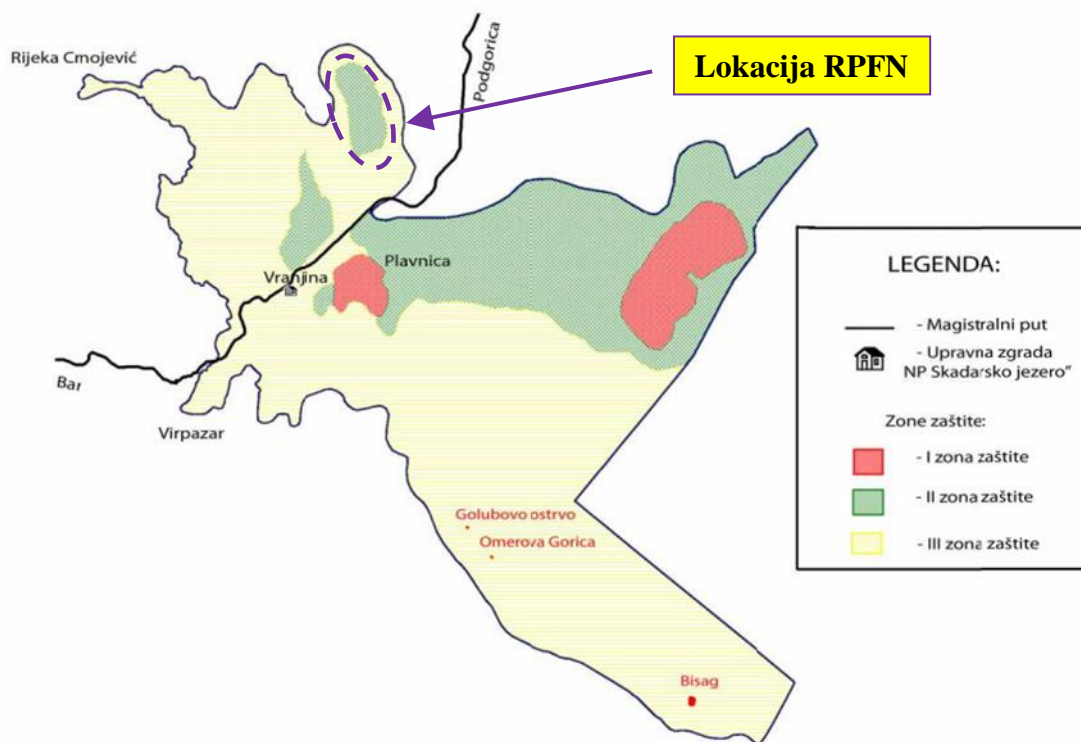
3.3.5. Ekološki uticaj RPFN elektrane na Skadarskom jezeru

Skadarsko jezero, koje je stanište za nekoliko vrsta riba i ptica, predstavlja jako važan lokalitet na kojem ptice selice i ptice močvarice provode zimu, te je lokalitet gniježdenja rijetkog kudravog ili dalmatinskog pelikana. Na ovom lokalitetu zabilježeno je preko 280 vrsta ptica kao i 50 vrsta riba [49]. Područje Skadarskog jezera, sa uskim priobaljem i močvarnim pojasom, je proglašeno za nacionalni park 1983. godine. IBA status (Područje od međunarodnog značaja za boravak ptica) od 1989. godine, a od 1995. godine upisano je na Svjetsku listu močvara od međunarodnog značaja - Ramsar lista. Planskom dokumentacijom [49] prostor Nacionalnog parka Skadarsko jezero je podjeljen u tri zone zaštite. Predložena lokacija RPFN elektrane se nalazi u drugoj zoni zaštite, dok se glavno razvodno postrojenje i dalekovod 110 kV nalaze van zona zaštite, slika 3.13.

U skladu sa važećim Zakonom o nacionalnim parkovima [50] izgradnja objekata u ovoj zoni je dozvoljena uz pribavljene dozvole i saglasnosti nadležnih institucija. Zaštita prirodnih procesa, flore i faune je prioritetni cilj za ovu zonu, pa objekti koji bi bili izgrađeni u ovoj zoni ne bi smjeli u bitnoj mjeri ugrožavati ove procese.

Imajući u vidu posebni prirodni značaj područja Skadarskog jezera, za dalji razvoj predloženog projekta RPFN elektrane potrebno je izvršiti detaljne studije uticaja na životnu sredinu. Ovdje će biti samo navedeni neki od mogućih pozitivnih efekata izgradnje RPFN elektrane.

Jedna od glavnih karakteristika Skadarskog jezera su sezonske oscilacije nivoa vode zbog dotoka iz rijeke Morače, a u kombinaciji sa ograničenim kapacitetom rijeke Bojane da prevede vodu u Jadransko more. S obzirom na relativno malu dubinu jezera, koja u prosjeku iznosi 6 m, denivelacije vode dovode do periodičnih isušivanja jezera, tako da je ljetnji nivo površine vode oko 370 km², dok je nivo vode u zimskom periodu 540 km², a površina pri prosječnom nivou vode iznosi 475 km². S obzirom na to da se predloženi projekat RPFN elektrane planira na izdvojenom delu jezera, prekrivanjem površine jezera sa FN modulima bi u značajnoj mjeri bio smanjen nivo isparavanja vode i zadržana veća površina pod vodom, što bi pogodovalo biljnom i životinjskom svijetu u ovom dijelu jezera, jer nedostatak sunčeve svjetlosti sprečava širenje algi [7], [19].



Slika 3.13. Mapa zoniranja Nacionalnog parka Skadarsko jezero

Dva su glavna efekta koji smanjuju isparavanje vode sa jezera. Prekrivanjem dijela površine jezera smanjuje se ukupna kontaktna površina između akumulacije i vazduha, tako da sa prekrivenog dijela površine jezera praktično nema isparavanja. Drugi efekat je vezan sa toplotnim bilansom vode u jezeru, koji se mijenja nakon izgradnje RPFN elektrane. Jedan dio dozračene sunčeve energije konvertuje se u električnu energiju, dok se jedan dio reflektuje od same RPFN elektrane. Kao rezultat manjeg zagrijavanja, voda u jezeru će biti hladnija, a samim tim i manje će isparavati.

Procjena isparavanja vode sa otvorenih površina u prirodi je dosta kompleksan zadatak zbog velikog broja uticajnih parametara. Isparavanje sa slobodne vodene površine zavisi od: temperature

vode i vazduha, zasićenosti vazduha iznad vodene površine, brzine vjetra, insolacije, atmosferskog pritiska i hemijskih osobina vode.

Isparavanje vode direktno zavisi od površine sa koje isparava, pa se najčešće izražava u jedinicama mm/dan, tako da se definiše koliko mm se smanji nivo vode u akumulaciji u toku prosječnog dana. Razvijeno je dosta matematičkih modela za procjenu isparavanja, jedna od metoda koja se najčešće koristi za proračun isparavanja vode sa otvorenih površina je Penmanova metoda [51]. Postoji više modifikacija ove metode, a u originalnom vidu ima sljedeći izraz:

$$E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{R_n}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{6.43 \cdot f_u \cdot D}{\lambda}, \quad (3.12)$$

gdje je E prosječno dnevno isparavanje sa slobodne vodene površine (mm/dan), R_n je neto radijacija na analiziranoj vodenoj površini ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{d}$), Δ je nagib krive zasićene vodene pare ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$), γ je fiziometrijska konstantna ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$), λ je latentna toplota isparavanja (MJ/kg), f_u je funkcija vjetra i D je deficit pritiska vodene pare (kPa).

Funkcija vjetra se računa prema jednačini (3.13), dok se deficit pritiska vodene pare računa prema (3.14):

$$f_u = a_u + b_u \cdot U, \quad (3.13)$$

gdje je U (m/s) brzina vjetra na visini 2 m iznad površine jezera, a_u i b_u su konstante (u originalnoj jednačini imaju vrijednost $a_u=1$ i $b_u=0.536$).

Deficit pritiska vodene pare se računa kao razlika pritiska zasićene vodene pare (e_s) i aktuelnog pritiska vodene pare (e_a):

$$D = e_s - e_a. \quad (3.14)$$

Koristeći zavisnosti pojedinih klimatoloških veličina i praktično prihvatljiva pojednostavljenja, u [52] je detaljno predstavljen pojednostavljeni Penmanov model, koji je opisan sljedećom jednačinom:

$$E_0 \approx 0.051 \cdot (1 - \alpha) \cdot R_s \cdot \sqrt{T + 9.5} - 2.4 \cdot \left(\frac{R_s}{R_A} \right)^2 + 0.052 \cdot (T + 20) \cdot \left(1 - \frac{RH}{100} \right) \cdot (a_U - 0.38 + 0.54 \cdot U). \quad (3.15)$$

gdje je E_0 prosječno dnevno isparavanje sa slobodne vodene površine (mm/dan), pod pretpostavkom da se površina jezera nalazi na nivou mora ($z=0$), R_s je solarna iradijacija na površini jezera, R_A je solarna iradijacija na površini atmosfere iznad analizirane lokacije, α je albedo od vodene površine koji se standardno uzima da je 0.08, T je srednja vrijednost prosječnih ekstremnih temperatura u analiziranom mjesecu ($^\circ\text{C}$), RH je prosječna vrijednost relativne vlažnosti vazduha u analiziranom mjesecu izražena u procentima (%) i U je srednja mjesečna vrijednost brzine vjetra na visini 2 m iznad površine vode izražena u (m/s).

R_s može biti mjerena u satima trajanja Sunca za prosječan dan, što je standardni meteorološki podatak, prema sljedećoj relaciji:

$$R_s = R_a \cdot \left(0.5 + 0.25 \cdot \frac{n}{N} \right), \quad (3.16)$$

gdje je n broj sunčanih sati u toku prosječnog dana u analiziranom mjesecu, a N je maksimalno mogući broj sunčanih sati za prosječan dan u analiziranom mjesecu, koji se može proračunati za datu geografsku širinu L prema sljedećoj jednačini:

$$N \approx 4 \cdot L \cdot \sin(0.53 \cdot i - 1.65) + 12, \quad (3.17)$$

gdje je i redni broj analiziranog mjeseca u godini.

R_A se proračunava prema sljedećoj aproksimativnoj relaciji:

$$R_A \approx 3 \cdot N \cdot \sin(0.131 \cdot N - 0.95 \cdot L) \quad \text{za } |L| > \frac{23.5 \cdot \pi}{180} \quad (3.18)$$

$$R_A \approx 118 \cdot N^{0.2} \cdot \sin(0.131 \cdot N - 0.2 \cdot L) \quad \text{za } |L| < \frac{23.5 \cdot \pi}{180}$$

Srednja vrijednost prosječnih ekstremnih temperatura u analiziranom mjesecu se računa prema jednačini:

$$T = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2}. \quad (3.19)$$

Jednačina (3.15) je prilagođena proračunima za vodene površine na nivou mora. Za otvorene vodene površine na većim nadmorskim visinama z (m) treba izvršiti korekciju shodno relaciji (3.20), koja je empirijski dobijena, [52]:

$$E = E_0 + 0.00012 \cdot z. \quad (3.20)$$

Smanjenje isparavanja vode sa jezera (ΔV) nakon izgradnje RPFN se može procijeniti na osnovu odnosa prekrivene površine jezera, odnosno ukupne površine platforme RPFN (A_{RPFN}), i ukupne slobodne površine jezera prije izgradnje elektrane (A_{jezero}), prema sljedećoj relaciji:

$$\Delta V = k \cdot A_{RPFN} \cdot E, \quad (3.21)$$

gdje koeficijent k uvažava činjenicu da jedan dio dozračene energije do RPFN predat vodi, što povećava njen potencijal za isparavanje. Vrijednost koeficijenta k ($k < 1$) zavisi od tipa i refleksionih karakteristika platforme, njene prekrivenosti FN modulima i efikasnosti FN modula.

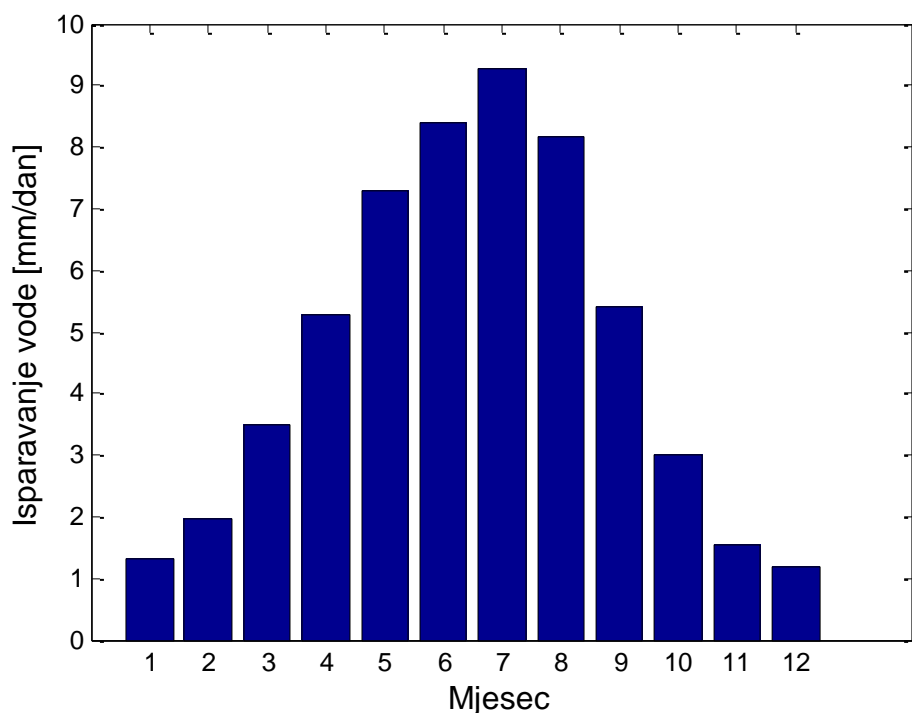
Za proračun isparavanja vode sa Skadarskog jezera korišćeni su podaci iz hidrometeorološke stanice Podgorica, koja se nalazi u blizini jezera. Podaci su dobijeni od Hidrometeorološkog zavoda Republike Crne Gore i odnose se za vremenski period 1995. godine - 2016. godine. U tabeli 3.5 prikazani su korišćeni ulazni podaci u prvih pet vrsta tabele.

Na osnovu jednačina (3.12 - 3.20) izvršen je proračun isparavanja vode sa Skadarskog jezera za prosječan dan u svakom mjesecu, odnosno prosječno dnevno smanjenje nivoa kote površine jezera usljed isparavanja vode. Proračunate mjesečne vrijednosti za dnevno isparavanje su prikazane u poslednjoj koloni tabele 3.5.

Na slici 3.14 grafički su prikazane vrijednosti isparavanja vode za prosječan dan u svakom mjesecu. Najintenzivnije isparavanje vode je u julu. Procijenjena vrijednost smanjenja nivoa vode u ovom mjesecu je oko 8.45 mm dnevno. Najmanji intenzitet isparavanja vode je u decembru i iznosi oko 1.46 mm dnevno.

Tabela 3.5. Ulazni meteorološki parametri i proračunato isparavanje vode sa Skadarskog jezera za prosječan dan u toku svakog mjeseca

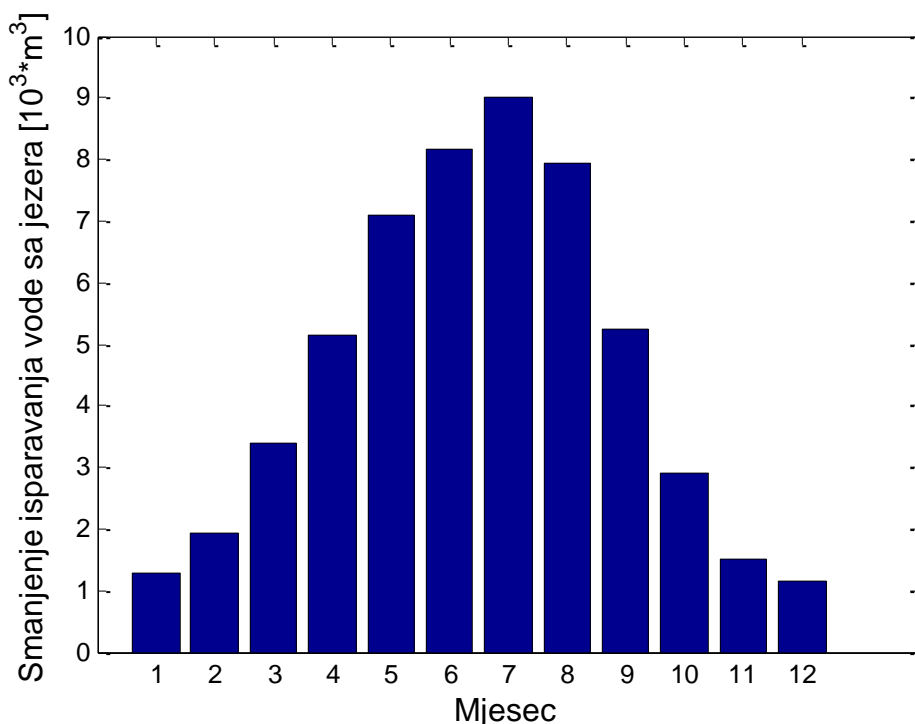
Mjesec	T_{max} [°C]	T_{min} [°C]	RH [%]	n [h]	v [m/s]	E [mm/dan]
Januar	11.00	2.60	70	3.32	1.50	1.31
Februar	11.80	3.30	70	3.60	1.70	1.98
Mart	16.10	6.60	64	4.93	1.84	3.50
April	21.50	10.70	62	6.60	1.70	5.28
Maj	26.20	14.70	58	9.54	1.90	7.29
Jun	31.00	18.90	54	9.60	1.76	8.40
Jul	34.30	21.80	45	10.86	1.96	9.27
Avgust	34.50	21.70	46	10.45	1.89	8.18
Septembar	28.60	17.30	57	8.20	1.76	5.41
Oktobar	22.60	12.3	68	5.71	1.47	2.99
Novembar	16.90	7.40	76	3.71	1.22	1.54
Decembar	11.70	3.80	73	2.74	1.62	1.19



Slika 3.14. Prosječno mjesečno smanjenja kote površine Skadarskog jezera usljed isparavanja vode

Ukupno isparavanje vode sa Skadarskog jezera u prosječnoj godini je oko 170 cm. Na osnovu proračunatih vrijednosti isparavanja vode sa slobodne površine Skadarskog jezera i površine koju zauzima RPFN, shodno relaciji (3.21) proračunata su smanjenja isparavanja vode za svaki mjesec. S obzirom na pretpostavljene refleksione karakteristike platforme i efikasnost FN modula, u relaciji (3.21) pretpostavljena je vrijednost koeficijenta $k=0.6$.

Mjesečno smanjenje isparavanja vode je grafički predstavljeno na slici 3.15. Sabiranjem mjesečnih isparavanja vode dobije se ukupno godišnje smanjenje isparavanja vode nakon izgradnje RPFN elektrane na Skadarskom jezeru i ono iznosi 1.67 mil m^3 .



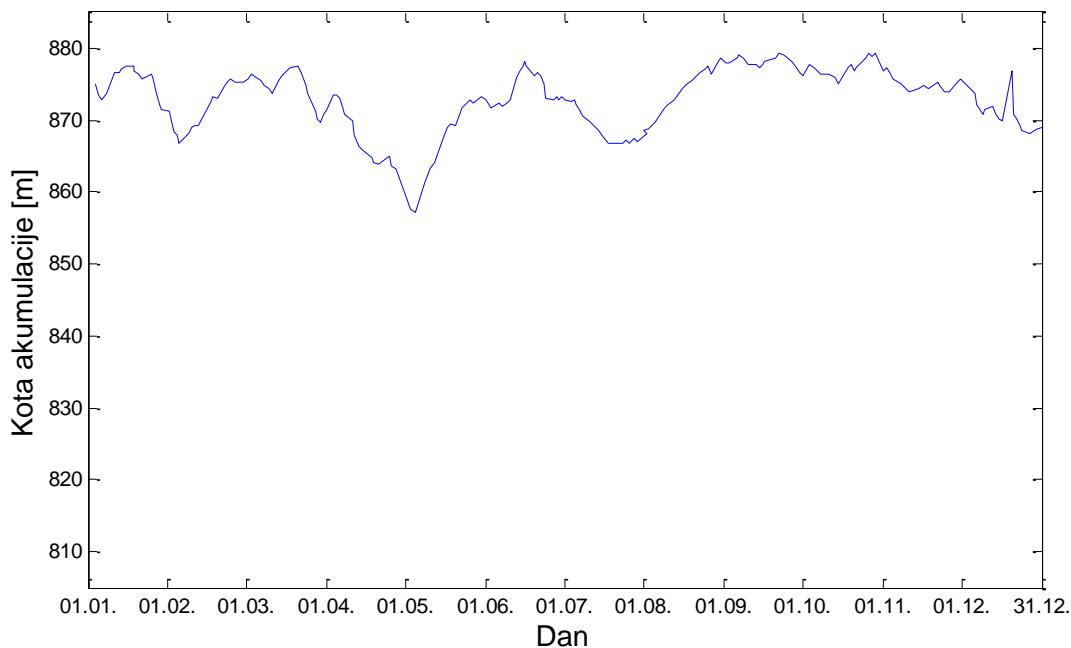
Slika 3.15. Dnevno prosječno mjesečno smanjenje isparavanja vode sa Skadarskog jezera nakon izgradnje RPFN elektrane

Prednosti gradnje predloženog koncepta RPFN elektrane u blizini Skadarskog jezera su višestruki. Imajući u vidu karakteristiku okolnog zemljišta oko jezera, koje je močvarnog tipa, jasno je da bi gradnja predložene elektrane instalisane snage 90 MWp na kopnu zauzela veliku površinu zemljišta koja pripada ili je u blizini urbanih naselja. Dakle, gradnjom RPFN elektrane na malom dijelu Skadarskog jezera postiže se ušteda u uzurpiranju zemljišta, a pored toga smanjuje se isparavanje vode sa Skadarskog jezera. Pored toga, hladniji vazduh neposredno iznad površine jezera doprinosi manjem zagrijavanju FN modula čime se postižu bolje performanse FN elektrane u odnosu na istu konfiguraciju FN elektrane postavljene na kopnu. Nedostatak predloženog koncepta RPFN elektrane se ogleda u tome da može biti primjenjen isključivo na mirnim vodenim površinama (bazenima, rezervoarima, jezerima) i u područjima koja nijesu vjetrovita. U suprotnom, koncept PFN, a posebno RPFN elektrane kod kojih je nagibni ugao FN panela značajno veći u odnosu na nagibni ugao kod PFN elektrana, bi iziskivale značajna investiciona ulaganja za ojačavanje konstrukcije platforme, koja bi vjerovatno dovela do značajnog poskupljenja kWh proizvedene energije iz takvih elektrana.

3.4. Studija slučaja RPFN elektrane na jezeru Zaovine

Zaovinsko jezero se nalazi na planini Tara kod mjesta Zaovine i po svom nastanku je vještačko. Nastalo je u periodu od 1975. godine do 1983. godine, kada je tok rijeke Belog Rzava pregrađen branama. Jezero je gornja akumulacije RHE „Bajina Bašta“ u Perućcu, sa kojom je povezano cjevovodom dužine oko 8 km posredstvom kojeg se voda iz Drine prepumpava u jezero Zaovine. Pri najvišem vodostaju, površina jezera se nalazi na nadmorskoj visini od 882 m. Površina ogleдалa jezera pri maksimalnom vodostaju iznosi 4.38 km^2 , a njegova maksimalna korisna zapremina je oko $150 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Periodična promjena pumpnog i generatorskog režima rada RHE Bajina Bašta uzrokuje dnevne i sezonske varijacije nivoa jezera.

Na slici 3.16 prikazana je promjena kote jezera Zaovine u toku 2016. godine.



Slika 3.16. Promjena kote površine jezera Zaovine u toku 2016. godine

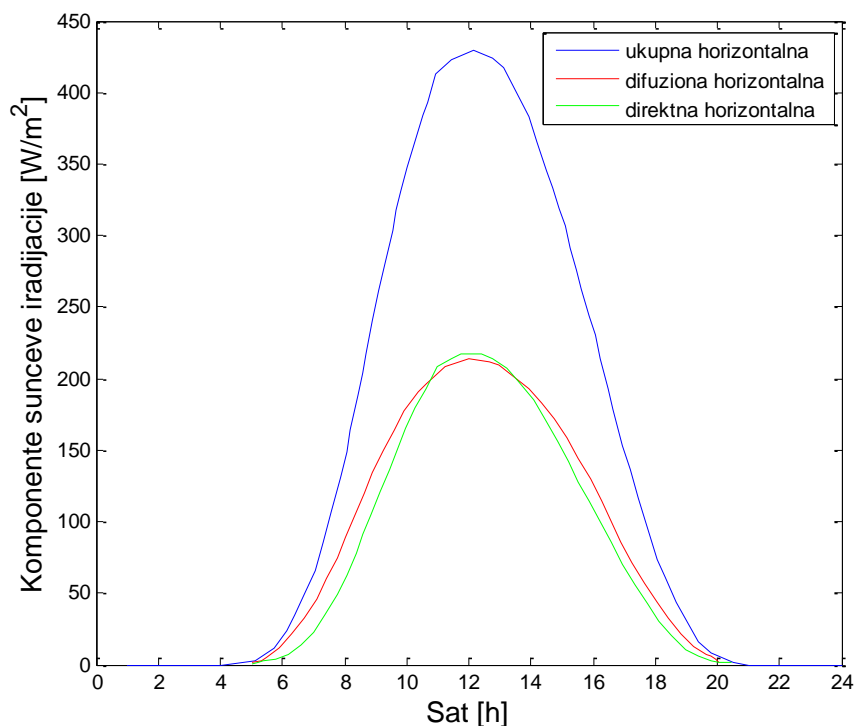
Kada se potpuno isprazni korisna zapremina, kота površine jezera je 815 m, što predstavlja ujedno i najnižu kотu jezera. Površina ogledala jezera pri minimalnoj koti vode je oko 0.8 km².

Na slici 3.17 prikazan je satelitski snimak jezera sa naznačenom granicom jezera pri minimalnoj radnoj koti. Ova granica istovremeno predstavlja i granicu raspoložive površine za izgradnju PFN elektrane.



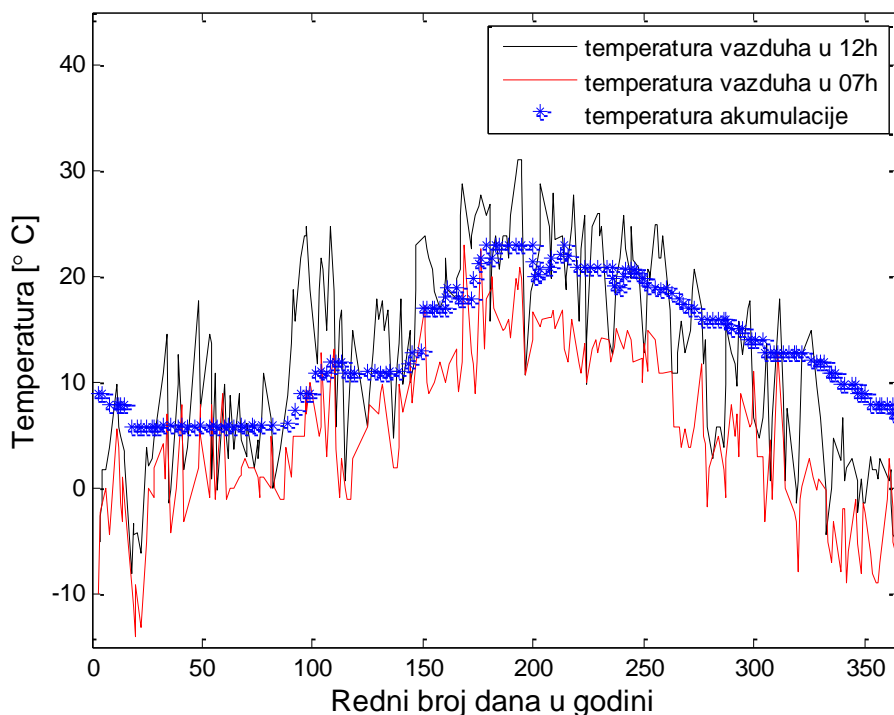
Slika 3.17. Zaovinsko jezero sa naznačenom konturom kada je korisna akumulacija prazna

Ciljna lokacija Zaovine se nalazi u regionu sa relativno dobrim potencijalom solarnog zračenja. Za potrebe ove analize, za ciljnu lokaciju pribavljeni su jednogodišnji srednji satni mjerni podaci o ukupnoj horizontalnoj iradijaciji, kao i podaci o ambijentalnoj temperaturi. Srednja godišnja vrijednost ukupne horizontalne iradijacije je bila 136.6 W/m². Na slici 3.18 prikazana je dnevna raspodjela ukupne horizontalne iradijacije za prosječan dan u toku 2014. godine.



Slika 3.18. Komponente horizontalne iradijacije za prosječan dan u toku 2014. godine

Za procjenu temperature FN panela instalisanih na vodi, potrebno je analizirati temperaturu ambijenta i temperaturu vode, pošto se FN paneli nalaze u zoni 1 m iznad površine jezera. Na slici 3.19 prikazane su izmjerene temperature vazduha i vode na na brani Lazići-prevoj na jezeru Zaovine.



Slika 3.19. Izmjerene temperature vazduha i vode na jezeru Zaovini u toku 2016. godine

U pogledu ambijentalne temperature ciljna lokacija pogoduje izgradnji PFN elektrane, s obzirom na to da i u najtoplijem mjesecu temperatura vode ne prelazi 25 °C, dok u najhladnijim danima je oko 5 °C. Pored bolje efikasnosti, male temperaturne varijacije pogoduju produženju životnog vijeka FN panela.

Pored predložene RPFN elektrane čiji su FN redovi postavljeni pod optimalnim nagibnim uglom, analizirana je i fiksna PFN elektrana čiji su FN redovi postavljenim pod standardnim nagibnim uglom od 12°. Kao i slučaju PFN elektrane na Skadarskom jezeru, fiksna PFN elektrana znači da je za vrijednost azimutnog ugla FN redova usvojena fiksna i optimalna vrijednost. Treće rješenje koje je analizirano je FN elektrana instalisana na zemlji, ZFN elektrana, sa optimalnim nagibnim i azimutnim uglom FN redova. Imajući u vidu da je kriterijum za odabir nagibnih i azimutnih uglova analiziranih FN elektrana maksimalna dnevna insolacija koja pada na FN panele, iterativni postupak kao u poglavlju 3.3.1. je primijenjen i ovdje. Dakle, dobijeno je da je optimalni nagibni ugao FN redova kod ZFN elektrane 34°, dok je optimalni azimutni ugao 0°. Takođe, proračuni pokazuju da je optimalni azimutni ugao PFN elektrane 0°, a za nagibni ugao je usvojeno da iznosi 12°. Optimalni nagibni ugao FN redova u slučaju RPFN elektrane je proračunat i iznosi 46°. U tabeli 3.6. prikazani su rezultati proračuna prosječne dnevne insolacije po jedinici površine FN panela za različita varijantna rješenja.

Tabela 3.6. Prosječne dnevne insolacije na površini FN panela za različita razmatrana konceptijska rješenja FN elektrana

Tip elektrane	ZFN	PFN	RPFN
Nagibni ugao [°]	34	12	46
Praćenje azimutnog ugla	NE	NE	DA
Insolacija [kWh/m ² /dan]	3.95	3.76	4.57

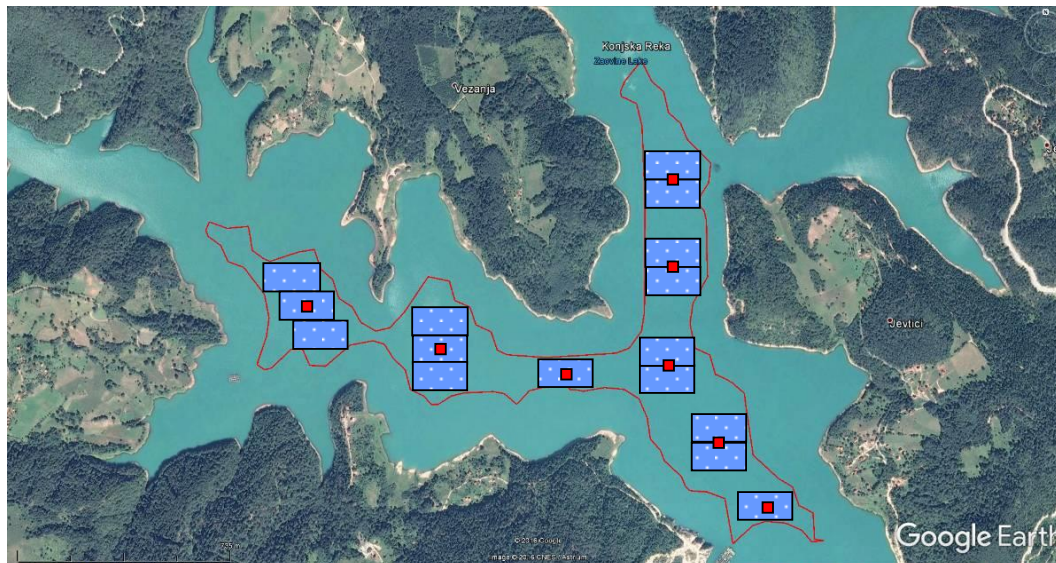
Imajući u vidu da su proračuni izvršeni na osnovu raspoloživih jednogodišnjih mjernih podataka, vrijednosti za prosječnu dnevnu insolaciju su skalirani na osnovu višegodišnje baze mjernih podataka koja je preuzeta iz softvera PVGIS [53].

Na osnovu rezultata iz tabele 3.6 može se zaključiti da je prosječna dnevna insolacija koja pada na FN redove u slučaju RPFN elektrane veća za oko 15.69% u odnosu na ZFN elektranu. Takođe, može se uočiti da će najmanje sunčeve energije od svih analiziranih konfiguracija FN elektrana dospjeti na FN redove u slučaju PFN elektrane.

3.4.1. Idejno rješenje RPFN elektrane na jezeru Zaovine sa osvrtom na tehničke, ekonomske i ekološke procjene

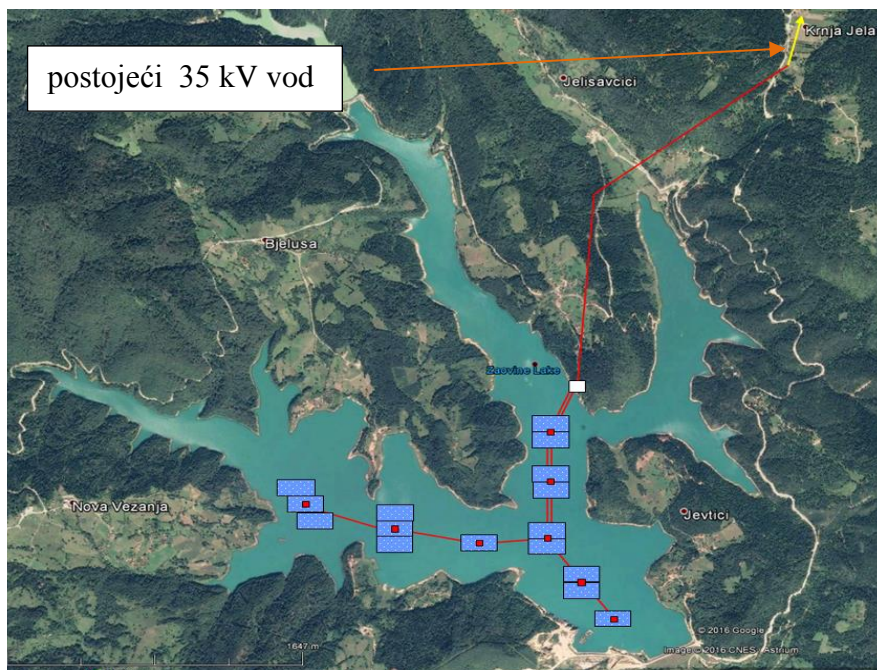
Prostor na koji je projektovana FN elektrana na jezeru Zaovine je određen površinom jezera pri minimalnoj radnoj koti akumulacije. Na slici 3.20 prikazano je idejno rješenje prostornog rasporeda plivajućih platformi na površini jezera. RPFN elektrana bi bila realizovana od 16 jednakih platformi dimenzija 200 m x 100 m, tako da bi ukupna površina koju bi prekrile FN platforme bila oko 0.32 km², što je oko 40% ukupne površine jezera pri minimalnoj koti, odnosno 7.5% pri maksimalnoj koti jezera. Svaka platforma bi bila realizovana sa standardnim FN modulima nazivne snage 270 W_p čije su dimenzije 1675 mm x 1001 mm. FN paneli bi bili pričvršćeni za odgovarajuće nosače tako da bi bili formirani redovi, pri čemu bi u svakom redu bilo po 120 FN modula. Navedno implicira da je predviđeno da su FN moduli oslonjeni na platformu svojom dužom stranicom. Kriterijum za projektovano rastojanje između FN redova, koje iznosi 2.35 m, je izračunato kao i u slučaju RPFN elektrane na Skadarskom jezeru, jednačina (3.4). Imajući u vidu dužinu platforme od 100 m, ukupan broj FN redova na jednoj platformi bi bio 42. Dakle, instalisana

snaga jedne platforme bi bila 1.36 MW_p , a ukupna instalisana snaga cijele RPFN elektrane bi bila 21.76 MW_p .



Slika 3.20. Idejno rješenje RPFN elektrana na jezeru Zaovine

Pretpostavljeno idejno rješenje RPFN elektrane se sastoji od 8 cjelina, kao što je prikazano na slici 3.18. Svaka od 8 cjelina ima svoje razvodno postrojenje 35/1 kV/kV. Instalirana snaga razvodnog postrojenja će biti usklađena sa snagom odgovarajuće cjeline i kretaće se od 1.5 MVA do 4.5 MVA. Razvodna postrojenja će biti podvodnim kablovima povezane na glavno razvodno postrojenje koje se nalazi na obali, gdje će se sticati dva podvodna fidera 35 kV koji povezuju RPFN elektranu sa postrojenjem, slika 3.21. U glavnom razvodnom postrojenju će se nalaziti upravljačko-mjerna stanica sa odgovarajućom opremom. Iz postrojenja polazi 35 kV nadzemni vod do mesta Krnja Jela, koje je udaljeno 2.8 km, gdje se priključuje na postojeći 35 kV dalekovod. Ovaj dalekovod je povezan na TS 220/35 kV/kV, koja se nalazi u naselju Beserovine, koje je udaljeno od Krnje Jele oko 8 km. Postojeći dalekovod je potrebno ojačati i smislu povećanja prenosne moći.



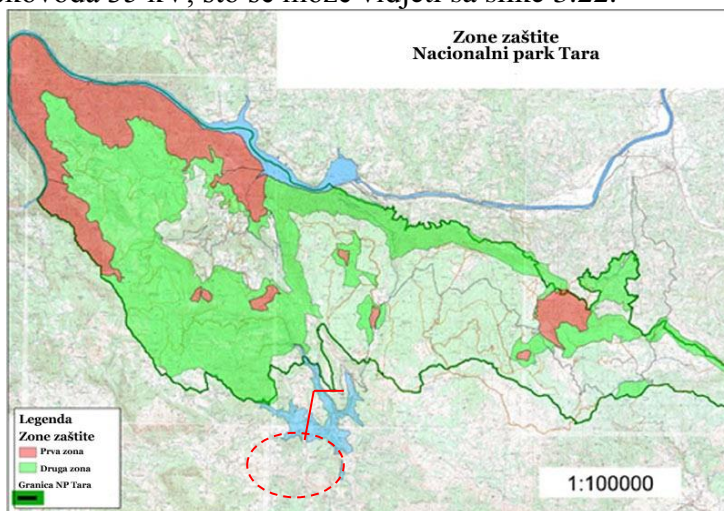
Slika 3.21. Idejno rješenje povezivanja FN elektrane Zaovine na elektroenergetski sistem

S obzirom na to da je poznata ukupna snaga RPFN elektrane, moguće je koristeći relaciju (3.5), proračunati očekivanu godišnju proizvodnju RPFN elektrane. Radi uporedne analize u tabeli 3.7 prikazana je i očekivana godišnja proizvodnja ZFN i PFN elektrane iste instalisane snage.

Tabela 3.7. Očekivana godišnja proizvodnje RPFN, PFN i ZFN elektrana na jezeru Zaovine

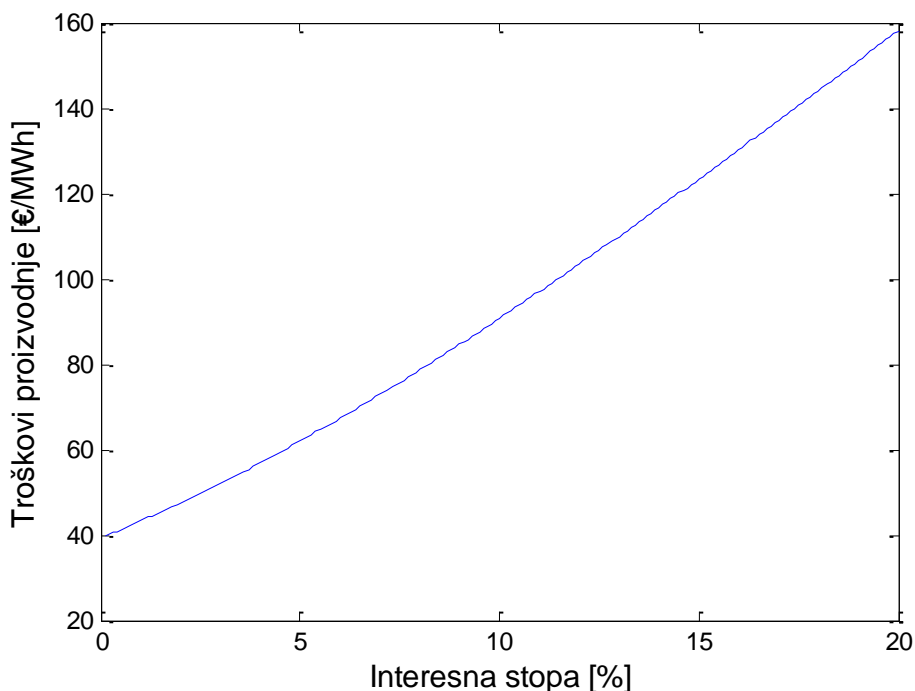
Parametri FN elektrana	ZFN	PFN	RPFN
Godišnja proizvodnja elektrane [GWh]	27.03	25.71	31.25

Lokacija jezera Zaovine se nalazi u blizini nacionalnog parka Tara, kao specijalnog prirodnog rezervata. Planskom dokumentacijom prostor Nacionalnog parka Tara je podijeljen u dvije zone zaštite. Lokacija jezera Zaovine se nalazi van granica zona zaštite, a takođe i cjelokupna predložena trasa priključnog dalekovoda 35 kV, što se može vidjeti sa slike 3.22.



Slika 3.22. Mapa zoniranja nacionalnog parka Tara sa naznačenom lokacijom perspektivne FN elektrane na jezeru Zaovine i trasom priključnog dalekovoda

Imajući u vidu navedeno, smatra se da ne bi postojala prepreka u vidu ekologije za gradnju predložene FN elektrane.



Slika 3.23. Zavisnost troškova proizvodnje RPFN elektrane Zaovine od interesne stope

Ekonomska analiza projekta RPFN elektrane na jezeru Zaovine je izvršena na sličan način kao i u slučaju RPFN elektrane na Skadarskom jezeru. Uvažavajući procijenjenu godišnju proizvodnju razmatrane RPFN elektrane na jezeru Zaovine u iznosu od 31.25 GWh, zavisnost troškova proizvodnje i interesne stope je prikazana na slici 3.23. Na osnovu prethodne slike može se zaključiti da procijenjeni troškovi proizvodnje RPFN na jezeru Zaovine iznose 62.01 €/MWh za usvojenu interesnu stopu od 5%.

3.4.2. Uticaj predložene RPFN elektrane na povećanje efikasnosti RHE Bajina Bašta

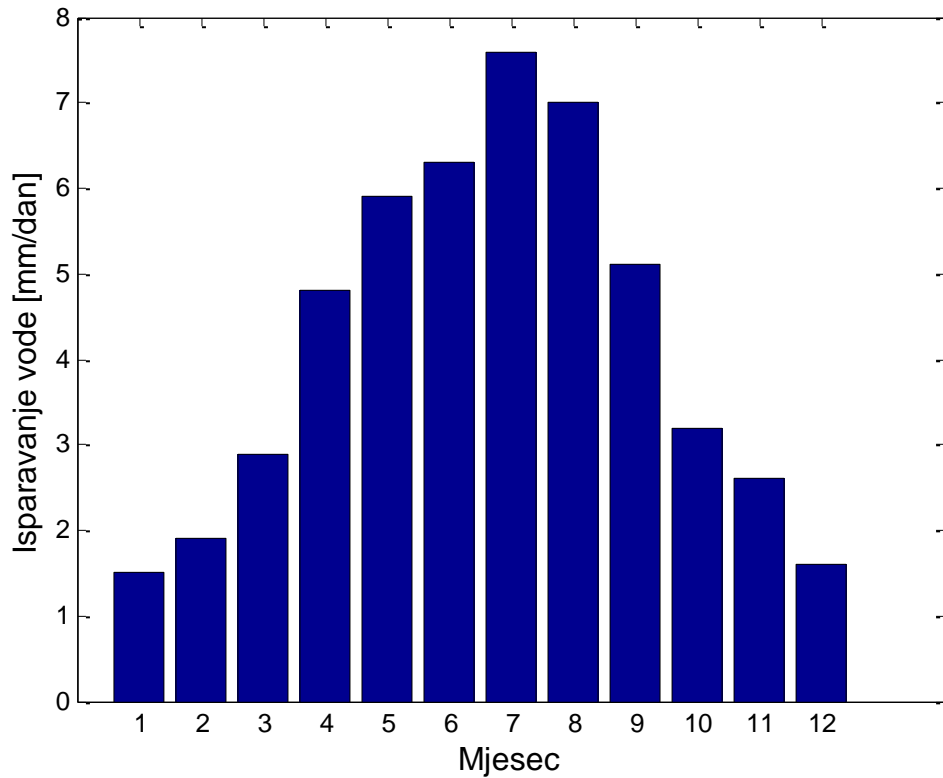
Jedna od prednosti instalacije FN elektrana na površine jezera je smanjenje gubitaka vode usljed isparavanja. Međutim, u slučaju gradnje ovakvih elektrana na gornjim jezerima kod akumulacionih hidroelektrana, smanjenje isparavanja vode ima i direktnu ekonomsku korist. S obzirom na to da je neto pad RHE Bajina Bašta oko 600 m, energetska vrijednost vode u akumulaciji je dosta velika (oko 1.3 kWh/m³ električne energije), tako da svako smanjenje isparavanja donosi značajno povećanje efikasnosti RHE Bajina Bašta. Procjena isparavanja vode je izvršena prema postupku prikazanom u sekciji 3.3.5.

Za proračun isparavanja vode sa jezera Zaovine korišćeni su podaci iz hidrometeorološke stanice Zlatibor, koja je udaljena oko 28 km od jezera. U tabeli 3.8 prikazani su korišćeni ulazni podaci na lokaciji hidrometeorološke stanice Zlatibor za 2015. godinu. Ova godina je odabrana s obzirom da su srednje mjesečne temperature približno odgovarale višedecenijskom prosjeku. Na osnovu jednačina (3.12 - 3.20) izvršen je proračun isparavanja vode sa jezera Zaovine za prosječan dan u svakom mjesecu, odnosno prosječno dnevno smanjenje nivoa kote površine jezera usljed isparavanja vode. Proračunate vrijednosti su prikazane u poslednjoj koloni tabele 3.8.

Tabela 3.8. Ulazni meteorološki parametri i proračunato isparavanje jezera Zaovine za prosječan dan u toku svakog mjeseca

Mjesec	T_{max} [°C]	T_{min} [°C]	RH [%]	n [h]	v [m/s]	E (mm/dan)
Januar	2.80	-3.90	84	2.32	2.0	1.50
Februar	3.70	-4.10	82	3.68	1.20	1.90
Mart	6.10	-1.30	79	4.16	1.50	2.90
April	16.00	0.00	70	6.57	2.00	4.80
Maj	19.00	9.20	68	6.74	1.10	5.90
Jun	20.70	10.90	73	8.07	1.00	6.30
Jul	26.30	15.00	63	10.90	1.10	7.60
Avgust	25.90	15.10	66	9.23	1.30	7.00
Septembar	20.60	11.30	73	6.10	1.10	5.10
Oktoibar	13.40	5.90	86	3.93	1.20	3.20
Novembar	11.30	1.80	71	4.93	1.40	2.60
Decembar	5.60	-3.60	84	4.22	1.50	1.60

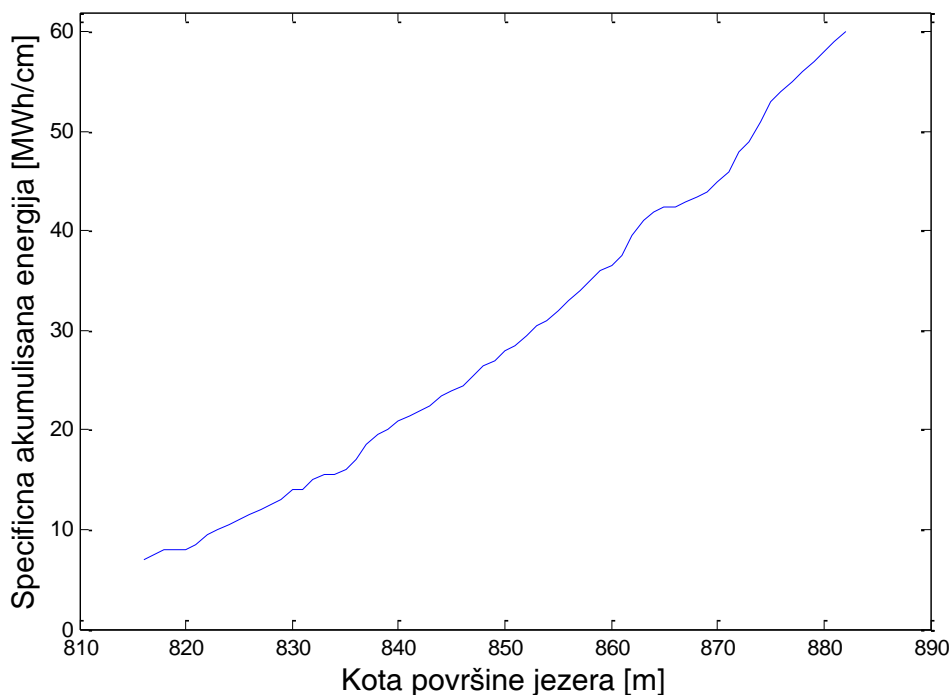
Grafički prikaz proračunatih vrijednosti isparavanja je dat na slici 3.24.



Slika 3.24. Prosječno mjesečno smanjenje kote površine jezera Zaovine usljed isparavanja vode

Najintenzivnije dnevno isparavanje vode je u mjesecu julu i iznosi 7.6 mm dnevno, a najmanje je u mjesecu januaru i iznosi oko 1.5 mm. Ukupno godišnje isparavanje vode sa jezera Zaovine je oko 154 cm.

Usljed rada RHE Bajina Bašta, kota jezera se mijenja, tako da se mijenja i površina sa koje voda isparava, kao i energetska vrijednost 1 m³ vode u akumulaciji zbog smanjenja statičkog pada.



Slika 3.25. Akumulirana energije 1 cm vodenog stuba u jezeru Zaovine pri različitim kotama površine jezera

Na slici 3.23 prikazana je energetska vrijednost 1 cm vodenog stuba jezera pri različitim kotama vode u njemu. Tabela podaci, na osnovu kojih je nacrtan dijagram na slici 3.25, su dobijeni od tehničkih službi RHE Bajina Bašta.

Na osnovu slike 3.25 može se zaključiti da, pri prosječnoj koti površine jezera od 870 m, energetska vrijednost 1 cm vodenog stuba jezera iznosi oko 45 MWh električne energije. Na osnovu proračunate vrijednosti smanjenja vodenog stuba jezera usljed isparavanja, može se procijeniti godišnji gubitak proizvedene energije u RHE Bajina Bašta usljed isparavanja vode i on iznosi $45 \text{ MWh/cm} \cdot 154 \text{ cm/god} \approx 6930 \text{ MWh/god}$. S obzirom na to da elektrana proizvodi energiju vršnog karaktera, finansijski gubici su značajni i uz pretpostavljenu vrijednost od 60 €/MWh oni iznose oko 415000 €/god. Izgradnjom predložene RPFN elektrane smanjiće se isparavanje vode sa dijela površine jezera koji je prekriven FN modulima. Površina jezera koja je prekrivena platformama iznosi $0,32 \text{ km}^2$. Ako se pretpostavi da sa ove površine jezera nema isparavanja vode, onda je godišnje smanjenje isparavanja vode sa jezera Zaovine nakon izgradnje predložene RPFN elektrane oko $1,54 \cdot 0,32 \approx 0,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{god}$. Energetska vrijednost ove količine vode u akumulaciji Zaovine pri prosječnoj koti jezera od 870 m je oko 700 MWh/god. Dakle, izgradnjom predložene FN elektrane na jezeru Zaovine bi se povećala proizvodnja RHE Bajina Bašta za oko 700 MWh/god, što bi povećalo prihod RHE Bajina Bašta od oko 40000 €/god.

4. UNAPREĐENJE KONCEPTA RPFN ELEKTRANE PRIMJENOM ALUMINIJUMSKIH REFLEKTORA

4.1. Uvod

Povećanje efikasnosti konverzije sunčeve u električnu energiju upotrebom reflektora kod FN elektrana instaliranih na zemlji je tema mnogih radova. Uopšteno, u cilju povećanja reflektovane komponente solarnog zračenja (albedo) koje pada na slobodnu površinu između FN redova, u upotrebi su razni reflektori: staklene površine, bijeli sitni kamen, aluminijumske ploče, aluminijumske folije, ploče od tvrdog materijala premazane bijelom bojom. Bitna karakteristika reflektora koji se upotrebljavaju kod FN elektrana velike snage, pored reflektujućih svojstava, je održavanje i cijena reflektora. Imajući u vidu da velike FN elektrane karakterišu relativno velike površine FN panela i reflektora, prednost imaju reflektori koji nijesu skupi.

U [10] i [54] analizirani su uticaji veličine refleksione površi na povećanje proizvodnje električne energije FN panela. U navedenim radovima analiziran je sistem koji pretpostavlja da je jedna ivica reflektora oslonjena na donju stranicu FN panela – donji reflektor. Takođe, u radovima se mogu naći i druge konfiguracije sistema FN panel-reflektor. Naime, u radu [55] je navedeno da je postavljanjem gornjeg reflektora (zajednička stranica reflektora i FN panela je gornja stranica FN panela) moguće dobiti i do 20% više energije u odnosu kad postoji samo FN panel. Predmet radova [56] i [57] je sistem FN panela sa dva reflektora: gornjim i donjim. U radu [57], za optimalne vrijednosti nagibnog ugla FN panela i reflektora dobija se povećanje i do 45%. Uvažavajući afirmativne rezultate sa aspekta povećanja efikasnosti proizvodnje upotrebom reflektora kod FN elektrana instaliranih na zemlji kao i savremeni trend porasta gradnje PFN elektrana, predmet razmatranja ovog poglavlja disertacije je upotreba reflektora kod RPFN elektrana velike snage.

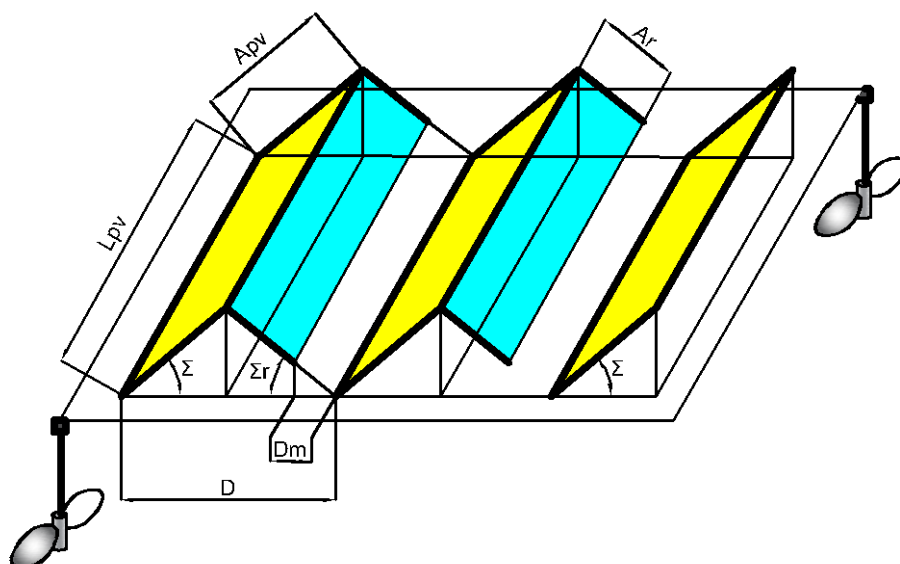
S obzirom na to da RPFN elektrane karakterišu veća vrijednost optimalnog nagibnog ugla FN panela, koji je značajno veći nego kod fiksnih PFN [8], očekivano je da efekat refleksionih površina bude izraženiji u odnosu na fiksne PFN. U ovome poglavlju je predstavljeno idejno rješenje za povećanje tehno-ekonomske efikasnosti velikih RPFN elektrana upotrebom reflektora između FN redova [58]. Ako se uzme u obzir da predložena RPFN elektrana ima mogućnost praćenja azimutnog ugla Sunca, onda je jasno da reflektori moraju imati određen stepen čvrstoće na mehanička naprezanja. Shodno navedenom, reflektori napravljeni od stakla nijesu pogodni za RPFN elektrane, već reflektori koji su napravljeni od jeftinog materijala kao što su aluminijumske ploče ili ploče prekrivene aluminijumskom folijom.

U radovima [59], [60] i [61] prikazani su analitički modeli za proračun iradijacije za sisteme koji se sastoje od FN panel i reflektora. Ovi radovi su poslužili kao osnova mnogim radovima sa sličnom tematikom. Metodologije za izračunavanje iradijacije predstavljane u ovim radovima zasnivaju se na projekciji ozračenog dijela reflektora i FN panela na vertikalnu ravninu. Nakon toga, proračun iradijacije koji pada na FN panele se izračunava projekcijom vertikalne ravni na FN panele. Uzimajući u obzir specifičnosti predloženog koncepta RPFN elektrane sa reflektorima, u radu je predstavljen jednostavniji model za proračun iradijacije nego u [21].

Uticaj najvažnijih tehničkih parametara RPFN elektrane, kao što su nagibni ugao i rastojanje između FN redova, je ispitan na tehno-ekonomske indikatore predložene elektrane. Pored toga, dato je poređenje predložene RPFN elektrane sa reflektorima sa RPFN elektranom bez reflektora. Uticaj karakteristika reflektora sa aspekta koeficijenta refleksije na proizvodnju predložene elektrane je detaljno analiziran. Takođe, doprinos reflektora na godišnju, mjesečnu i satnu proizvodnju je analiziran kroz numeričke eksperimente. Svi dobijeni rezultati se baziraju na terenskim satnim meteo podacima, dok su za tehničke podatke FN panela i invertora usvojene tipične vrijednosti.

4.2. Opis tehničkog rješenja i metodologije proračuna proizvodnje predložene RPFN elektrane sa reflektorima

Kao što je navedeno u radovima [8] i [62], u zavisnosti od veličine vodene površine, RPFN se može sastojati od nekoliko rotirajućih platformi. Dužina, širina i broj FN redova određuju snagu jedne FN platforme. Radi ilustracije, na slici 4.1 prikazana je rotirajuća platforma na kojoj je postavljeno 3 FN reda. U radovima [8] i [62] predloženo je nekoliko potencijalnih rješenja za praćenje azimutnog ugla Sunca, sa ciljem da je azimutni ugao Sunca jednak azimutnom uglu PV platforme.



Slika 4.1. Rotirajuća platforma sa tri FN reda

Predloženo rješenje za povećanje efikasnosti RPFN podrazumijeva da su reflektori od aluminijuma postavljeni između FN redova, kao na slici 4.1. Reflektori su na slici označeni svijetlo plavom bojom i ukupan broj reflektora je $n_{pv}-1$, gdje je n_{pv} broj FN redova. Sa slike 4.1 se može uočiti da su reflektori postavljeni cijelom širinom FN redova, a gornja ivica reflektora je zajednička sa gornjom ivicom FN redova. Reflektori, u zavisnosti od rastojanja između FN redova (D) i nagibnog ugla FN redova (Σ) su nagnuti u odnosu na horizontalnu ravan pod uglom od (Σ_r) a njihova širina je označena sa (A_r). U cilju održavanja i servisiranja FN panela i reflektora predviđen je slobodni prostor na platformi između svakog FN reda i reflektora. Širina pomenutog rastojanja je označena sa D_m . Širina FN reda je označena sa A_{pv} .

4.3. Model iradijacije za predloženu RFPV elektranu sa reflektorima

Model za iradijaciju prezentovan u ovome poglavlju podrazumijeva da u blizini elektrane nema okolnih objekata koji stvaraju sjenku na FN panele. U cilju što preciznijeg sagledavanja karakteristika predloženog rješenja pretpostavljeno je da se može zanemariti reflektovana iradijacija od okolnih objekata, terena i vode. Prema tome, ukupna iradijacija koja pada na razmatranu FN elektranu sastoji se od sljedećih komponenti iradijacije: direktna iradijacija koja pada sa neba na FN panele (I_{dir}^{pv}), difuziona iradijacija koja pada sa neba na FN panele (I_{dif}^{pv}), reflektovana iradijacija koja se odbija direktno od reflektora ka FN panelima (I_{dir}^r), reflektovana iradijacija koja se odbija difuziono od reflektora ka FN panelima (I_{dif}^r). Imajući u vidu da reflektovana iradijacija koja se odbija od slobodnog prostora između reflektora i FN redova ka FN panelu zavisi od širine D_m [13],

koja je veoma mala u odnosu na dužinu i širinu FN redova i reflektora, slika 4.1, u ovome radu je zanemarena, čime se ide na stranu sigurnosti. Dakle, iradijacija koja dopijeva na FN panele je data sljedećom formulom:

$$I = I_{dir}^{pv} + I_{dif}^{pv} + I_{dir}^r + I_{dif}^r. \quad (4.1)$$

Direktna iradijacija koja pada sa neba na FN panel prikazana je formulom:

$$I_{dir}^{pv} = (1 - \varepsilon \cdot SIF) \cdot I_b \cdot \cos\theta, \quad (4.2)$$

gdje je I_b direktna komponenta solarnog zračenja, SIF je parametar kojom se modeluje pad efikasnosti FN panela usljed djelimičnog zasjenčenja, θ je incidentni ugao Sunca i ε su gubici usljed zasjenčenja FN panela.

Realnim terenskim eksperimentalnim mjerenjima, opisanim u radu [63] utvrđeno je da vrijednost SIF faktora se može smatrati konstantnom ($SIF=2$) za širok opseg pokrivenosti sjenkom FN modula. Takva pretpostavka je uvažena i u radu [64]. Sa druge strane, u radu [65], u laboratorijskim mjerenjima je zaključeno da vrijednosti za SIF faktor je ipak više osjetljiva pri različitim iradijacijama i stepenu prekrivenosti sjenkom FN modula. Uvažavajući da je vrijednost za SIF faktor u iznosu od 2 preporučena od Kalifornijskog energetskog komiteta [63] u ovoj disertaciji je usvojena takva pretpostavka.

Imajući u vidu da su kod RPFN elektrane azimutni ugao Sunca i FN modula jednaki, $\cos\theta$ iznosi:

$$\cos\theta = \cos\beta \cdot \sin\Sigma + \sin\beta \cdot \cos\Sigma = \sin(\beta + \Sigma), \quad (4.3)$$

gdje je Σ nagibni ugao FN modula, a β je ugao visine Sunca.

U formuli (4.2) faktor gubitaka usljed samozasjenčenja predstavlja odnos zasjenčene površine FN reda i ukupne površine FN reda. U cilju izračunavanja toga odnosa korišćena je formula (4.4) [66], koja je modifikovana prema pretpostavci da je azimutni ugao Sunca jednak azimutnom uglu FN redova:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\cos L \cdot \cos\delta \cdot \cos(180 - 15 \cdot t) + \sin L \cdot \sin\delta}{\cos(L - \Sigma) \cdot \cos\delta \cdot \cos(180 - 15 \cdot t) + \sin(L - \Sigma) \cdot \sin\delta} \cdot \frac{D}{A_{pv}}, \quad (4.4)$$

gdje je L geografska širina lokacije na kojoj se nalazi RPFN elektrana, δ je ugao solarne deklinacije, t -sat u toku dana.

Karakteristika predložene konfiguracije RPFN elektrane sa reflektorima sa slike 4.1 je da širina i nagibni ugao reflektora zavise od nagibnog ugla FN redova i rastojanja između FN redova. Sljedećim jednačinama su definisane širina reflektora i nagibni ugao reflektora kao zavisne promjenljive od nagibnog ugla FN redova, rastojanja između FN redova i širine staze za održavanje FN redova i širine FN redova:

$$\Sigma_r = \text{atan} \left(\frac{A_{pv} \cdot \sin(\Sigma)}{D - A_{pv} \cdot \cos(\Sigma)} \right), \quad (4.5)$$

$$A_r = \frac{D - A_{pv} \cdot \cos(\Sigma) - D_m}{\cos(\Sigma_r)}. \quad (4.6)$$

U radu [67] je dat pregled više modela difuzione iradijacije koja pada sa neba. U ovome radu usvojen je najčešće korišćen model u literaturi, a koji podrazumijeva da difuziono zračenje dolazi podjednako sa svih strana neba. Imajući u vidu da se ovdje razmatraju velike RPFN elektrane, a

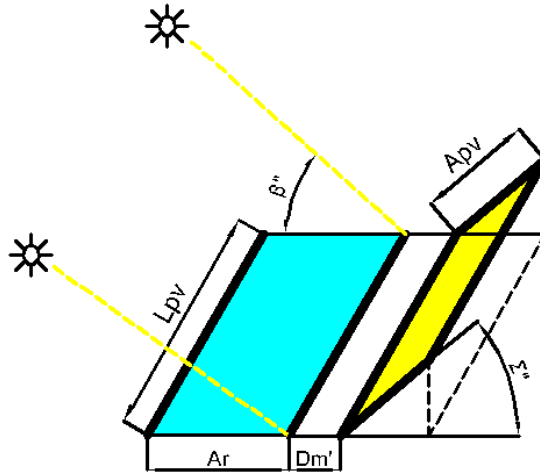
koje karakteriše značajno veća dužina nego širina FN redova ($L_{pv} \gg A_{pv}$), za proračun difuzione iradijacije korišćena je metodologija iz [13]. Difuziona iradijacija koja pada sa neba na FN red je definisana sljedećom jednačinom:

$$I_{dif}^{pv} = F_{sky-pv} \cdot I_{dh} \quad (4.7)$$

Uvrštavajući vrijednost za faktor viđenja F_{sky-pv} [11] u (4.7) dobija se:

$$I_{dif}^{pv} = \frac{A_{pv} + D - \sqrt{(A_{pv} \cdot \sin(\Sigma))^2 + (D - A_{pv} \cdot \cos(\Sigma))^2}}{2 \cdot A_{pv}} \cdot I_{dh} \quad (4.8)$$

U literaturi su predstavljeni eksperimentalni i analitički modeli za različite međusobne položaje reflektora i FN panela. Analitički modeli za proračun iradijacije FN panela u prisustvu reflektora koji su dostupni u literaturi su u velikoj mjeri oslonjeni na rezultate prikazane u [59] i [60]. Metodologija prikazana u pomenutim radovima, u cilju proračuna reflektovane iradijacije od reflektora ka FN panelu, zasniva se na projekciji sunčevih zraka na vertikalnu ravan. Dospjeli fluks sunčevih zraka na vertikalnu ravan se dalje projektuje na FN red. U [10] predložen je model za iradijaciju kojim se prevazilazi limitiranost predloženih modela u pogledu dimenzija razmatranog FN sistema. Imajući u vidu predloženu konfiguraciju reflektora i FN redova, a uvažavajući specifičnosti predložene konfiguracije, u ovoj analizi je za proračun reflektovane iradijacije od reflektora ka FN redu predstavljen jednostavan analitički model. Naime, ukoliko se rotira sistem koji se sastoji od FN reda i reflektora za ugao od Σ_r , postavljen u odnosu na FN redove kao na slici 4.1, u suprotnom smjeru kazaljke na satu dobija se geometrija prikazana na slici 4.2.



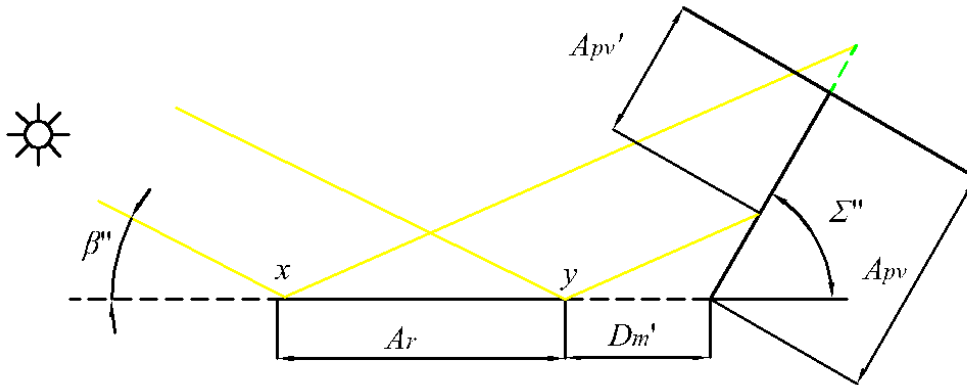
Slika 4.2. Zarotirani jedan FN red i reflektor za ugao od Σ_r u suprotnom smjeru kazaljke na satu

Na slici 4.2, važi da je $D_m' = \frac{D_m}{\cos(\Sigma_r)}$, $\Sigma'' = \Sigma_r + \Sigma$, a ekvivalentni ugao visine Sunca (β'') je $\beta'' = \beta_s - \Sigma_r$.

Direktna komponenta reflektovane iradijacije koja se odbija od reflektora ka FN panelu je definisana sljedećim izrazom:

$$I_{dir}^r = \rho_{dir} \cdot I_b \cdot \cos(\theta') \cdot \frac{A_{pv}'}{A_{pv}} \quad (4.9)$$

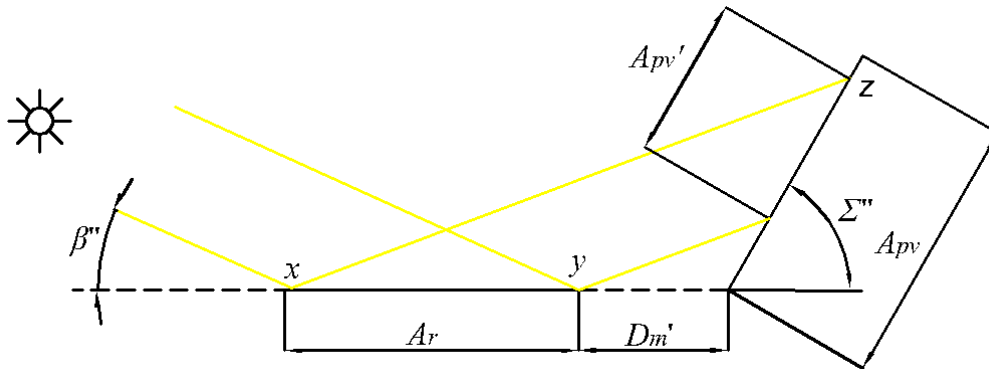
gdje A_{pv}' predstavlja širinu FN panela na koju dopijeva reflektovano zračenje. Imajući u vidu da se razmatra RPFN elektrana koja je opremljena mehanizmom za praćenje azimutnog ugla Sunca jasno je da je dužina FN panela na kojoj dopijeva reflektovano zračenje je jednaka ukupnoj dužini FN panela. U zavisnosti od vrijednosti uglova β'' i Σ'' , određuje se širina A_{pv}' . Na slikama 4.3 i 4.4. prikazana su dva granična slučaja. Donja granica A_{pv}' je određena tačkom y i uglom visine sunčevih zraka, dok je gornja granica A_{pv}' određena tačkom x i uglom visine sunčevih zraka. U prvom slučaju, sunčevi zraci koji dopijevaju u tačku x se odbijaju i ne padaju na FN red, slika 4.3.



Slika 4.3. Sunčevi zraci koji se odbijaju od tačke x ne padaju na FN red

Za slučaj prikazan na slici 4.3, A_{pv}' je:

$$A_{pv}' = A_{pv} - D_m' \cdot \frac{\sin(\beta'')}{\sin(\Sigma'' - \beta'')} \quad (4.10)$$



Slika 4.4. Sunčevi zraci koji se odbijaju od tačke x padaju na FN red

Slika 4.4, predstavlja drugi slučaj, kada sunčevi zraci koji se odbijaju od tačke x padaju na FN red, u tački z . U tom slučaju, A_{pv}' je:

$$A_{pv}' = \left(\frac{\sin(\beta'')}{\sin(\Sigma'' - \beta'')} \right) \cdot (A_r + D_m') - \left(\frac{\sin(\beta'')}{\sin(\Sigma'' - \beta'')} \right) \cdot D_m' = A_r \cdot \frac{\sin(\beta'')}{\sin(\Sigma'' - \beta'')} \quad (4.11)$$

Ukoliko je ispunjen uslov da je $\frac{\sin(\beta'')}{\sin(\Sigma''-\beta'')} \cdot (A_r + D_m') > A_{pv}$, A_{pv}' se računa prema formuli

(4.10), u suprotnom prema formuli (4.11). Pošto je izračunato A_{pv}' , sada je moguće izračunati direktnu komponentu reflektovane iradijacije prema formuli (4.9).

Dalje, koristeći metodologiju proračuna faktora viđenja [13], reflektovano zračenje od reflektora ka FN panelu je određeno sljedećim izrazom:

$$I^r = (I_{dir}^r + I_{dif}^r) \cdot \rho_{dif} \cdot F_{r-pv} = (I_b \cdot \cos(\theta_r) + I_{dh} \cdot F_{sky-r}) \cdot \rho_{dif} \cdot F_{r-pv} \quad (4.12)$$

gdje je F_{sky-r} faktor viđenja između neba i reflektora, F_{r-pv} faktor viđenja između reflektora i FN panela i $\cos(\theta_r) = \sin(\beta + \Sigma_r)$. U prethodnoj formuli, F_{sky-r} i F_{r-pv} su računati prema sljedećim izrazima:

$$F_{sky-r} = \frac{A_r + D - \sqrt{A_{pv}^2 + D_m'^2 - 2 \cdot A_{pv} \cdot D_m' \cdot \cos(180 - \Sigma - \Sigma_r)}}{2 \cdot A_r}, \quad (4.13)$$

$$F_{r-pv} = \frac{\sqrt{A_{pv}^2 + D_m'^2 - 2 \cdot A_{pv} \cdot D_m' \cdot \cos(180 - \Sigma - \Sigma_r)} + A_r - D}{2 \cdot A_{pv}}. \quad (4.14)$$

Formulama (4.1)-(4.14) definisan je model iradijacije predložene RPFN elektrane, pa je sada moguće proračunati očekivanu godišnju proizvodnju i ukupnu proizvodnju u toku životnog vijeka predložene RPFN elektranu prema sljedećim formulama:

$$W_a^p = \sum_{t=1}^{8760} \frac{P}{n_{pv}} \cdot \frac{(I^r(t) \cdot (n_{pv} - 1) + (I_{dir}^{pv}(t) + I_{dif}^{pv}(t)) \cdot n_{pv})}{I_{STC}} \cdot \Delta t \cdot \eta_{inv} \cdot \eta_{temp}, \quad (4.15)$$

$$W_{lt}^p = \sum_{n_{lt}=1}^{20} \sum_{t=1}^{8760} \frac{P}{n_{pv}} \cdot \frac{(I^r \cdot (n_{pv} - 1) + ((I_{dir}^{pv}(t) + I_{dif}^{pv}(t)) \cdot n_{pv}))}{I_{STC}} \cdot \Delta t \cdot \eta_{inv} \cdot \eta_{temp} \cdot (1 - d \cdot (n_{lt} - 1)), \quad (4.16)$$

gdje P predstavlja DC snagu RPFN elektrane pri standardnim test uslovima (STC), η_{inv} je efikasnost invertora koja je usvojena da iznosi 0.95), η_{temp} je pad efikasnosti FN konverzije usljed uticaja temperature računat prema formuli (3.6), d je godišnji pad efikasnosti FN modula.

S obzirom na to da će se u daljim analizama upoređivati tehno-ekonomske karakteristike RPFN elektrane bez reflektora i predložene RPFN elektrane sa reflektorima, satna, godišnja i ukupna proizvodnja u toku životnog vijeka RPFN elektrane bez reflektora se računaju prema formulama (4.17) - (4.18)

$$W_a^0 = \sum_{t=1}^{8760} \frac{P}{n_{pv}} \cdot \frac{(I_{dir}^{pv}(t) + I_{dif}^{pv}(t))}{I_{STC}} \cdot n_{pv} \cdot \Delta t \cdot \eta_{inv} \cdot \eta_{temp}, \quad (4.17)$$

$$W_{lt}^0 = \sum_{n_{lt}=1}^{20} \sum_{t=1}^{8760} \frac{P}{n_{pv}} \cdot \frac{(I_{dir}^{pv} + I_{dif}^{pv})}{I_{STC}} \cdot n_{pv} \cdot \Delta t \cdot \eta_{inv} \cdot \eta_{temp} \cdot (1 - d \cdot (n_{lt} - 1)). \quad (4.18)$$

4.4. Tehno-ekonomske karakteristike predložene RPFN sa reflektorima

U literaturi koja se odnosi na projektovanje i optimizaciju FN elektrana mogu se naći složeni optimizacioni modeli koji uzimaju veći broj promjenljivih u obzir. Ipak, za praktične svrhe, važno je primijetiti da se neke promjenljive mogu definisati kao konstante. Primjer je dužina FN redova. Velike FN elektrane se projektuju tako je dužina FN elektrane određena raspoloživim prostorom pa je u ovdje usvojeno da je dužina FN redova konstanta. Shodno navedenom, kao nezavisne upravljačke promjenljive koje dominantno utiču na konfiguraciju FN elektrane prilikom planiranja i projektovanja, su usvojene nagibni ugao FN redova, rastojanje između FN redova. Numerički eksperimenti u ovom poglavlju su dobijeni prema realnim višegodišnjim satnim meteo podacima. Iako predstavljeni model za proračun proizvodnje, kao i dobijeni rezultati se zasnivaju na satnim meteo podacima, zbog sažetijeg prikaza u tabeli 4.1 date su mjesečne vrijednosti korišćenih meteo podataka.

Tabela 4.1. Prosječne mjesečne vrijednosti za horizontalnu insolaciju i temperaturu

Mjesec	Horizontalna insolacija [kWh/m ² /dan]	Temperatura ambijenta [°C]
Januar	1.26	1.70
Februar	1.78	1.79
Mart	3.13	5.64
April	5.37	10.65
Maj	6.03	17.06
Jun	6.82	19.93
Jul	7.36	23.42
Avgust	5.57	22.41
Septembar	3.91	18.63
Oktobar	2.16	10.72
Novembar	1.90	8.52
Decembar	1.55	4.82

S obzirom na to da su definisane dvije upravljačke promjenljive, D i Σ , uticaj navedenih promjenljivih na tehno-ekonomske parametre predložene RPFN elektrane je detaljno analiziran u numeričkim eksperimentima. Vrijednost za D je varirana u opsegu od 8m do 12m sa korakom od 1m, dok je vrijednost za Σ mijenjana u opsegu od 0° do 90° sa korakom od 5°. Usvojena vrijednost za širinu FN redova je 4 m. U tabeli 4.2 prikazane su usvojene vrijednosti za ostale tehno-ekonomske parametre.

Tabela 4.2. Usvojene vrijednosti za tehno-ekonomske parametre za RPFN elektranu sa reflektorima

Parametar	Vrijednost	Parametar	Vrijednost	Parametar	Vrijednost
A_{pv} [m]	4	r [%/°C]	0.5	C_r [€/m ²]	10
L [°]	44.5	η_{inv} [%]	0.95	C_I [€/kW _p]	1000
L_{pv} [m]	200	i [%]	5	n_{pv}	20
D_m [m]	0.8	n_{lt} [god]	20	d [%]	1
P [MW _p]	2.40	C_m [€/kW _p]	10	$NOCT$ [°C]	45

Oznake u tabeli 4.2 imaju sljedeće značenje: i je interesna stopa, C_m su troškovi održavanja, C_r su troškovi investicije u reflektor, C_I je trošak investicije u FN module, FN platformu i mehanizam za obrtanje platforme, $NOCT$ je nominalna radna temperatura FN modula.

Uvažavajući da su do sada izgrađene RPFN elektrane bez reflektora, u radu je izvršena komparativna analiza tehno-ekonomskih karakteristika predložene RPFN elektrane sa reflektorom i RPFN elektrane bez reflektora. Sa druge strane, prema jednačinama (4.9) i (4.12) jasno se može uočiti da proizvodnja, a time i tehno-ekonomske karakteristike predložene RPFN elektrane sa reflektorima, zavise od koeficijenta direktne (ρ_{dir}) i difuzione (ρ_{dif}) refleksije reflektora. Stakleni reflektori imaju svojstvo da se sunčeva svjetlost odbija direktno a da koeficijent refleksije može dostići vrijednost čak i do 0.95 [1]. Reflektori od aluminijumskih folija mogu biti od upotrebnog značaja kod RPFN elektrana jer njihov koeficijent refleksije dostiže relativno velike vrijednosti [9]. Prema [9], aluminijumske folije dostižu vrijednost za koeficijent direktne refleksije od 0.85. Pored toga, u [9] kao difuzioni reflektor korišćene su ravne ploče koje su premazane sa bijelom bojom gdje je usvojeno da je koeficijent refleksije isključivo difuzionog karaktera i da iznosi 0.75. U radu [10] usvojeno je da se reflektor može napraviti od takvih reflektujućih materijala da koeficijent refleksije iznosi 0.85. Imajući u vidu da su predmet razmatranja velike RPFN elektrane, imperativ je da su finansijska ulaganja u reflektor relativno mala. Shodno tome, kao pogodan reflektor se nametnuo reflektor napravljen od aluminijumskih folija. U cilju boljeg sagledavanja uticaja ovakvog reflektora na tehno-ekonomske indikatore analizirane RPFN elektrane analizirana su dva slučaja. U prvom slučaju reflektor je napravljen od ploča koje su prekrivene idelano zategnutom aluminijumskom folijom i za koju se može smatrati da je koeficijent direktne refleksije iznosi 0.85. U ovom slučaju se može smatrati da se svjetlost odbija isključivo direktno a da difuziona refleksija ne postoji. U drugom slučaju podrazumijeva se da podloga nije idealna već da ima određene hrapavosti. Imajući u vidu da ako aluminijumska folija ne leži na idealno glatkoj površini, doći će do difuzionog reflektovanja svjetlosti koja dospije na tu foliju. U ovom slučaju usvojena vrijednost za koeficijent direktne refleksije je 0.62, a difuzione refleksije je 0.21. Važno je istaći da se oba slučaja mogu smatrati realnim, tako da ova dva analizirana slučaja mogu dati odgovor koji od ova dva analizirana reflektora ima veći uticaj na tehno-ekonomske parametre. Takođe, analiza ova dva tipa reflektora jasno može ukazati da li reflektori od bilo kojeg materijala sa poznatim reflektujućim svojstvima mogu biti od koristi kod RPFN elektrana. U tabeli 4.3 prikazani su razmatrani scenariji za reflektor primjenjen na različitim varijantama RPFN elektrane.

Tabela 4.3. Razmatrani scenariji za RPFN elektranu

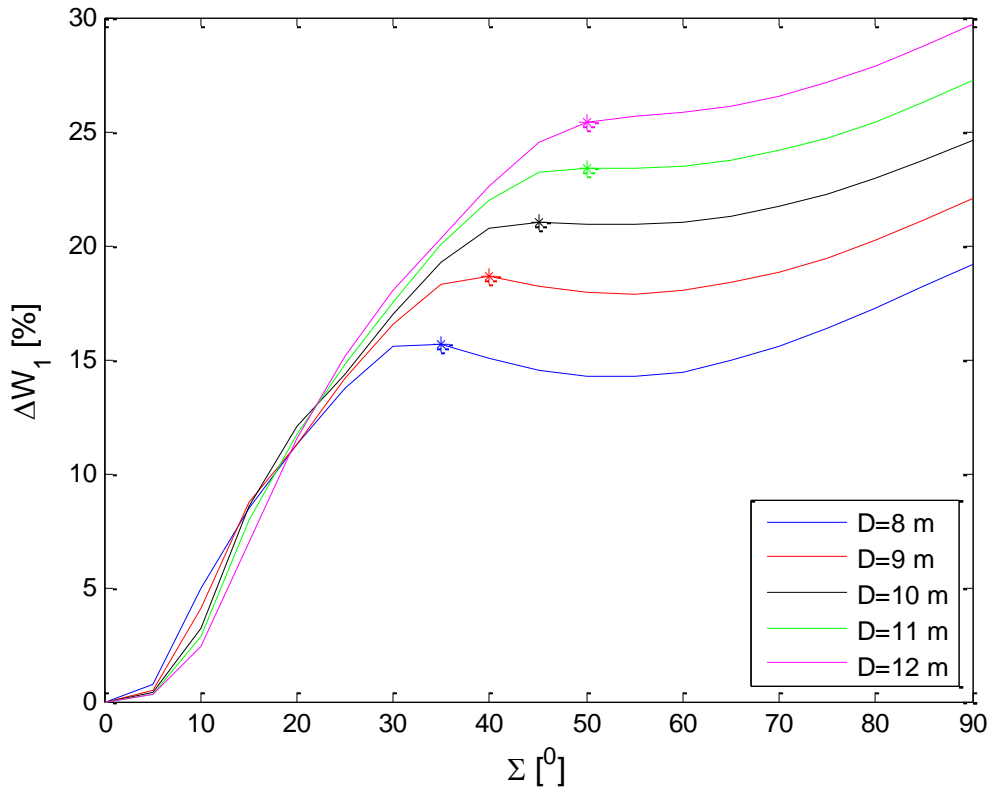
	ρ_{dir}	ρ_{dif}
RPFN 0 (RPFN elektrana bez reflektora)	-	-
RPFN 1 (RPFN elektrana sa reflektorima)	0.85	0.00
RPFN 2 (RPFN elektrana sa reflektorima)	0.61	0.21

Na slikama 4.5 i 4.6 prikazano je procentualno povećanje proizvodnje elektrana RPFN 1 i RPFN 2 u odnosu na RPFN 0. Procentualno povećanje je računato prema sljedećem izrazu:

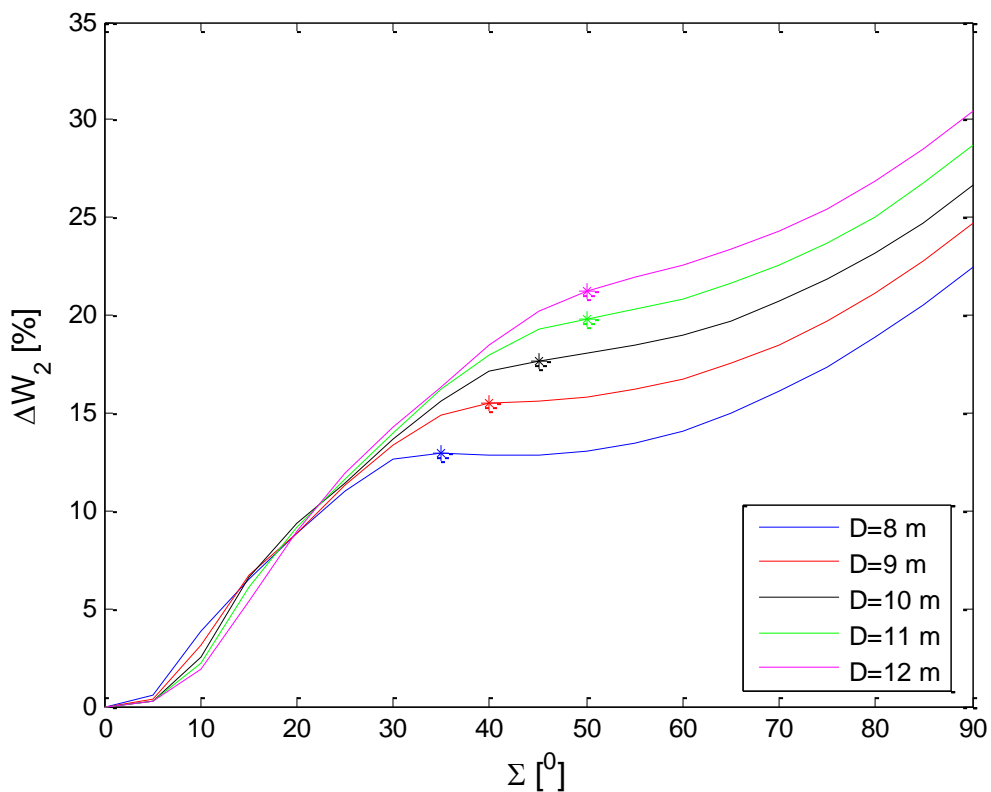
$$\Delta W_i (\%) = \frac{W_a^{pi} - W_a^{p0}}{W_a^{p0}} \cdot 100, \quad (4.19)$$

gdje je W_a^{pi} godišnja proizvodnja RPFN elektrane u i -tom scenariju.

Takođe, na istim slikama su označene zvjezdicama tačke maksimalne proizvodnje RPFN elektrane sa reflektorima, koje zapravo definišu optimalni nagibni ugao za zadato rastojanje između redova.



Slika 4.5. Procentualno poređenje proizvodnje varijante RPFN 1 u odnosu na varijantu RPFN 0 elektrane za različite nagibne uglove FN redova i rastojanja između FN redova

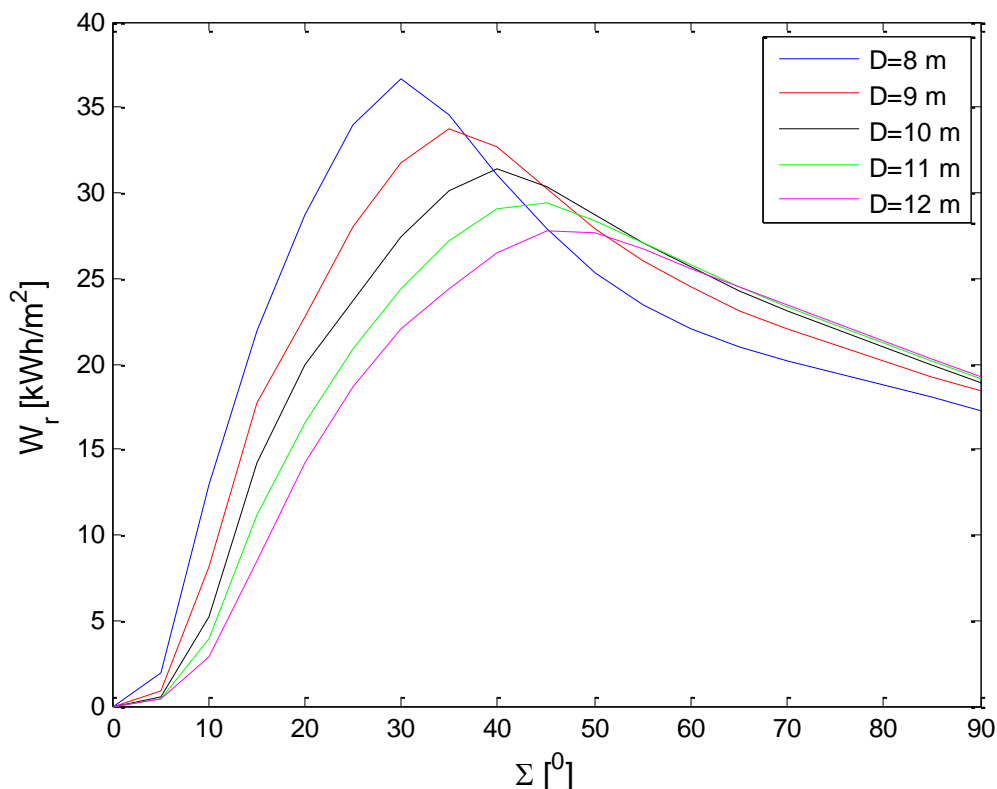


Slika 4.6. Procentualno poređenje proizvodnje varijante RPFN 2 u odnosu na varijantu RPFN 0 elektrane za različite nagibne uglove FN redova i rastojanja između FN redova

Na osnovu dobijenih rezultata prikazanih na slikama 4.5 i 4.6, jasno je da reflektor značajno doprinosi povećanju proizvodnje RPFN elektrane. Sa aspekta rastojanja između FN redova, veći doprinos postavljanjem reflektora se dobija što je veće rastojanje. Važno je naglasiti da pri većem rastojanju između FN redova, prema formuli (4.6) veća je i širina reflektora, što implicira i veći doprinos proizvodnji RPFN elektrane. Takođe se uočava da reflektor najviše doprinosi proizvodnji RPFN elektrane ukoliko je nagibni ugao FN redova 90° . Međutim, jasno se može zaključiti da je doprinos reflektora značajan i za manje vrijednosti nagibnih uglova FN redova. Optimalni nagibni ugao FN elektrana, u zavisnosti od geografske lokacije i kriterijuma optimizacije, uglavnom nije veći od 60° . Sa slika 4.5 i 4.6 može se zaključiti da pri nagibnim uglovima FN redova pri kojima se dobija maksimalna proizvodnja, doprinos reflektora proizvodnji RPFN elektrane je između 13% - 25%.

Slike 4.5 i 4.6 upućuju na još jedan značajan zaključak, a to je da reflektor postavljen na predloženi način ima veći doprinos proizvodnji RPFN elektrane ukoliko ima veći koeficijent direktne refleksije. Shodno tome, postavljanje reflektora sa većim koeficijentom refleksije na geografskim lokacijama gdje je veći odnos direktne i difuzione iradijacije će doprinijeti većoj proizvodnji predložene RPFN elektrane. Uvažavajući dosadašnja zapažanja, a sa ciljem sažetijeg prikaza rezultata, dalje će se u radu detaljnije analizirati samo RPFN elektrana sa većim koeficijentom direktne refleksije reflektora, tj. varijanta RPFN 1.

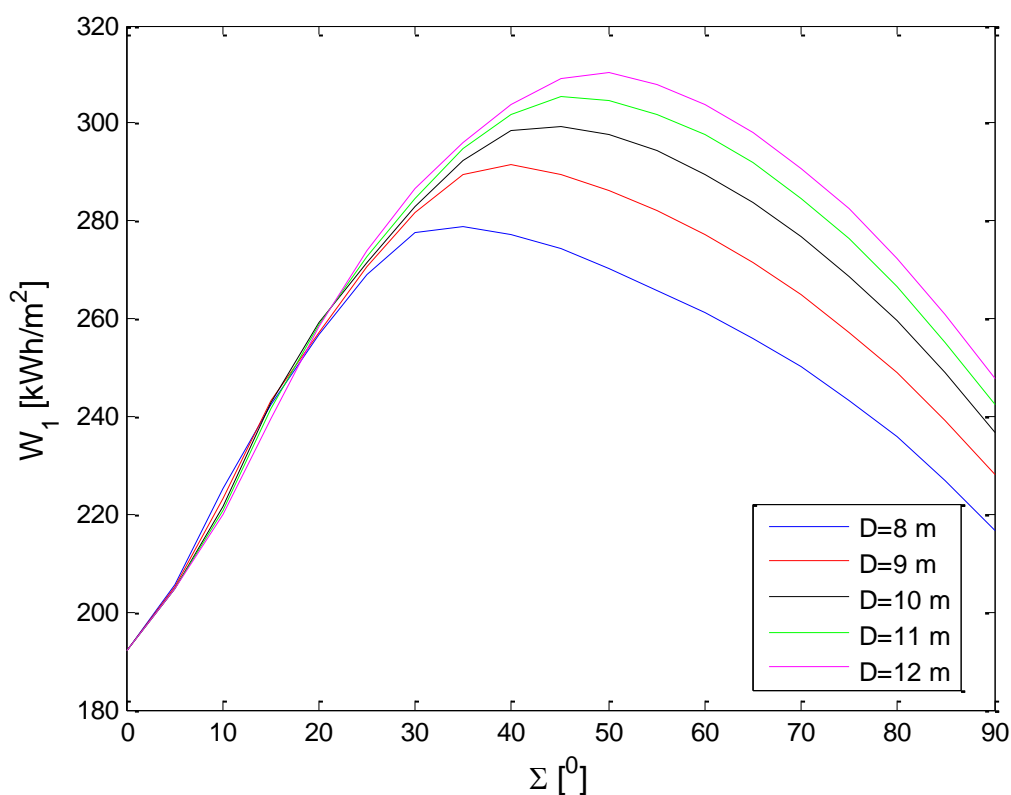
S obzirom na to da predloženo rješenje karakteriše da širina i nagibni ugao reflektora zavise od vrijednosti upravljačkih promjenljivih, na slici 4.7 prikazan je godišnji doprinos reflektora u ukupnoj proizvodnji po jedinici površine reflektora.



Slika 4.7. Doprinos reflektora u proizvodnji RPFN 1 elektrane po m^2 površine reflektora u zavisnosti od nagibnog ugla FN modula i rastojanja između FN redova

Na osnovu slike 4.7 može se zaključiti da se veći specifični doprinos reflektora dobija što je manje rastojanje između FN redova. Nagibni ugao FN redova pri kojem se dobija maksimum iskorišćenja površine reflektora se povećava sa porastom rastojanja između FN redova. Na kraju, upoređujući slike 4.5 i 4.7, može se zaključiti da nagibni ugao FN redova pri kojem se postiže najveći stepen iskorišćenja površine reflektora je približno jednak nagibnim uglovima pri kojem se dobija maksimalna proizvodnja RPFN elektrane. Može se zaključiti da je optimalni nagibni ugao istovremeno i optimum sa stanovišta ukupne proizvodnje i sa stanovišta efikasnosti iskorišćenja površine reflektora. Na kraju, sa aspekta godišnjih karakteristika, na slici 4.8 prikazana je godišnja proizvodnja RPFN 1 elektrane po m^2 površine FN panela u zavisnosti od dvije razmatrane upravljačke promjenljive.

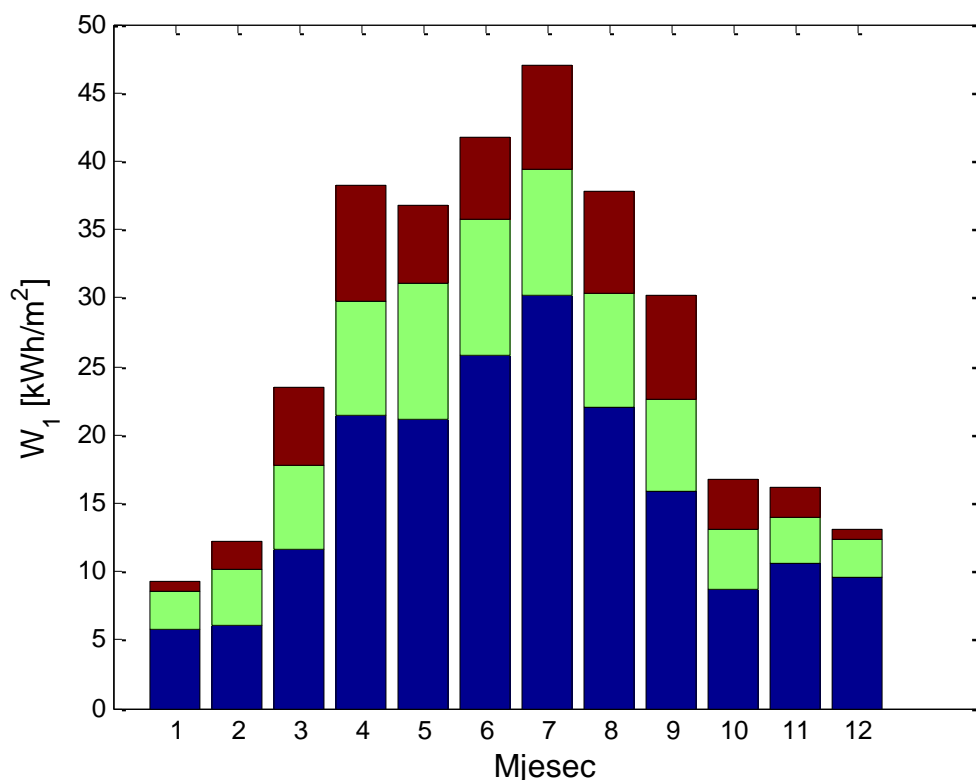
Karakteristika predložene RPFN 1 elektrane, na osnovu slike 4.8, je da se povećanjem rastojanja između FN redova, za fiksnu vrijednost nagibnog ugla FN reda povećava godišnja proizvodnja po m^2 površine FN modula.



Slika 4.8. Godišnji dijagram proizvodnje RPFN 1 elektrane po m^2 površine FN modula u zavisnosti od nagibnog ugla FN redova i rastojanja između FN redova

Radi daljeg sagledavanja mjesečnih i dnevnih karakteristika predložene elektrane, na slikama 4.9 i 4.10 su prikazani prosječni godišnji mjesečni i dnevni dijagrami proizvodnje RPFN 1 elektrane.

Na slici 4.9 je prikazana mjesečna proizvodnja RPFN 1 elektrane po m^2 površine FN panela za sljedeće vrijednosti upravljačkih promjenljivih: $D=10\text{ m}$ i $\Sigma=30^\circ$. Za navedene vrijednosti upravljačkih promjenljivih, na osnovu formula (4.5) i (4.6) su izračunati širina i nagibni ugao reflektora: 5.99 m i 17.01° . Sa slike 4.9 se može uočiti da je u aprilu i septembru doprinos proizvodnji usljed reflektora veći od doprinosa difuzione iradijacije koja pada sa neba na FN redove. U tabeli 4.4 je dato procentualno učešće FN redova i reflektora kao i pojedinih komponenti sunčevog zračenja po mjesecima za razmatrani scenario.



Slika 4.9. Mjesečna proizvodnja RPFN 1 po m² površine FN panela (plava boja – direktna komponenta solarnog zračenja koja pada na FN panel; zelena boja – difuziona komponenta solarnog zračenja koja pada na FN panel, crvena boja – reflektovana komponenta solarnog zračenja koja pada na FN panel)

Tabela 4.4. Procentualno učešće direktne, difuzione i reflektovane komponente sunčevog zračenja koja pada na površinu FN panela za RPFN 1 elektranu po mjesecima

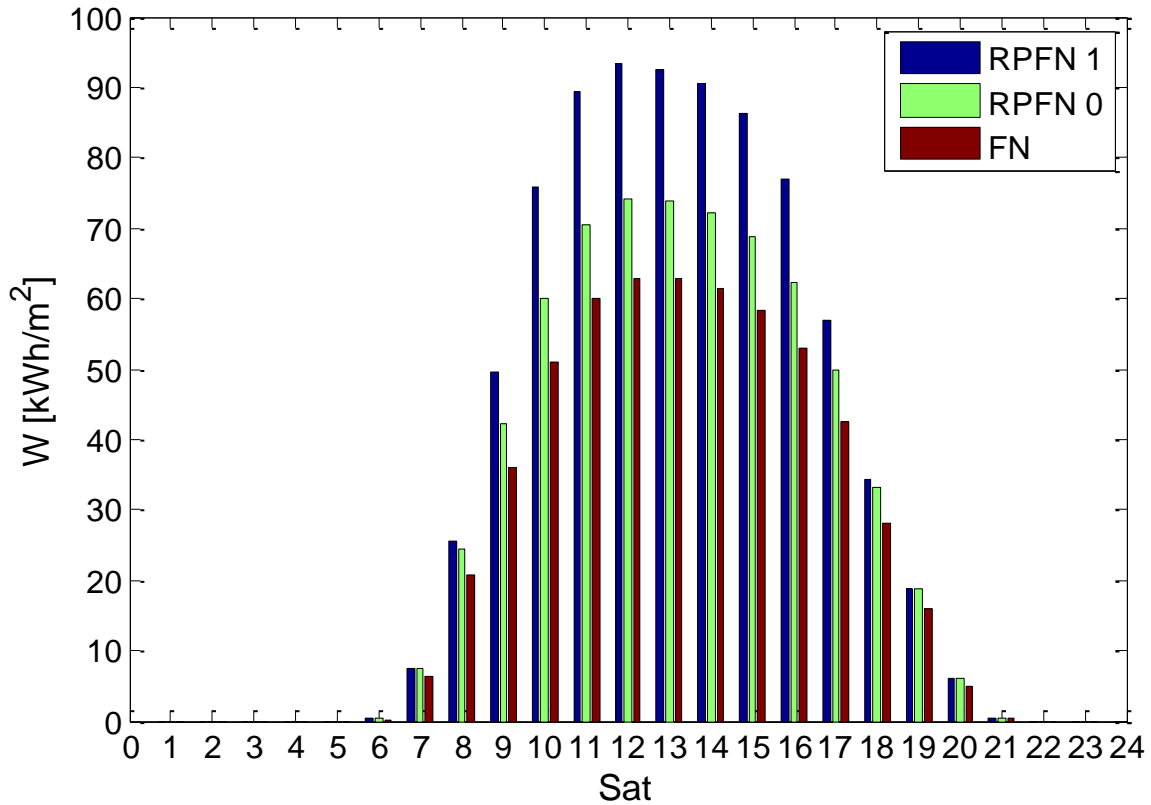
Mjesec	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Direktna [%]	61.89	50.20	49.59	56.18	57.50	61.93	64.10	58.32	52.62	52.42	66.12	73.70
Difuziona [%]	31.27	33.80	26.11	21.82	26.71	23.74	19.65	22.11	22.38	26.14	20.69	21.02
Reflektovana [%]	6.84	15.99	24.30	21.99	15.79	14.33	16.24	19.56	24.98	21.44	13.17	5.26

Tabela 4.4 vodi ka zaključku da je najveći doprinos reflektora u proizvodnji razmatrane RPFN 1 elektrane u toku prolječnih i jesenjih, a najmanji tokom zimskih mjeseci.

U ovom poglavlju dato je poređenje tipičnog dnevnog dijagrama za RPFN 1 i RPFN 0 elektranu. Na slici 4.10 prikazan je prosječni dnevni dijagram proizvodnje RPFN 1 za sljedeće vrijednosti upravljačkih promjenljivih: $D=10$ m, $\Sigma=45^\circ$. Za navedene vrijednosti D i Σ , na istoj slici prikazan je prosječni dnevni dijagram proizvodnje RPFN 0 elektrane kao i fiksne FN elektrane bez reflektora. U ovom slučaju prikazana je tipična proizvodnja za nagibni ugao od 45° iz razloga što se za taj ugao dobija najveća proizvodnja RPFN 1 pri rastojanju između FN redova od 10 m.

U razmatranom slučaju, prosječna dnevna proizvodnja predložene RPFN 1 elektrane na godišnjem nivou iznosi 760.36 Wh/m^2 , RPFN 0 elektrane je 650.53 Wh/m^2 , a fiksne FN elektrane bez reflektora je 566.04 Wh/m^2 . Dakle, za 16.88% veća je proizvodnja RPFN 1 elektrane u odnosu na RPFN 0 elektranu, odnosno za 34.33% veća je proizvodnja RPFN 1 elektrane u odnosu na fiksnu FN elektranu.

Na kraju u ovom dijelu disertacije, izvršena je ekonomska analiza predloženog rješenja RPFN 1 elektrane kroz poređenje sa RPFN elektranom bez reflektora. Uvažavajući tipične vrijednosti za ekonomsku analizu PFN elektrana kao i procijenjene vrijednosti cijene reflektora,



Slika 4.10. Prosječni dnevni dijagram proizvodnje po m^2 površine FN panela za RPFN 1 i RPFN 0 za sljedeće vrijednosti upravljačkih promjenljivih: $D=10$ m, $\Sigma=45^\circ$

tabela 4.2, za tržište blisko lokaciji sa koje su korišćeni meteo podaci proračunata je svedena cijena troškova proizvodnje elektrane (LCOE) kao tipičan ekonomski indikator. U tabelama 4.5 i 4.6 su prikazani rezultati za $\Delta LCOE$, i LCOE za predloženu RPFN elektranu sa i bez reflektora koji su računati prema formulama (4.20)-(4.22)

$$LCOE^p = \frac{C_l \cdot P \cdot n_{pv} + C_r \cdot A_r \cdot (n_{pv} - 1) + \sum_{n_{t-i}=1}^{n_t} \frac{C_m}{(1+i)^{n_{t-i}}}}{W_{lt}^p \cdot \sum_{n_{t-i}=1}^{n_t} \frac{1}{(1+i)^{n_{t-i}}}}, \quad (4.20)$$

$$LCOE^0 = \frac{C_l \cdot P \cdot n_{pv} + \sum_{n_{t-i}=1}^{n_t} \frac{C_m}{1.5 \cdot (1+i)^{n_{t-i}}}}{W_{lt} \cdot \sum_{n_{t-i}=1}^{n_t} \frac{1}{(1+i)^{n_{t-i}}}}, \quad (4.21)$$

$$\Delta LCOE(\%) = \frac{LCOE^p - LCOE^0}{LCOE^0} \cdot 100. \quad (4.22)$$

Na osnovu formula (4.20) i (4.21) može se uočiti da je pretpostavljeno da su troškovi održavanja RPFN elektrane bez reflektora umanjeni za 50% u odnosu na RPFN elektranu sa reflektorima. Za troškove investicije RPFN elektrane je usvojena vrijednost od 1000 €/kWp što je veća vrijednost u odnosu na klasične FN elektrane instalisane na zemlji. Razlog za ovoliko usvojenu vrijednost je što troškovi investicije obuhvataju investiciju za plivajuću platformu i mehanizam za obrtanje FN platforme.

Tabela 4.5 Rezultati za $LCOE^P$, $LCOE^0$ i $\Delta LCOE$ za nekoliko vrijednosti Σ . Za D su usvojene sljedeće vrijednosti: 8 m, 9 m i 10 m

	$D=8m$			$D=9m$			$D=10m$		
	$LCOE^P$ [€/MWh]	$LCOE^0$ [€/MWh]	$\Delta LCOE$ [%]	$LCOE^P$ [€/MWh]	$LCOE^0$ [€/MWh]	$\Delta LCOE$ [%]	$LCOE^P$ [€/MWh]	$LCOE^0$ [€/MWh]	$\Delta LCOE$ [%]
$\Sigma=0^\circ$	82.09	74.74	9.83	83.18	74.74	11.29	84.27	74.74	12.74
$\Sigma=10^\circ$	70.18	66.97	4.79	71.69	66.94	7.09	73.17	66.92	9.35
$\Sigma=20^\circ$	61.86	62.27	-0.65	62.50	62.17	0.53	62.81	62.10	1.14
$\Sigma=30^\circ$	57.55	59.81	-3.77	57.43	59.46	-3.40	57.82	59.34	-2.56
$\Sigma=40^\circ$	58.09	59.60	-2.53	55.92	58.47	-4.36	55.27	58.15	-4.95
$\Sigma=50^\circ$	60.11	60.71	-0.99	57.43	59.22	-3.03	55.82	58.34	-4.32
$\Sigma=60^\circ$	62.75	62.95	-0.32	59.83	61.19	-2.23	57.91	60.05	-3.56
$\Sigma=70^\circ$	66.13	66.40	-0.40	63.15	64.47	-2.04	61.10	63.16	-3.27
$\Sigma=80^\circ$	70.73	71.45	-1.01	67.78	69.41	-2.35	65.70	68.04	-3.44
$\Sigma=90^\circ$	77.55	78.95	-1.76	74.47	76.78	-3.01	72.68	75.68	-3.96

Tabela 4.6. Rezultati za $LCOE^P$, $LCOE^0$ i $\Delta LCOE$ za nekoliko vrijednosti Σ . Za D su usvojene sljedeće vrijednosti: 11 m i 12 m

	$D=11m$			$D=12m$		
	$LCOE^P$ [€/MWh]	$LCOE^0$ [€/MWh]	$\Delta LCOE$ [%]	$LCOE^P$ [€/MWh]	$LCOE^0$ [€/MWh]	$\Delta LCOE$ [%]
$\Sigma=0^\circ$	85.36	74.74	14.20	86.45	74.74	15.66
$\Sigma=10^\circ$	74.36	66.90	11.14	75.65	66.89	13.09
$\Sigma=20^\circ$	63.73	62.05	2.69	64.60	62.02	4.16
$\Sigma=30^\circ$	58.19	59.26	-1.80	58.56	59.19	-1.06
$\Sigma=40^\circ$	55.26	58.03	-4.77	55.55	57.94	-4.12
$\Sigma=50^\circ$	55.21	58.16	-5.08	54.84	58.04	-5.51
$\Sigma=60^\circ$	57.01	59.63	-4.41	56.47	59.50	-5.08
$\Sigma=70^\circ$	60.06	62.64	-4.11	59.47	62.48	-4.82
$\Sigma=80^\circ$	64.73	67.61	-4.26	64.06	67.43	-4.99
$\Sigma=90^\circ$	71.76	75.43	-4.86	71.01	75.22	-5.59

Na osnovu prikazanih rezultata u tabelama 4.5 i 4.6 može se zaključiti da predloženo rješenje ima ekonomsku opravdanost za određene vrijednosti nagibnog ugla FN redova i rastojanja između FN redova. Za tipičnu vrijednost nagibnog ugla FN redova od 40° i za rastojanje između FN redova u iznosu od 10 m procentualno smanjenje LCOE za RPFN 1 elektranu u poređenju sa RPFN 0 elektranom je od 4.95%.

5. NOVI MATEMATIČKI MODEL ZA PRORAČUN IRADIJACIJE KOD VELIKIH FN ELEKTRANA SA I BEZ REFLEKTORA

5.1. Uvod

U prethodna dva poglavlja disertacije predstavljena su idejna rješenja za povećanje tehnokonomске analize FN elektrana na vodenim površinama. Naime, u trećem poglavlju je pokazano da se konceptom RPFN elektrane može postići značajno povećanje efikasnosti u odnosu na FN elektranu sa fiksnom platformom. Dalje povećanje efikasnosti koncepta RPFN elektrana je moguće postići upotrebom jednostavnih reflektora između FN redova, što je predmet četvrtog poglavlja disertacije. U ovom, petom, poglavlju je analizirana mogućnost povećanja efikasnosti FN elektrana instaliranih na zemlji upotrebom bFN umjesto mFN panela.

Upravo rastojanje između FN redova predstavlja jedan od glavnih parametara velikih FN elektrana instaliranih na zemlji. Jedna od glavnih razlika u projektovanju FN elektrana malih i velikih snaga je u rastojanju između FN redova. Male FN elektrane uglavnom se projektuju tako da pokriju cijelu slobodnu površinu namijenjenu za FN elektranu. Upadljiv primjer takve elektrane su FN paneli postavljeni na krovovima stambenih objekata. Sa druge strane, velike FN elektrane, zauzimaju velike površine zemljišta pa je rastojanje između FN redova potrebno pažljivo procijeniti iz više razloga. Generalno, na FN module pada direktna, difuziona i reflektovana komponenta solarnog zračenja. Iako u dobro projektovanim FN elektranama glavni udio imaju direktna i difuziona komponenta solarnog zračenja, značajni udio ima i reflektovana komponenta solarnog zračenja, pa ju je potrebno uvažiti pri analizama proizvodnje. Rastojanje između FN redova ima značajnu ulogu kod doprinosa reflektovane komponente solarnog zračenja jer je doprinos ove komponente solarnog zračenja u korelaciji sa dostupnom površinom između FN redova. Doprinos reflektovane komponente solarnog zračenja zavisi, pored koeficijenta refleksije podloge, i od nagibnog ugla FN panela. Navedeno zapažanje ukazuje da doprinos reflektovane iradijacije od podloge ka zadnjoj strani bFN panela, zavisno od nagibnog ugla panela, može imati značajnu vrijednost. Upravo bFN paneli predstavljaju perspektivnu tehnologiju za dalje unapređenje efikasnosti FN elektrana, iako su i dalje na tržištu dominantni mFN paneli. Shodno tome u [28], [29], [68], [69], [70], [71], [72] i [73], [74] je posvećeno dosta pažnje uticaju reflektovane komponente na proizvodnju elektrane sa bFN panelima. Sa druge strane, rastojanje između FN redova je važno da bude optimalno projektovano posebno u slučaju kada vlasnici FN elektrana plaćaju visoke nadoknade za rentiranje zemljišta koje dolazi do izražaja kod velikih FN elektrana koje karakteriše relativno mala snaga prema površini koju zauzimaju.

Kako bi se izvršila optimizacija nagibnog i azimutnog ugla FN panela, kao i rastojanje između redova, potrebno je raspolagati praktičnim matematičkim modelom za proračun ukupne iradijacije koja pada na aktivne površine FN panela koji uvažava sve uticajne geometrijske elemente, odnosno difuzione i direktne komponente zračenja i karakteristike terena u pogledu refleksije. U radovima [68], [69], [73] analiziran je uticaj nagibnog ugla FN redova, koeficijenta refleksije podloge i azimutnog ugla na proizvodnju bFN elektrane. U radu [73] dobijeni rezultati se odnose na slučaj samo jednog reda FN panela, dok je u radovima [68], [69] pretpostavljeno da postoji više FN redova. U pomenutim radovima rastojanje između FN redova je određeno tako da sjenka od prethodnih FN redova ne pravi gubitke usljed zasjenčenja u podne 21. decembra. 21. decembar je dan kada je najmanja visina Sunca na sjevernoj hemisferi, pa je dužina sjenke usljed samozasjenčenja od FN redova najveća u godini. Uticaj rastojanja između FN redova, azimutnog i nagibnog ugla FN redova na proizvodnju jednog FN panela, je ispitan i u radovima [29], [72] pri čemu je u odnosu na druge radove ispitan uticaj veličine reflektujuće podloge na proizvodnju FN

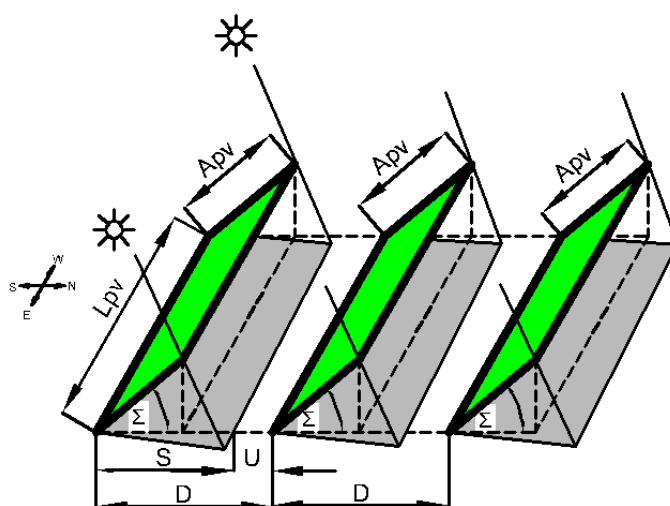
elektrane. U cilju proračuna doprinosa reflektovane iradijacije na proizvodnju korišćen je dvostruki integral, što je računarski zahtjevno, za velike reflektujuće površine, a posebno za proračune godišnje proizvodnje elektrane zasnovane na satnim meteo podacima. U radu [28] korišćeni model iradijacije za poređenje bFN i mFN elektrane, pretpostavlja da na reflektujuću podlogu pada cjelokupno difuziono zračenje od neba. Koristeći istu pretpostavku, u [13] i [75] predstavljen je pogodan model iradijacije za računarske simulacije proizvodnje bFN elektrane sa više FN redova. Nasuprot radovima [73], [28], [13] u radu [76] je uvaženo da na reflektujuću podlogu ne pada cjelokupno sunčevo zračenje, zbog postojanja prepreke u vidu samih FN redova. U istom radu, proračun reflektovane komponente iradijacije se takođe bazira na algoritmu za ubrzano rješavanje dvostrukog integrala. Međutim, u navedenom radu, nije ispitan uticaj rastojanja između FN redova, koeficijenta refleksije podloge između FN redova, nagibnog ugla FN redova na proračun proizvodnje bFN elektrane. Dakle, u više radova model iradijacije je baziran na proračunu za jedan FN red kao i na pretpostavci da na reflektujuću površinu pada cjelokupna difuziona komponenta sunčevog zračenja.

Doprinosa ovog dijela disertacije je u tome što je definisan novi matematički model pogodan za numeričke simulacije zasnovane na meteo podacima, ali koji pritom uvažava da na reflektujuće površine između FN redova ne pada cjelokupno difuziono zračenje. Predloženi model, koji je proširenje modela predloženog u [13], omogućava da se na relativno jednostavan način ispita uticaj važnih geometrijskih parametara bFN elektrane, kao što su nagibni ugao FN panela i rastojanje između FN redova. Dakle, predloženi model omogućava proračun optimalnih vrijednosti za navedene geometrijske parametre FN elektrane radi rješavanja zadatih optimizacionih zadataka. Shodno rečenom, razvijeni model zasnovan sa satnim meteo podacima omogućava da se sagleda i dnevni dijagram proizvodnje, što je značajno u tržišnim uslovima rada FN elektrane. Pored toga, predloženi model uvažava satne dužine sjenke, pa je samim time i precizniji od [13] koji to ne uvažava. Predloženi model iradijacije, u cilju uvažavanja efekta samozasjenčenja na proračun direktne, difuzione i reflektovane komponente je proširen u odnosu na postojeći model iradijacije. Naime, u [13], prilikom proračuna reflektovane iradijacije, faktor viđenja je proračunat i za zasjenčeni i nezasjenčeni dio površine između FN redova, ali pod pretpostavkom da obje površine vide 'cijelo nebo'. U ovoj analizi, predložen je model iradijacije koji uvažava činjenicu da zasjenčeni i nezasjenčeni dio površine između FN redova ne vide 'cijelo nebo', što je bio glavni motiv za proširenje postojećeg modela iradijacije [13] kroz uvođenjem dodatnih faktora viđenja. Sve navedeno vodi ka zaključku da se predloženim modelom iradijacije, koji je zasnovan na realnim fizičkim karakteristikama FN elektrane, omogućava precizniji proračun proizvodnje što čini bazu za proračun tehno-ekonomskih indikatora.

Ograničenje predloženog modela je u tome što je primjenjiv za bFN elektrane velike snage, odnosno bFN elektrane koje karakteriše značajno veća dužina u odnosu na širinu FN redova. Prepoznavajući značaj zaključaka u radovima [29], [68], [69], [72], [73], [74] i [77], u ovome poglavlju disertacije ispitan je uticaj refleksionih karakteristika podloge između FN redova na tehno-ekonomske parametre analizirane bFN elektrane. Rezultati koji se mogu naći u literaturi ukazuju da povećanje refleksije podloge između FN redova može značajno povećati proizvodnju bFN elektrane. Međutim, povećanje refleksije podloge između FN redova, farbanjem bijelom bojom podloge između FN redova ili postavljanjem reflektora od aluminijuma, zahtijeva određena novčana sredstva. U ovome poglavlju disertacije, utvrđeno je da li je i pod kojim uslovima opravdano povećati koeficijent refleksije podloge između FN redova. Osim toga, uvažavanje refleksionih svojstava podloge je od posebnog značaja za bFN elektrane sa vertikalnim FN panelima postavljenim u regionima sa značajnim sniježnim padavinama. Sniježni pokrivač značajno poboljšava prirodnu reflektivnost podloge i može bitno uticati na povećanje insolacije na površinama bFN naročito u slučaju vertikalne instalacije FN panela.

5.2. Definisane novog matematičkog modela za proračun iradijacije

FN elektrane velike snage instalirane na zemlji se tipično sastoje od više redova čija je dužina značajno veća od širine FN panela kao i rastojanja između FN redova. Dužina i širina FN redova zavise od veličine parcele na kojoj se planira gradnja razmatrane elektrane. Uticajni parametri na tehno-ekonomske indikatore FN elektrane, koji su predmet razmatranja mnogih radova su: rastojanje između FN redova, nagibni i azimutni ugao FN redova. Na slici 5.1 prikazan je tipičan dizajn nekoliko FN redova velike mFN ili bFN elektrane koja je orijentisana ka jugu.



Slika 5.1. Tipičan izgled nekoliko FN redova elektrane

Rezultati prikazani u radovima [29], [68], [69], [72], [73], [74] i [77] ukazuju da kod elektrane sa bFN panelima moguće je ostvariti značajno povećanje proizvodnje povećanjem koeficijenta refleksije podloge na kojoj je instalirana FN elektrana. Pošto je predmet razmatranja velike FN elektrane koje su tipično postavljene na zemlji, reflektor se može ostvariti prostim farbanjem bijelom bojom površine između FN redova ili postavljanjem svijetlih (bijelih) blokova između FN redova.

Na osnovu dostupne literature, prilikom definisanja modela za iradijaciju za veliku FN elektranu sa mFN ili bFN panelima usvojene su sljedeće pretpostavke. Optimalni azimutni ugao za FN elektrane sa mFN ili bFN panelima je 0° , odnosno paneli su orijentisani ka južnoj strani [73]. Pod optimalnom vrijednošću nagibnog ugla FN redova podrazumijeva se ona vrijednost pri kojem se ima najveća godišnja proizvodnja ili najmanji troškovi proizvodnje električne energije ili najveći profit u toku životnog vijeka FN elektrane.

Imajući u vidu usvojenu pretpostavku za orijentaciju FN elektrane sa bFN panelima usvojeno je da direktna komponenta solarnog zračenja neće ozračiti zadnju stranu bFN panela. Naime, u pojedinim mjesecima tokom ranih jutarnjih časova, zadnja strana bFN panela može biti ozračen ali je iradijacija je u tim trenucima veoma mala. Shodno navedenom, doprinos direktne komponente sa zadnje strane FN panela je veoma mali, pa je u ovom radu ta komponenta zanemarena. Iradijacija koja padne na jedan FN red se sastoji od sljedeće tri komponente: direktne koja pada na prednju stranu FN redova, difuziona koja pada na prednju i zadnju stranu FN redova kao i reflektovane komponente od djelova reflektora koji su zasjenčeni i nezasjenčeni. Reflektovana komponenta iradijacije koja se odbija od reflektora pada na prednju i zadnju stranu FN redova. Jednačinom (5.1) predstavljen je opisani model za proračun iradijacije koja padne na aktivne površine FN panela [13].

$$I^b = (1-\varepsilon) \cdot I_b^{pv} + F_{dif}^f \cdot I_{dif} + F_{dif}^r \cdot I_{dif} + \dots \quad (5.1)$$

$$+ \rho \cdot \left(F_{r_um}^f \cdot (I_b^{hor} + I_{dif}) + F_{r_um}^r \cdot (I_b^{hor} + I_{dif}) + F_{r_s}^f \cdot I_{dif} + F_{r_s}^r \cdot I_{dif} \right)$$

gdje su: ε gubici usljed samozasjenčenja FN redova, I_b^{pv} je direktna komponenta iradijacije koja pada na FN panel, I_{dif} je horizontalna difuziona komponenta iradijacije, I_b^{hor} je direktna komponenta iradijacije koja pada na horizontalnu podlogu, F_{dif}^f je faktor viđenja između prednje strane FN reda i neba, F_{dif}^r je faktor viđenja između zadnje strane FN reda i neba, ρ je koeficijent refleksije podloge između FN redova, $F_{r_um}^f$ je faktor viđenja između reflektujuće površine između FN redova koja nije pod sjenkom i prednje strane FN panela, $F_{r_s}^f$ je faktor viđenja između reflektujuće površine između FN redova koja je pod sjenkom i prednje strane FN panela, $F_{r_um}^r$ je faktor viđenja između reflektujuće površine između FN redova koja nije pod sjenkom i zadnje strane FN panela, $F_{r_s}^r$ je faktor viđenja između reflektujuće površine između FN redova koja je pod sjenkom i zadnje strane FN panela.

Prvim sabirkom u jednačini (5.1) predstavljena je direktna komponenta iradijacije koja pada na prednju stranu FN panela. Prilikom proračuna direktne komponente uzeti su u obzir gubici usljed samozasjenčenja, koji su računati na sljedeći način [66]

$$\varepsilon = \left[1 - \frac{\cos L \cdot \cos \delta \cdot \cos H + \sin L \cdot \sin \delta}{\cos(L-\Sigma) \cdot \cos \delta \cdot \cos H + \sin(L-\Sigma) \cdot \sin \delta} \cdot \frac{D}{A_{pv}} \right] \times$$

$$\times \left[1 - \frac{\cos \delta \cdot \sin H \cdot \sin \Sigma}{\cos(L-\Sigma) \cdot \cos \delta \cdot \cos H + \sin(L-\Sigma) \cdot \sin \delta} \cdot \frac{D}{A_{pv}} \right] \quad (5.2)$$

gdje je L geografska širina lokacije FN elektrane, δ je ugao solarne deklinacije, H je satni ugao sunca, Σ je nagibni ugao FN panela, D je rastojanje između redova FN panela, A_{pv} je širina FN panela.

Na osnovu jednačine (5.2) može se zaključiti da gubici usljed samozasjenčenja, pored visine, širine FN redova i rastojanja između PV redova, zavise od azimutnog i ugla visine Sunca.

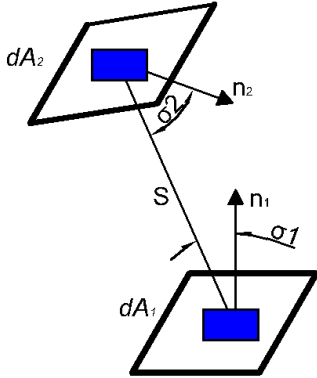
U literaturi se može naći više modela za proračun difuzione komponente [67], [78] ali je u ovome radu usvojen najrasprostranjeniji model koji podrazumijeva da difuziono sunčevo zračenje dolazi sa svih strana neba podjednako. Imajući navedeno u vidu, jasno je da kod bFN panela ukupno difuziono zračenje se sastoji od zbira difuzionog zračenja koje pada na prednju stranu i difuzionog zračenja koja pada na zadnju stranu bFN panela. Prilikom proračuna difuzione iradijacije uvaženo je rastojanje između FN redova [13]. Uticaj rastojanja između FN redova na proračun difuzionog sunčevog zračenja je uvaženo pomoću faktora viđenja (VF). Faktor viđenja koji određuje koji dio difuzionog zračenja emitovanog od proizvoljne površine A_1 dopijeva na proizvoljno udaljenu površinu A_2 proizvoljnog oblika, slika 5.2, je računat pomoću sljedeće formule

$$F_{A_1 \rightarrow A_2} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2}{\pi \cdot S_A^2} \cdot dA_2 \cdot dA_1 \quad (5.3)$$

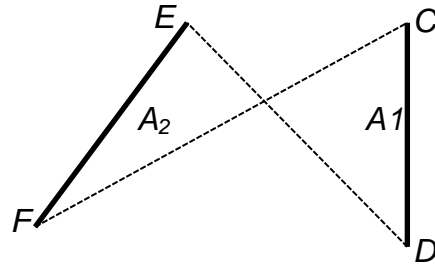
Metodologija proračuna faktora viđenja, zasnovana na Hottel-ovom pravilu [13], omogućava da se izračuna koji dio difuzionog zračenja emitovanog od proizvoljne beskonačno duge površine, A_1

dospijeva na proizvoljno udaljenu beskonačno dugu površinu A_{II} , slika 5.3. Formula kojom se računa faktor viđenja $F_{A_{II} \rightarrow A_I}$ između ploča A_I i A_{II} je:

$$F_{A_{II} \rightarrow A_I} = \frac{CF + DE - CE - DF}{2 \cdot CD}. \quad (5.4)$$



Slika 5.2. Faktor viđenja između dvije proizvoljne površine



Slika 5.3. Faktor viđenja između dvije beskonačno duge površine

U praksi, navedeni uslov o dužini FN redova se može smatrati ispunjen prilikom proračuna faktora viđenja kod velikih FN elektrana jer je dužina FN redova značajno veća od širine FN redova. Proračun F_{dif}^f , koji definiše koliko difuzione iradijacije sa neba pada na prednju stranu FN redova, čija je širina A_{pv} , je dat jednačinom (5.5), [13]:

$$F_{dif}^f = \frac{A_{pv} + D - \sqrt{(A_{pv} \cdot \sin(\Sigma))^2 + (D - A_{pv} \cdot \cos(\Sigma))^2}}{2 \cdot A_{pv}}. \quad (5.5)$$

Slično, F_{dif}^r koji određuje koliko difuzione iradijacije sa neba pada na zadnju stranu FN redova, je određen prema jednačini (5.6), [13]:

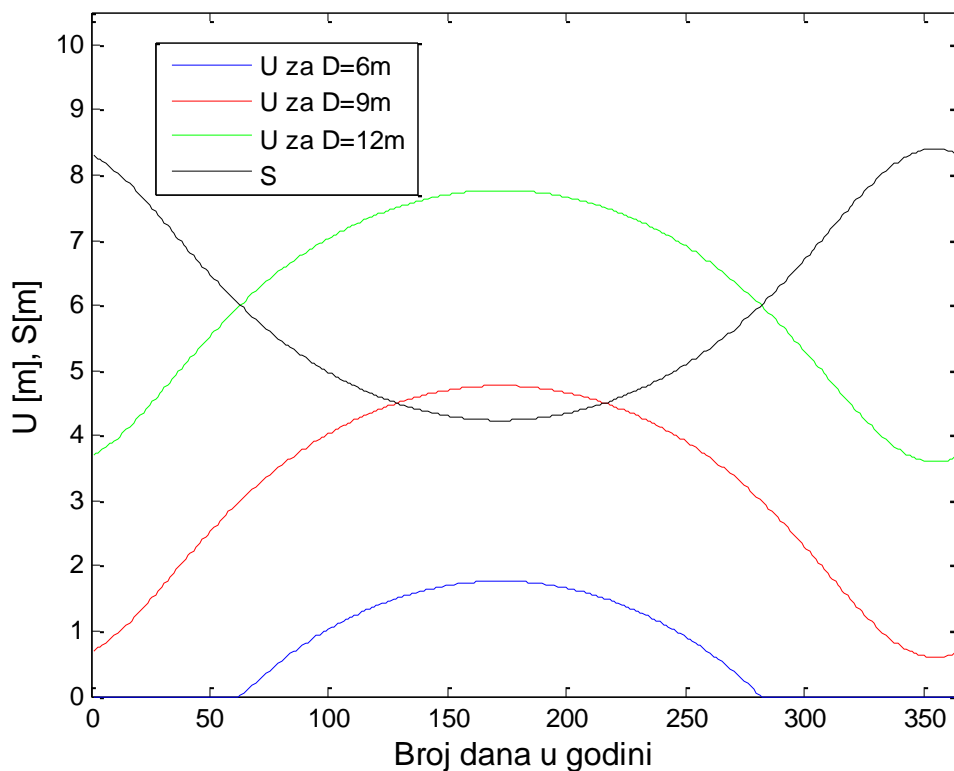
$$F_{dif}^r = \frac{A_{pv} + D - \sqrt{(D + A_{pv} \cdot \cos(\Sigma))^2 + (A_{pv} \cdot \sin(\Sigma))^2}}{2 \cdot A_{pv}}. \quad (5.6)$$

Za razliku od mFN elektrana, kod bFN elektrana doprinos reflektovane komponente, u zavisnosti od konstruktivnih parametara i koeficijenta refleksije, može biti značajan. Imajući u vidu da površina između FN redova može biti pod sjenkom ili bez sjenke, u zavisnosti od visine Sunca, ovdje su proračunati odgovarajući faktori viđenja. Imajući u vidu navedeno, važno je istaći da širine zasjenčenog (S) i nezasjenčenog (U) dijela površi između FN redova zavise od nagibnog ugla FN redova, širine FN redova (A_{pv}) i ugla visine Sunca (β). Strogo govoreći, zasjenčena površina zavisi od azimutnog ugla Sunca, ali ovaj efekat može biti zanemaren kod FN elektrana gdje je dužina FN redova (L_{pv}) mnogo duža od širine FN redova (A_{pv}). Usvajajući navedenu pretpostavku, proračun dužine zasjenčene i nezasjenčene površi između FN redova je izveden pomoću sljedećih formula

$$S = (A_{pv} \cdot \cos(\Sigma) + (A_{pv} \cdot \sin(\Sigma) / \operatorname{tg}(\beta))), \quad (5.7)$$

$$U = D - S = D - \left(A_{pv} \cdot \cos(\Sigma) + \left(A_{pv} \cdot \sin(\Sigma) / \operatorname{tg}(\beta) \right) \right). \quad (5.8)$$

Slika 5.4 ilustruje promjenu dužine sjenke (S) za svaki dan u godini za solarno podne u slučaju da je visina FN panela $A_{pv}=4$ m i nagibni ugao 30° za lokaciju sa geografskom širinom od 44.50° . Na istoj slici, prikazana je dužina nezasićenog dijela između FN redova za sljedeće vrijednosti rastojanja između FN redova: 6 m, 9 m i 12 m. Maksimalna dužina sjenke između FN redova je 21. decembra, kada je visina Sunca najmanja.



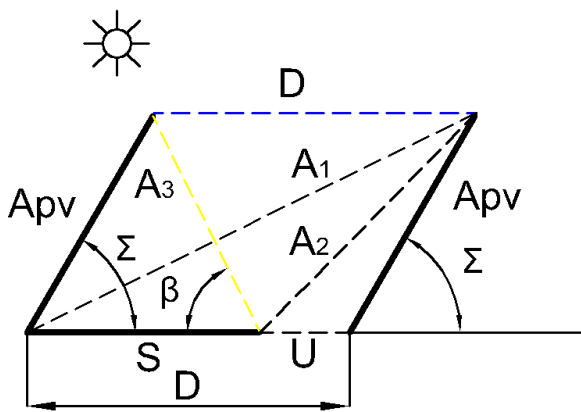
Slika 5.4. Dužina zasjenčene i nezasićenje površi između FN redova tokom godine

Faktori viđenja $F_{ref_s}^f, F_{ref_s}^r$ se odnose na dio prostora između FN redova i određuju koji dio reflektovanog zračenja od zasjenčene površine između FN redova dopijeva na prednju i zadnju stranu FN redova. Na osnovu slika 5.5 i 5.6, $F_{r_s}^f, F_{r_s}^r$ su [13]:

$$F_{r_s}^f = \frac{D + A_2 - A_1 - U}{2 \cdot A_{pv}}, \quad (5.9)$$

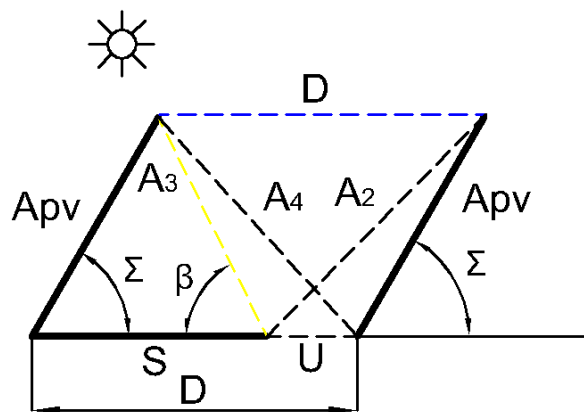
$$F_{r_s}^r = \frac{S + A_{pv} - A_3}{2 \cdot A_{pv}}. \quad (5.10)$$

gdje su: $A_1 = \sqrt{(D + A_{pv} \cdot \cos(\Sigma))^2 + (A_{pv} \cdot \sin(\Sigma))^2}$, $A_2 = \sqrt{(U + A_{pv} \cdot \cos(\Sigma))^2 + (A_{pv} \cdot \sin(\Sigma))^2}$ i $A_3 = A_{pv} \cdot \sin(\Sigma) / \sin(\beta)$.



Slika 5.5. Ilustracija sljedećih faktora viđenja:

$$F_{r_s}^f, F_{r_s}^r \text{ i } F_{sky \rightarrow s}.$$



Slika 5.6. Ilustracija sljedećih faktora viđenja:

$$F_{ref_us}^f, F_{ref_us}^r \text{ i } F_{sky \rightarrow us}.$$

Jednačine (5.11) i (5.12) definišu faktor viđenja pomoću kojih se računa koji dio reflektovanog zračenja sa horizontalne podloge između FN redova koja nije zasjenčena dopijeva na prednju i zadnju stranu FN redova:

$$F_{r_{us}}^f = \frac{U + A_{pv} - A_2}{2 \cdot A_{pv}}, \quad (5.11)$$

$$F_{r_{us}}^r = \frac{A_3 + D - A_4 - S}{2 \cdot A_{pv}}, \quad (5.12)$$

gdje je $A_4 = \sqrt{(A_{pv} \cdot \sin(\Sigma))^2 + (D - A_{pv} \cdot \cos(\Sigma))^2}$.

Na osnovu slika 5.5. i 5.6, jasno je da djelovi površine, koje čine stranice S i U ne vide ‘cijelo nebo’ zbog postojanja samih FN redova. Sa ciljem uvođenja korekcije za difuzionu komponentu koja pada na zasjenčenu i nezasjenčenu površinu između FN redova, sljedeći faktori viđenja su uvedeni:

$F_{sky \rightarrow s}$ i $F_{sky \rightarrow us}$. Ovi faktori viđenja određuju koji dio difuzionog horizontalnog zračenja dopijeva na površinu koja je zasjenčena (čija je jedna stranica S), slika 5.5. Primjenjujući Hoteel-ovo pravilo, dobija se:

$$F_{sky \rightarrow s} = \frac{A_1 + A_3 - A_2 - A_{pv}}{2 \cdot S}. \quad (5.13)$$

Na sličan način, koristeći sliku 5.6, $F_{sky \rightarrow us}$, određuje koliko difuzione iradijacije dopijeva na nezasjenčenu horizontalnu površinu između FN redova (čija je jedna stranica U):

$$F_{sky \rightarrow us} = \frac{A_2 + A_4 - A_3 - A_{pv}}{2 \cdot U}. \quad (5.14)$$

Konačno, predloženi model za proračun iradijacije bFN elektrane velike snage je definisan sljedećom jednačinom:

$$I_p^b = (1 - \varepsilon) \cdot I_b^{pv} + F_{dif}^f \cdot I_{dif} + F_{dif}^r \cdot I_{dif} + \rho \cdot \left(F_{r_un}^f \cdot (F_{sky \rightarrow us} \cdot I_{dif} + I_b^{hor}) + F_{r_un}^r \cdot (F_{sky \rightarrow us} \cdot I_{dif} + I_b^{hor}) + F_{r_s}^f \cdot F_{sky \rightarrow s} \cdot I_{dif} + F_{r_s}^r \cdot F_{sky \rightarrow s} \cdot I_{dif} \right) \quad (5.15)$$

5.3. Uporedna analiza predloženog i postojećeg modela iradijacije

Klasični model za proračun iradijacije FN elektrane sa bFN panelima, definisan jednačinom (5.1), upoređen je sa predloženim modelom, jednačina (5.15), kroz nekoliko numeričkih simulacija. Komparativna analiza dva modela je sprovedena kroz poređenje proračunate godišnje proizvodnje energije, optimalnih nagibnih uglova FN redova i rastojanja između FN redova kao i LCOE analiziranih FN elektrana. Autoru ove disertacije su bili dostupni višegodišnji realni satni podaci o iradijaciji i temperaturi za mikrolokaciju Kladovo, Srbija. U ovom poglavlju, procjena godišnje proizvodnje električne energije je određena na primjeru FN elektrane instalisane snage 2.4 MWp koja zauzima površinu dimenzija 300 m x 200 m, a bFN paneli su orijentisani ka jugu. Razlog za navedenu snagu i površinu zemljišta i orijentaciju FN redova je zbog toga što u analiziranom regionu već postoji izgrađena mFN elektrana. Mjesečni podaci za insolaciju i srednju temperaturu proračun su dati u tabeli 4.1 .

5.3.1. Analiza uticaja koeficijenta refleksije, rastojanja između FN redova i nagibnog ugla FN panela na proizvodnju električne energije

U ovom odeljku, poređenje predloženog sa postojećim modelom iradijacije je sprovedeno komparativnom analizom godišnje proizvodnje na primjeru bFN elektrane. Godišnja proizvodnja FN elektrane je računata prema sljedećoj formuli:

$$W = \sum_{t=1}^{8760} P \cdot \frac{I^b(t) \cdot \Delta t \cdot \eta_{inv} \cdot \eta_{temp}}{I_{STC}}, \quad (5.16)$$

gdje je P instalisana DC snaga FN elektrane pri standardnim test uslovima, I^b je radijacija koja pada na FN panele. Za stepen efikasnosti invertora je usvojena prosječna vrijednost od 0.95. Uticaj temperature na efikasnost FN konverzije je izvršen prema formuli (3.6), gdje je za r usvojena vrijednost od 0.31 %/°C [11].

Procjena godišnje električne energije koja se dobija iz analizirane bFN elektrane je računata korišćenjem predloženog i postojećeg modela iradijacije za nekoliko vrijednosti koeficijenta refleksije, nagibnog ugla FN redova i rastojanja između FN redova. Poređenje je izvršeno na osnovu procentualne razlike na sljedeći način:

$$\Delta w(\%) = \frac{W_e - W_p}{W_e} \cdot 100, \quad (5.17)$$

gdje je W_e godišnja proizvodnja FN elektrane zasnovan na predloženom modelu iradijacije definisanim sa (5.15), a W_p je godišnja proizvodnje zasnovan na postojećem modelu iradijacije definisanim sa (5.1) i Δw je procentualna razlika proizvodnje između dva modela.

Rezultati poređenja dva modela prikazani su u tabelama 5.1 i 5.2. Dobijeni rezultati, u cilju boljeg sagledavanja rezultata, prikazani su za pet različitih vrijednosti nagibnog ugla FN redova (Σ), za četiri različite vrijednosti rastojanja između FN redova (D) i za četiri različite vrijednosti

koeficijenta refleksije podloge između FN redova (ρ). Ovdje je važno napomenuti da se radi o difuzionoj refleksiji, jer je takav tip refleksije odgovara prirodnim reflektorima.

Tabela 5.1. Numerički rezultati za Δw za nekoliko vrijednosti Σ i D i za koeficijente refleksije površine između FN redova u iznosu od 0.2 i 0.4

ρ	0.2				0.4			
D [m]	6	8	10	12	6	8	10	12
$\Sigma=5^\circ$	5.98	5.94	5.93	5.93	11.12	11.04	11.02	11.01
$\Sigma=15^\circ$	4.67	4.39	4.33	4.29	8.69	8.17	8.04	7.98
$\Sigma=25^\circ$	4.11	3.57	3.41	3.34	7.66	6.65	6.34	6.19
$\Sigma=35^\circ$	3.75	3.12	2.86	2.74	7.00	5.81	5.30	5.06
$\Sigma=45^\circ$	3.51	2.85	2.51	2.35	6.53	5.29	4.65	4.34

Tabela 5.2. Numerički rezultati za Δw za nekoliko vrijednosti Σ i D i za koeficijente refleksije površine između FN redova u iznosu od 0.6 i 0.8

ρ	0.6				0.8			
D [m]	6	8	10	12	6	8	10	12
$\Sigma=5^\circ$	21.69	21.60	21.58	21.57	19.47	19.33	19.29	19.27
$\Sigma=15^\circ$	18.09	17.41	17.27	17.21	15.28	14.32	14.06	13.94
$\Sigma=25^\circ$	16.56	15.17	16.56	14.70	13.48	11.66	11.07	11.07
$\Sigma=35^\circ$	15.63	14.01	13.41	13.19	12.32	10.18	9.25	8.80
$\Sigma=45^\circ$	15.08	13.44	12.66	12.37	11.48	9.24	8.08	7.49

Na osnovu tabela 5.1 i 5.2 može se zaključiti da od koeficijenta refleksije najviše zavisi odstupanje dva razmatrana modela za iradijaciju. Imajući u vidu da od koeficijenta refleksije zavisi i doprinos reflektovane komponente na proizvodnju električne energije ovakvi rezultati su i očekivani.

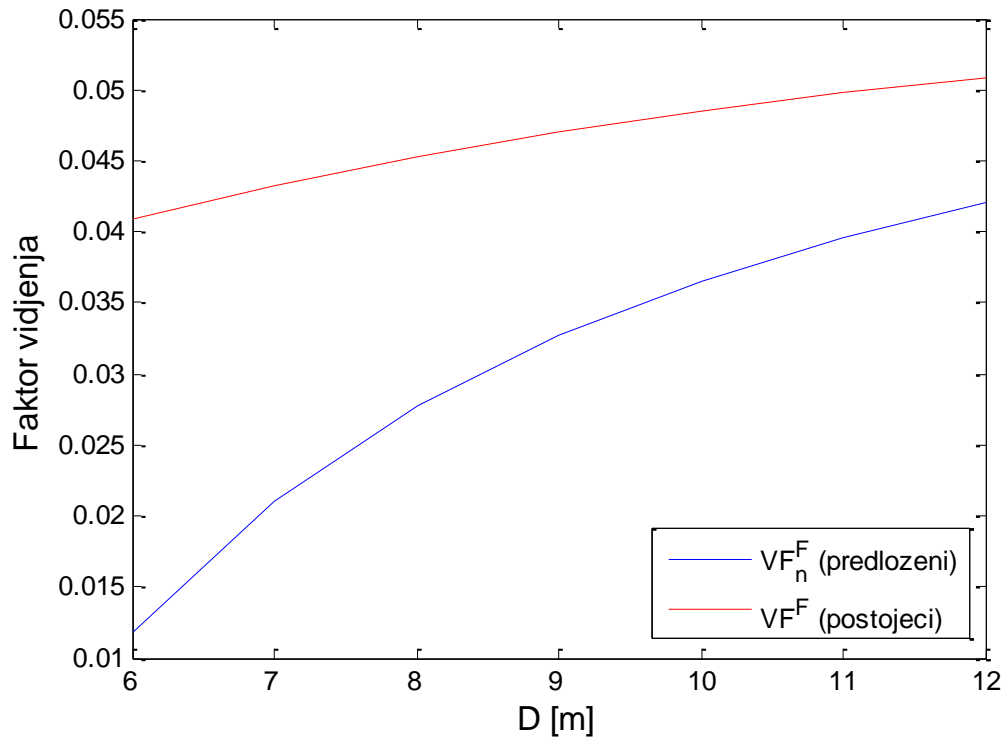
Takođe, na osnovu rezultata u tabelama 5.1 i 5.2 očigledno je da što je rastojanje veće između FN redova tada je i manje odstupanje između dva modela iradijacije. Navedeni zaključak se može objasniti da što je veće rastojanje između FN redova, time su i zasjenčene i nezasjenčene površine između FN redova više 'otvorene' ka nebu. To znači da odgovarajući faktori viđenja za prednju i zadnju stranu FN redova su bliski vrijednosti koja odgovara postojećem modelu iradijacije koji podrazumijeva da na zasjenčene i nezasjenčene površine između FN redova pada cjelokupna difuziona iradijacija. U cilju potvrde prethodnog objašnjenja sprovedene su numeričke simulacije odgovarajućih faktora viđenja.

Na osnovu jednačina (5.1) i (5.15), razlika dva modela je u faktorima viđenja koji se odnose na reflektovanu komponentu iradijacije na prednju i zadnju stranu FN redova. U tabeli 5.3 dat je uporedni prikaz predloženog i postojećeg modela za komponentu iradijacije koja predstavlja razlika između dva modela. Nakon pregrupisanja modela (5.1) i (5.15), u tabeli 5.3 prikazani su članovi za reflektovanu komponentu iradijacije, koja je različita za dva modela.

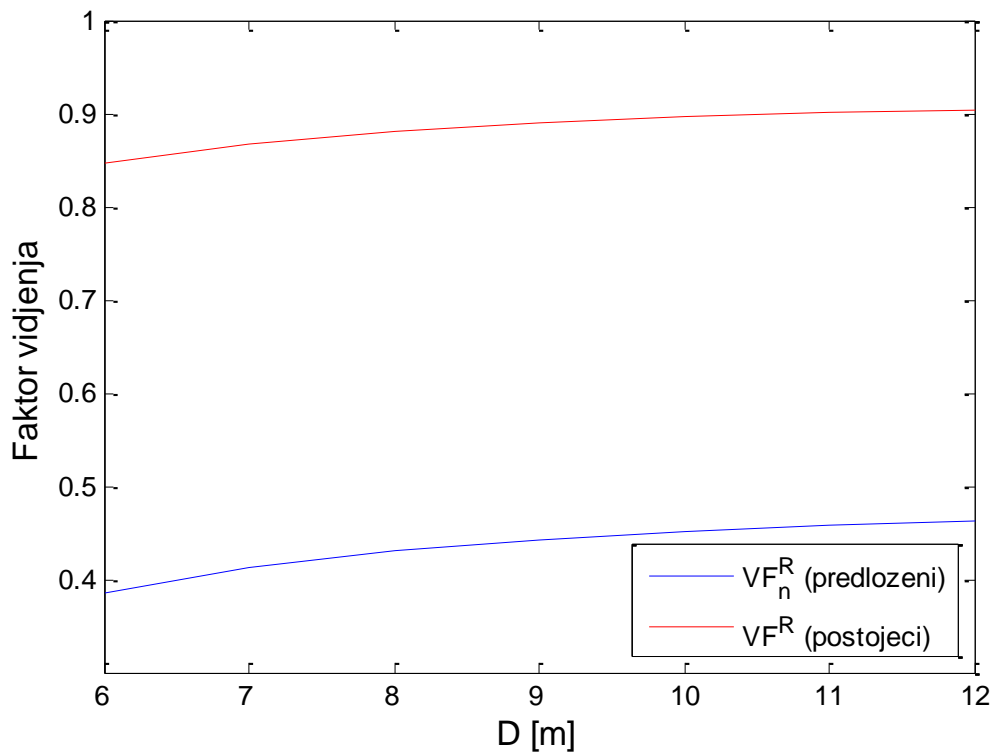
Tabela 5.3. Reflektovana komponenta iradijacije prema modelima (5.1) i (5.15)

	Predloženi	Postojeći
Reflektovana sa prednje strane	$I_{dif}^{hor} \cdot (F_{r_un}^f \cdot F_{sky \rightarrow un} + F_{r_s}^f \cdot F_{sky \rightarrow s}) =$ $= I_{dif}^{hor} \cdot VF_n^F$	$I_{dif}^{hor} \cdot (F_{r_un}^f + F_{r_s}^f) = I_{dif}^{hor} \cdot VF^F$
Reflektovana sa zadnje strane	$I_{dif}^{hor} \cdot (F_{r_un}^r \cdot F_{sky \rightarrow un} + F_{r_s}^r \cdot F_{sky \rightarrow s}) =$ $= I_{dif}^{hor} \cdot VF_n^R$	$I_{dif}^{hor} \cdot (F_{r_un}^r + F_{r_s}^r) = I_{dif}^{hor} \cdot VF^R$

Na slikama 5.7 i 5.8 su prikazane vrijednosti faktora viđenja u podne u funkciji rastojanja između FN redova, dok su za ostale parametre usvojene sljedeće vrijednosti $\Sigma=30^\circ$, $\delta=30^\circ$ i $A_{pv}=4$ m.



Slika 5.7. Faktori viđenja sa prednje strane FN reda u zavisnosti od D prema postojećem i predloženom modelu



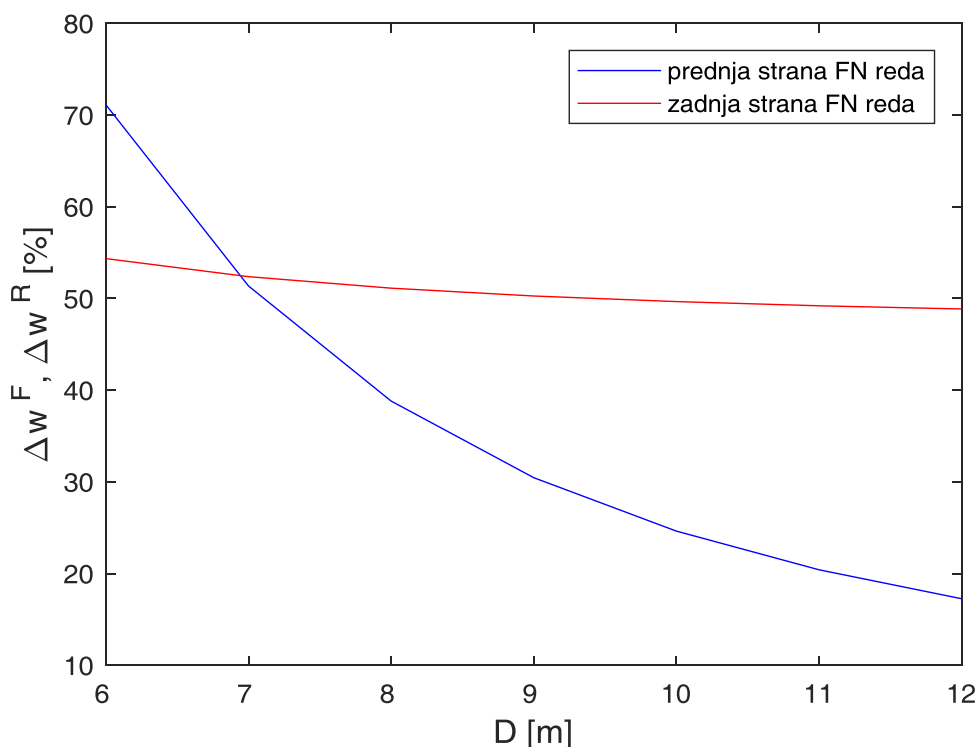
Slika 5.8. Faktori viđenja sa zadnje strane FN reda u zavisnosti od D prema postojećem i predloženom modelu

Rezultati prikazani na slikama 5.7 i 5.8 daju očekivane rezultate. Naime, pokazano je, bez obzira na koji način i sa koje strane FN redova su prikazani faktora viđenja, da važi da što je manje rastojanje između FN redova to je i manja vrijednost faktora viđenja, jer na površine koje su zasjenčene i nezasjenčene između FN redova dopijeva manje difuzione iradijacije nego u slučaju kada je rastojanje veće.

Radi poređenja dva modela, na slici 5.9 prikazana je procentualna razlika vrijednosti odgovarajućih faktora viđenja računatih prema formulama (5.18) i (5.19), za različita rastojanja između FN redova.

$$\Delta w^F (\%) = \frac{VF_n^F - VF^F}{VF^F} \cdot 100, \quad (5.18)$$

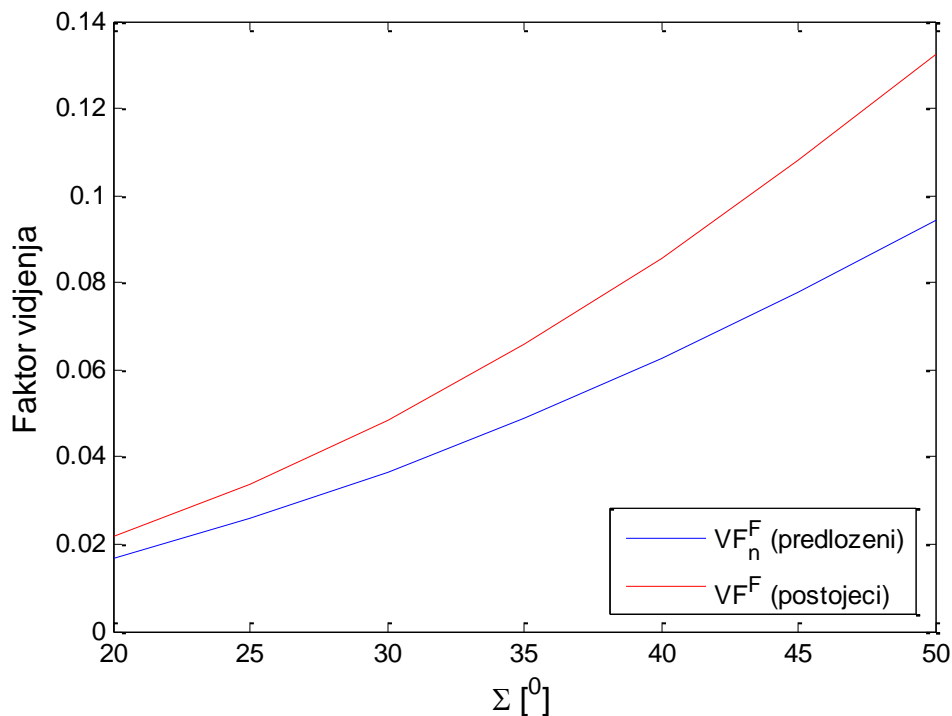
$$\Delta w^R (\%) = \frac{VF_n^R - VF^R}{VF^R} \cdot 100. \quad (5.19)$$



Slika 5.9. Procentualna razlika između dva modela faktora viđenja u zavisnosti od D računata za prednju i zadnju stranu FN reda

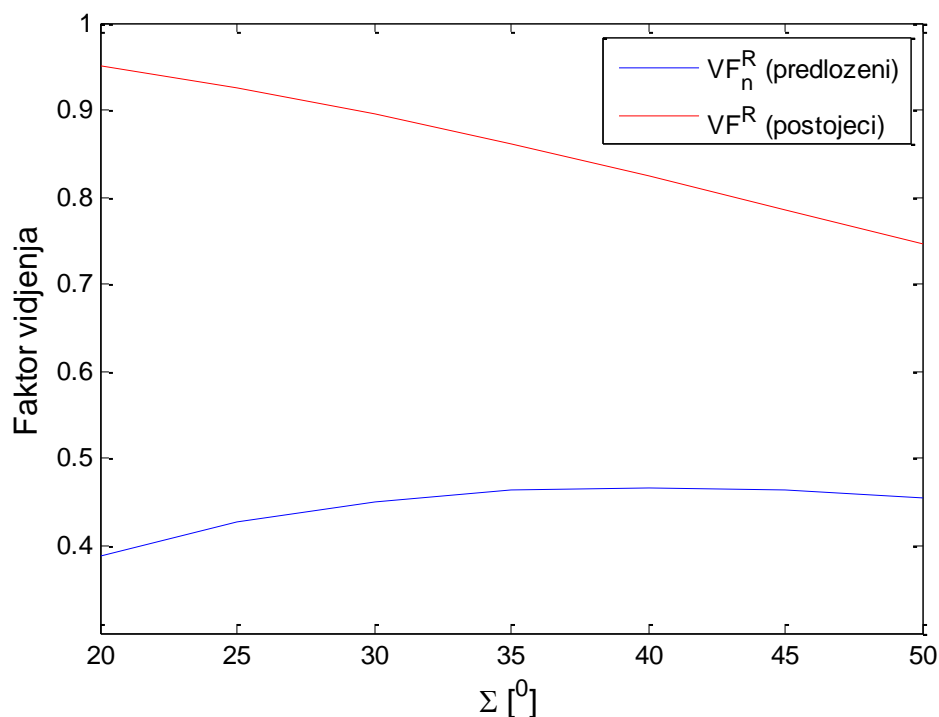
Na kraju, slika 5.9 potvrđuje da što je veće rastojanje između FN redova tada je i manja razlika između dva modela. Sprovedena analiza uticaja rastojanja između FN redova, koja ima efekte na proizvodnju FN elektrane, potvrđuje rezultate koji su dati u tabelama 5.1 i 5.2.

Zavisnosti faktora viđenja u funkciji nagibnog ugla FN redova je prikazana na slikama 5.10 i 5.11. Usvojene vrijednosti za ostale parametre su: $D=10$ m, $\delta=30^\circ$ i $A_{pv}=4$ m.



Slika 5.10. Faktori viđenja sa prednje strane FN reda u zavisnosti od Σ prema postojećem i predloženom modelu

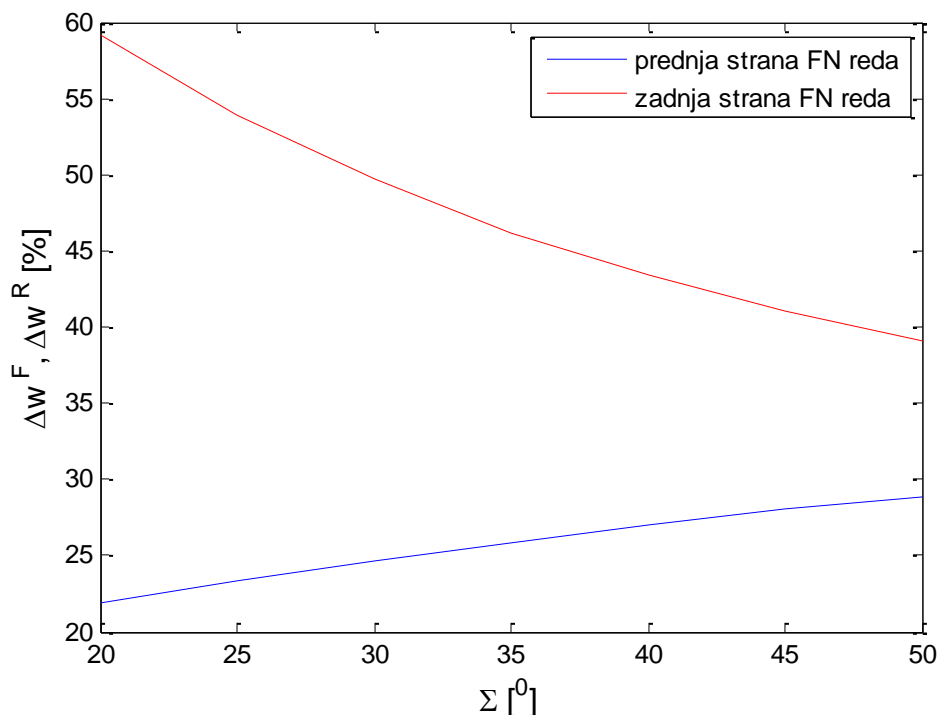
Na osnovu slike 5.10, faktor viđenja koji se odnose na prednju stranu FN redova karakteriše da se sa većim nagibnim uglom FN redova raste i vrijednost pomenutih faktora viđenja. Očekivano, pri manjem nagibnom uglu, površina zemljišta koja je pod sjenkom vidi značajno manji dio neba od 'cijelog' neba što je pretpostavka postojećeg modela. Pošto predloženi model uvažava da površine između FN redova ne vide 'cijelo' nebo, pa i odatle se može objasniti razlika u rezultatima, za prednju stranu FN redova.



Slika 5.11. Faktori viđenja sa zadnje strane FN reda u zavisnosti od Σ prema postojećem i predloženom modelu

Sa slike 5.11 može se uočiti da VF_n^R ima osobinu da pri manjim nagibnim uglovima FN reda ima trend rasta, dok za vrijednosti nagibnog ugla FN reda veće od 35° ima skoro pa konstantu vrijednost. Nasuprot tome, VF^R u posmatranom intervalu vrijednosti za nagibne uglove FN reda opada.

Konačno, procentualna razlika između faktora viđenja za prednju i zadnju stranu FN redova je prikazana na slici 5.12. Kao što se može vidjeti, kako se povećava nagibni ugao FN redova smanjuje se odstupanje za VF_n^R i VF^R za faktore viđenja za reflektovanu komponentu sa zadnje strane FN reda. Nasuprot tome, kako se nagibni ugao FN reda povećava, razlika između VF_n^F i VF^F se povećava.



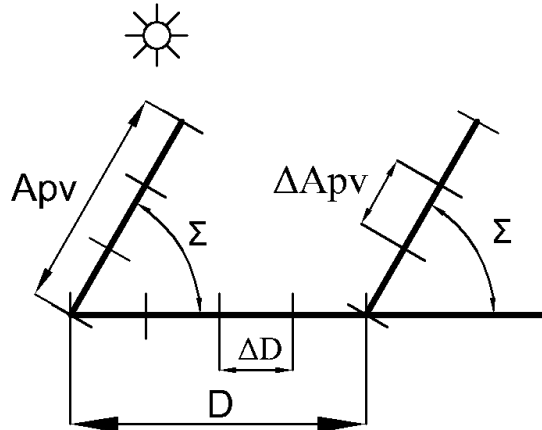
Slika 5.12. Procentualna razlika između vrijednosti faktora viđenja u zavisnosti od Σ proračunatih korišćenjem predloženog i postojećeg matematičkog modela

5.3.2. Predloženi model iradijacije sa segmentiranjem površina

Primjena faktora viđenja u cilju proračuna iradijacije koja pada na FN panele je tema mnogih radova. U literaturi je razvijeno nekoliko numeričkih pristupa proračunu faktora viđenja. U cilju proračuna faktora viđenja u [79] korišćena je Monte Carlo metoda, u [80] korišćena je metoda konačnih elemenata, dok je u [81] primijenjena x-ray metoda. U radovima [27], [82], [73] i [83] proračun faktora viđenja se bazira na rješavanju jednostrukih integrala po uglu ili jedinici dužine razmatrane površi. U radu [84], proračun faktora viđenja je izvršen tako što je razmatrana površina segmentirana na nekoliko manjih površina, a nakon toga su primijenjene proste algebarske relacije za proračun faktora viđenja između segmentiranih površina. U [85] dat je detaljan pregled različitih pristupa proračuna faktora viđenja. Na kraju pregleda literature, od značaja je naglasiti da u tehničkim dokumentima komercijalnog softvera SAM proračun difuzione i reflektovane iradijacije se vrši pomoću faktora viđenja.

Segmentiranjem površina između FN redova i površina FN redova generalno se dobija tačniji proračun iradijacije na površinama bFN panela ali je matematički kompleksniji i računarski zahtjevniji. U ovom odeljku rada primijenjena je tehnika segmentiranja, po uzoru na rad [84], na model iradijacije koji je opisan u prethodnom 5.1.

Pretpostavimo da su, kao na slici 5.13, površine FN redova i površina između FN redova segmentirane na $N=A_{pv}/\Delta A_{pv}$ i $M=D/\Delta D$ pravougaonika, respektivno. Dakle, površina između FN redova se sastoji od M pravougaonika, dimenzija $(\Delta D \times L_{pv})$, a površina FN redova se sastoji od N pravougaonika dimenzija $(\Delta A_{pv} \times L_{pv})$. Ovdje je usvojen postupak iz [84], gdje je detaljno opisan postupak segmentiranja za proračun difuzione iradijacije koja pada sa neba na prednju stranu FN redova. Na sličan način se može proračunati i difuziona iradijacija od neba koja pada na zadnju stranu FN redova. Ovdje je detaljno prikazan postupak sa segmentiranjem predloženog modela u cilju proračuna reflektovane iradijacije koja pada na prednju i zadnju stranu FN panela.



Slika 5.13. Prikaz segmentirana dva FN reda i segmentirano rastojanje između FN redova

Uvođenjem segmentiranja u predloženi model, reflektovana iradijacija od dijela podloge koji nije zasjenčen, a koja se odbija na n -ti segment FN redova, je:

$$\begin{aligned}
 I_{(r_un)n}^f &= \sum_{m=1}^{M_u} \rho \cdot F_{(r_un)mn}^f \cdot F_{(sky \rightarrow un)m} \cdot I_{dif}^{hor} + \sum_{m=1}^{M_u} \rho \cdot F_{(r_un)mn}^f \cdot I_b^{hor} = \\
 &= \rho \cdot \sum_{m=1}^{M_u} \left(F_{(r_un)mn}^f \cdot F_{(sky \rightarrow un)m} \cdot I_{dif}^{hor} + F_{(r_un)mn}^f \cdot I_b^{hor} \right).
 \end{aligned} \tag{5.20}$$

M_s i M_u je ukupan broj segmenata zasjenčene i nezasjenčene površi između FN redova, respektivno. Ukupna iradijacija koja pada na prednju stranu FN redova od nezasjenčenog dijela površine između FN redova je:

$$I_{(r_un)}^f = \rho \cdot \sum_{n=1}^N \left(\sum_{m=1}^{M_u} \left(F_{(r_un)mn}^f \cdot F_{(sky \rightarrow un)m} \cdot I_{dif}^{hor} + F_{(r_un)mn}^f \cdot I_b^{hor} \right) \right). \tag{5.21}$$

Na sličan način, nalazi se ukupna reflektovana iradijacija od nezasjenčenog dijela prostora između FN redova koja pada na zadnju stranu FN reda:

$$I_{(r_un)}^r = \rho \cdot \sum_{n=1}^N \left(\sum_{m=1}^{M_u} \left(F_{(r_un)mn}^r \cdot F_{(sky \rightarrow un)m} \cdot I_{dif}^{hor} + F_{(r_un)mn}^r \cdot I_b^{hor} \right) \right). \tag{5.22}$$

Ukupna reflektovana iradijacija od zasjenčenog dijela prostora između FN redova koja pada na prednju stranu FN redova je:

$$I_{(r_s)}^f = \rho \cdot \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^{M_s} F_{(r_s)mn}^f \cdot F_{(sky \rightarrow s)m} \cdot I_{dif}^{hor}. \tag{5.23}$$

Ukupna reflektovana iradijacija od zasjenjenog dijela prostora između FN redova koja pada na zadnju stranu FN redova je:

$$I_{(r_s)}^r = \rho \cdot \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^{M_s} F_{(r_s)mn}^r \cdot F_{(sky \rightarrow s)m} \cdot I_{dif}^{hor} \quad (5.24)$$

Kompletan predloženi model za proračun iradijacije definisan jednačinom (5.15), nakon primjene tehnike segmentiranja ima sljedeću formu:

$$\begin{aligned} I_{p_s}^b &= (1 - \varepsilon) \cdot I_b^{pv} + \sum_{n=1}^N F_{(dif)n}^f \cdot I_{dif}^{hor} + \sum_{n=1}^N F_{(dif)n}^r \cdot I_{dif}^{hor} + \rho \cdot \sum_{n=1}^N \left(\sum_{m=1}^{M_u} F_{(r_un)mn}^f \cdot \left(F_{(sky \rightarrow un)m} \cdot I_{dif}^{hor} + I_b^{hor} \right) \dots \right. \\ &\dots + \sum_{m=1}^{M_u} F_{(r_un)mn}^r \cdot \left(F_{(sky \rightarrow un)m} \cdot I_{dif}^{hor} + I_b^{hor} \right) + \sum_{m=1}^{M_s} F_{(r_s)mn}^f \cdot F_{(sky \rightarrow s)m} \cdot I_{dif}^{hor} + \sum_{m=1}^{M_s} F_{(r_s)mn}^r \cdot F_{(sky \rightarrow s)m} \cdot I_{dif}^{hor} \left. \right) \quad (5.25) \end{aligned}$$

Proračun iradijacije koristeći postojeći model definisan jednačinom (5.1), nakon segmentiranja ima sljedeću formu:

$$\begin{aligned} I_{e_s}^b &= (1 - \varepsilon) \cdot I_b^{pv} + \sum_{n=1}^N F_{(dif)m}^f \cdot I_{dif}^{hor} + \sum_{n=1}^N F_{(dif)n}^r \cdot I_{dif}^{hor} + \rho \cdot \sum_{n=1}^N \left(\sum_{m=1}^{M_u} F_{(r_un)mn}^f \cdot \left(I_{dif}^{hor} + I_b^{hor} \right) + \dots \right. \\ &\dots + \sum_{m=1}^{M_u} F_{(r_un)mn}^r \cdot \left(I_{dif}^{hor} + I_b^{hor} \right) + \sum_{m=1}^{M_s} F_{(r_s)mn}^f \cdot I_{dif}^{hor} + \sum_{m=1}^{M_s} F_{(r_s)mn}^r \cdot I_{dif}^{hor} \left. \right) \quad (5.26) \end{aligned}$$

Faktor viđenja između m -tog segmenta površine između FN reda i n -tog segmenta prednje strane FN reda je određen na sljedeći način:

$$F_{r_mn}^f = \frac{A_{f_mn} + B_{f_mn} - C_{f_mn} - D_{f_mn}}{2 \cdot \Delta A_{pv}} \quad (5.27)$$

gdje su: $A_{f_mn} = \sqrt{\left(D - (m-1) \cdot \Delta D + (n-1) \cdot \Delta A_{pv} \cdot \cos(\Sigma) \right)^2 + \left((n-1) \cdot \Delta A_{pv} \cdot \sin(\Sigma) \right)^2}$,

$B_{f_mn} = \sqrt{\left(D - m \cdot \Delta D + n \cdot \Delta A_{pv} \cdot \cos(\Sigma) \right)^2 + \left(n \cdot \Delta A_{pv} \cdot \sin(\Sigma) \right)^2}$,

$C_{f_mn} = \sqrt{\left(D - m \cdot \Delta D + (n-1) \cdot \Delta A_{pv} \cdot \cos(\Sigma) \right)^2 + \left((n-1) \cdot \Delta A_{pv} \cdot \sin(\Sigma) \right)^2}$,

$D_{f_mn} = \sqrt{\left(D - (m-1) \cdot \Delta D + n \cdot \Delta A_{pv} \cdot \cos(\Sigma) \right)^2 + \left(n \cdot \Delta A_{pv} \cdot \sin(\Sigma) \right)^2}$.

Jednačina (5.28) definiše faktor viđenja između m -tog segmenta površine između FN reda i zadnje strane FN reda:

$$F_{r_mn}^r = \frac{A_{r_mn} + B_{r_mn} - C_{r_mn} - D_{r_mn}}{2 \cdot \Delta A_{pv}} \quad (5.28)$$

gdje su: $A_{r_mn} = \sqrt{\left((m-1) \cdot \Delta D - n \cdot \Delta A_{pv} \cdot \cos(\Sigma) \right)^2 + \left(n \cdot \Delta A_{pv} \cdot \sin(\Sigma) \right)^2}$,

$$\begin{aligned}
B_{r_mn} &= \sqrt{\left(m \cdot \Delta D - (n-1) \cdot \Delta A_{pv} \cdot \cos(\Sigma)\right)^2 + \left((n-1) \cdot \Delta A_{pv} \cdot \sin(\Sigma)\right)^2}, \\
C_{r_mn} &= \sqrt{\left((m-1) \cdot \Delta D - (n-1) \cdot \Delta A_{pv} \cdot \cos(\Sigma)\right)^2 + \left((n-1) \cdot \Delta A_{pv} \cdot \sin(\Sigma)\right)^2}, \\
D_{r_mn} &= \sqrt{\left(m \cdot \Delta D - n \cdot \Delta A_{pv} \cdot \cos(\Sigma)\right)^2 + \left(n \cdot \Delta A_{pv} \cdot \sin(\Sigma)\right)^2}.
\end{aligned}$$

Faktor viđenja između neba i m -tog segmenata površine između FN redova je definisan na sljedeći način:

$$F_{(sky)m} = \frac{A_{s_m} + B_{s_m} - C_{s_m} - D_{s_m}}{2 \cdot \Delta D}, \quad (5.29)$$

gdje su: $A_{s_m} = \sqrt{\left(A_{pv} \cdot \cos(\Sigma) + D - (m-1) \cdot \Delta D\right)^2 + \left(A_{pv} \cdot \sin(\Sigma)\right)^2}$,

$$B_{s_m} = \sqrt{\left(m \cdot \Delta D - A_{pv} \cdot \cos(\Sigma)\right)^2 + \left(A_{pv} \cdot \sin(\Sigma)\right)^2},$$

$$C_{s_m} = \sqrt{\left(A_{pv} \cdot \cos(\Sigma) + D - m \cdot \Delta D\right)^2 + \left(A_{pv} \cdot \sin(\Sigma)\right)^2},$$

$$D_{s_m} = \sqrt{\left((m-1) \cdot \Delta D - A_{pv} \cdot \cos(\Sigma)\right)^2 + \left(A_{pv} \cdot \sin(\Sigma)\right)^2}.$$

Faktor viđenja između neba i n -tog segmenata prednje strane FN reda je određen jednačinom:

$$F_{(dif)n}^f = \frac{A_{(dif)n}^f + B_{(dif)n}^f - C_{(dif)n}^f - D_{(dif)n}^f}{2 \cdot \Delta A_{pv}}, \quad (5.30)$$

gdje su: $A_{(dif)n}^f = (N-n+1) \cdot \Delta A_{pv}$, $B_{(dif)n}^f = \sqrt{\left((N-n) \cdot \Delta A_{pv} \cdot \sin(\Sigma)\right)^2 + \left(D - (N-n) \cdot \Delta A_{pv} \cdot \cos(\Sigma)\right)^2}$

$$C_{(dif)n}^f = (N-n) \cdot \Delta A_{pv} \text{ i } D_{(dif)n}^f = \sqrt{\left((N-n+1) \cdot \Delta A_{pv} \cdot \sin(\Sigma)\right)^2 + \left(D - (N-n+1) \cdot \Delta A_{pv} \cdot \cos(\Sigma)\right)^2}.$$

Faktor viđenja između neba i n -tog segmenata zadnje strane FN reda je određen na sljedeći način:

$$F_{(dif)n}^r = \frac{A_{(dif)n}^r + B_{(dif)n}^r - C_{(dif)n}^r - D_{(dif)n}^r}{2 \cdot \Delta A_{pv}}, \quad (5.31)$$

gdje su: $A_{(dif)n}^r = (N-n+1) \cdot \Delta A_{pv}$,

$$B_{(dif)n}^r = \sqrt{\left((N-n) \cdot \Delta A_{pv} \cdot \sin(\Sigma)\right)^2 + \left(D + (N-n) \cdot \Delta A_{pv} \cdot \cos(\Sigma)\right)^2},$$

$$C_{(dif)n}^r = (N-n) \cdot \Delta A_{pv} \text{ i } D_{(dif)n}^r = \sqrt{\left((N-n+1) \cdot \Delta A_{pv} \cdot \sin(\Sigma)\right)^2 + \left(D + (N-n+1) \cdot \Delta A_{pv} \cdot \cos(\Sigma)\right)^2}.$$

Broj segmenata površine između FN redova (M) i samih FN redova (N) može biti proizvoljno određen, pri čemu treba imati u vidu da što je veći broj segmenta to je proračun precizniji. Broj segmenata koji pripadaju zasjenčenom dijelu prostora između FN redova je računat kao

$M_s = \text{round}\left(\frac{S}{\Delta D}\right)$. Preostali broj segmenata površi između FN redova, $M_u = M - M_s$, pripada nezasjenčenom dijelu prostora između FN redova. Određivanjem M_s , moguće je izdvojiti iz $F_{(r)mn}^f$, $F_{(r)mn}^r$ i $F_{(sky)m}$ faktore viđenja koji opisuju nezasjenčeni dio prostora između FN redova su: $F_{(r_un)mn}^f, F_{(r_un)mn}^r$ i $F_{(sky\rightarrow un)m}$. Na sličan način se određuju i faktori viđenja koji opisuju zasjenčeni dio prostora između FN redova: $F_{(r_s)mn}^f, F_{(r_s)mn}^r$ i $F_{(sky\rightarrow s)m}$. U tabeli 5.4 prikazane su formule za proračun srednjih vrijednosti faktora viđenja.

Tabela 5.4. Srednje vrijednosti faktora viđenja

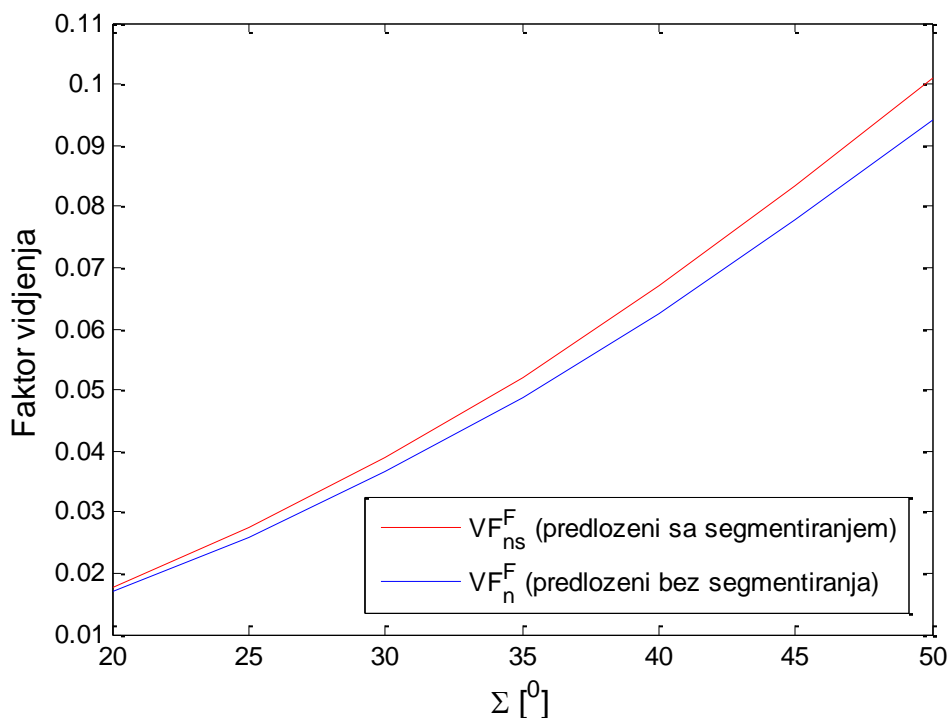
Faktori viđenja	Formula
Srednja vrijednost predloženog $VF_{p_s}^F$ sa prednje strane sa segmentiranjem	$VF_{p_s}^F = \frac{\rho \cdot \sum_{n=1}^N \left(\sum_{m=1}^{M_u} F_{(r_un)mn}^f \cdot F_{(sky\rightarrow un)m} + \sum_{m=1}^{M_s} F_{(r_s)mn}^f \cdot F_{(sky\rightarrow s)m} \right)}{N}$
Srednja vrijednost postojećeg $VF_{e_s}^F$ sa prednje strane sa segmentiranjem	$VF_{e_s}^F = \frac{\rho \cdot \sum_{n=1}^N \left(\sum_{m=1}^{M_u} F_{(r_un)mn}^f + \sum_{m=1}^{M_s} F_{(r_s)mn}^f \right)}{N}$
Srednja vrijednost predloženog $VF_{p_s}^R$ sa zadnje strane sa segmentiranjem	$VF_{p_s}^R = \frac{\rho \cdot \sum_{n=1}^N \left(\sum_{m=1}^{M_u} F_{(r_un)mn}^r \cdot F_{(sky\rightarrow un)m} + \sum_{m=1}^{M_s} F_{(r_s)mn}^r \cdot F_{(sky\rightarrow s)m} \right)}{N}$
Srednja vrijednost postojećeg $VF_{e_s}^R$ sa zadnje strane sa segmentiranjem	$VF_{e_s}^R = \frac{\rho \cdot \sum_{n=1}^N \left(\sum_{m=1}^{M_u} F_{(r_un)mn}^r + \sum_{m=1}^{M_s} F_{(r_s)mn}^r \right)}{N}$

U nastavku poglavlja izvršene su dvije komparativne analize, a prilikom ovih numeričkih eksperimenata usvojeni broj segmenata za FN redove i površine između FN redova je $N=M=100$. Dobijene zavisnosti faktora viđenja od nagibnog ugla FN panela izračunate su za sljedeće vrijednosti D , A_{pv} i β : $D=10$ m, $A_{pv}=4$ m i $\beta=30^\circ$, dok su zavisnosti faktora viđenja od rastojanja između FN redova izračunate za sljedeće vrijednosti Σ , A_{pv} i β : $\Sigma=30^\circ$, $A_{pv}=4$ m i $\beta=30^\circ$.

5.3.3. Poređenje predloženog modela sa segmentacijom i predloženog modela bez segmentacije

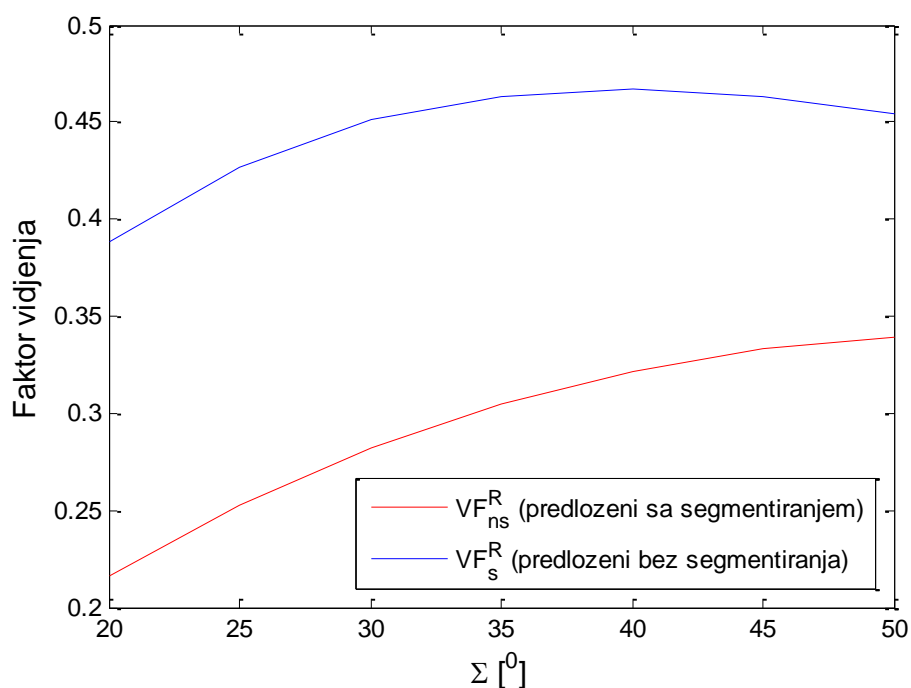
U ovoj sekciji su analizirane srednje vrijednosti faktora viđenja prema predloženoj metodologiji bez i sa segmentiranjem. Cilj ove analize je da pokaže da li je za praktične proračune optimizacije geometrije i procjene godišnje proizvodnje bFN elektrane neophodno vršiti segmentiranje površina između FN redova i površine FN panela ili se može koristiti pojednostavljeni model prikazan u odeljku 5.1.

Na slici 5.14 prikazano je poređenje srednje vrijednosti faktora viđenja sa prednje strane FN reda između predloženog modela bez segmentacije i predloženog modela sa segmentacijom. Može se zaključiti da segmentacija faktora viđenja sa prednje strane predloženog modela ne daje značajna odstupanja u odnosu na predloženi model bez segmentacije.



Slika 5.14. Faktor viđenja sa prednje strane u zavisnosti od Σ za predloženi model bez segmentiranja (VF_n^F) i sa segmentiranjem površina (VF_{ns}^F)

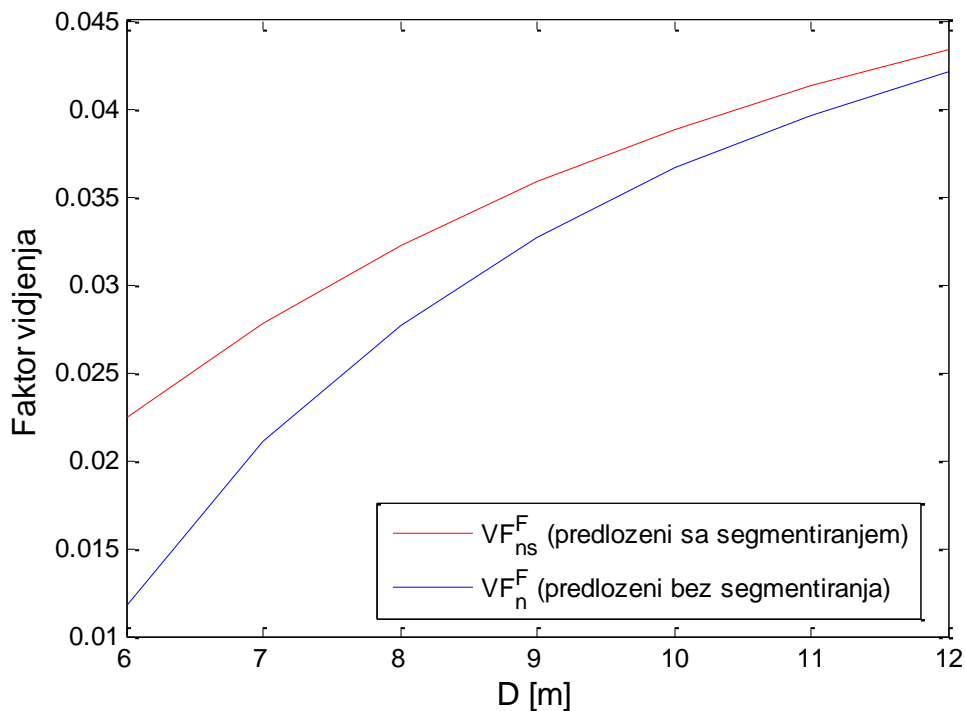
Na slici 5.15 prikazani su uporedni rezultati proračunatih vrijednosti faktora viđenja sa zadnje strane prema predloženom modelu bez segmentiranja površina i sa segmentiranjem površina.



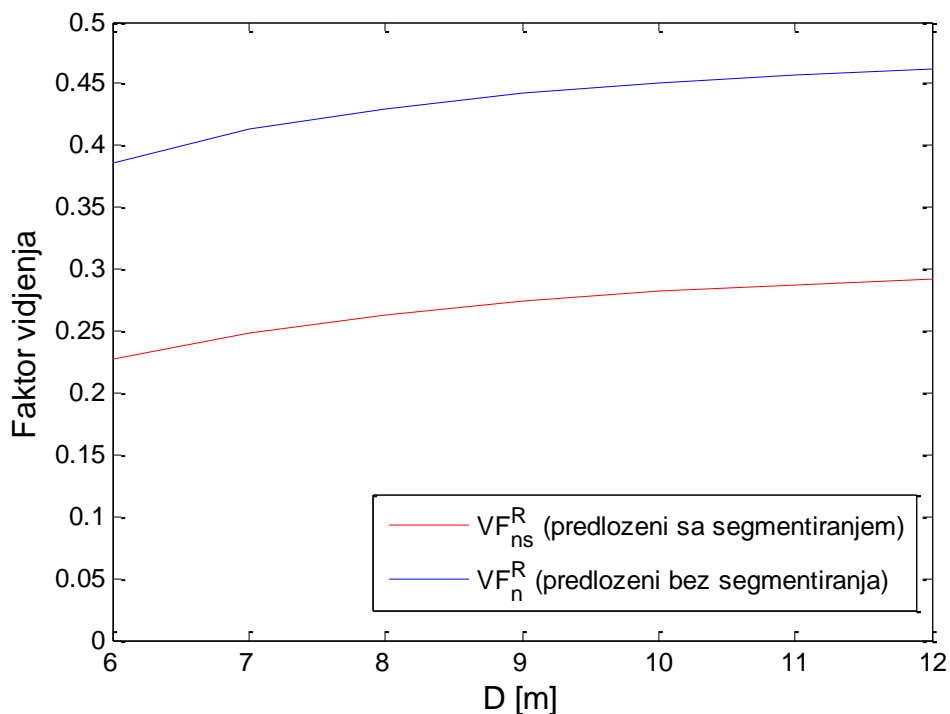
Slika 5.15. Faktori viđenja sa zadnje strane u zavisnosti od Σ za predloženi model bez segmentiranja (VF_s^R) i sa segmentiranjem površina (VF_{ns}^R)

Slika 5.15 vodi zaključku da postoji veće odstupanje u proračunu faktora viđenja sa zadnje strane u odnosu na prednju stranu FN panela.

Na slikama 5.16 i 5.17 prikazan je uticaj segmentiranja na proračun faktora viđenja za različite vrijednosti rastojanja između FN redova.



Slika 5.16. Faktori viđenja sa prednje strane u zavisnosti od D za predloženi model bez segmentiranja (VF_n^F) i sa segmentiranjem površina (VF_{ns}^F)



Slika 5.17. Faktori viđenja sa zadnje strane u zavisnosti od D za predloženi model bez segmentiranja (VF_n^R) i sa segmentiranjem površina (VF_{ns}^R)

Slika 5.16 pokazuje da je razlika između proračunatih vrijednosti faktora viđenja prema predloženom modelu sa segmentacijom i predloženog faktora viđenja bez segmentacije veća što je

manje rastojanje između FN redova. Sa slike 5.17 se uočava da se dobijaju manje vrijednosti predloženog modela faktora viđenja sa zadnje strane računatog sa segmentiranjem, nego u slučaju predloženog modela faktora viđenja bez segmentiranja.

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da se u slučaju faktora viđenja sa prednje strane dobijaju veće vrijednosti ukoliko se isti faktori viđenja računaju u nekoliko segmenata umjesto da se računaju sa modelom bez segmentacije. Za proračun faktora viđenja sa zadnje strane, važi obrnuto. U tom slučaju, proračun faktora viđenja sa segmentacijom daje manje vrijednosti nego da se isti faktori viđenja računaju bez segmentacije. Razlike u proračunatim vrijednostima faktori viđenja utiču na procjenu ukupne godišnje iradijacije koja pada na površine FN redova. U ovom odeljku izvršena su poređenja proračunate vrednosti godišnje proizvodnje bFN elektrane koja se dobija primjenom predloženog modela iradijacije bez segmentacije (5.15) i predloženog modela iradijacije sa segmentacijom (5.25). Procentualna razlika godišnje proizvodnje je računata prema formuli (5.32):

$$\Delta w_p (\%) = \frac{W_{p-s} - W_p}{W_{p-s}} \cdot 100. \quad (5.32)$$

U tabelama 5.5 i 5.6 prikazani su numerički rezultati za Δw_p , za različite vrijednosti D , Σ i ρ .

Tabela 5.5. Numerički rezultati za Δw_p za nekoliko vrijednosti Σ i D i za koeficijente refleksije površine između FN redova u iznosu od 0.2 i 0.4

	0.2				0.4			
D [m]	6	8	10	12	6	8	10	12
$\Sigma=5^\circ$	-0.51	-0.53	-0.53	-0.53	-1.15	-1.19	-1.19	-1.20
$\Sigma=15^\circ$	-1.08	-0.99	-0.98	-0.99	-2.27	-2.08	-2.05	-2.06
$\Sigma=25^\circ$	-1.38	-1.17	-1.07	-1.04	-2.85	-2.40	-2.19	-2.14
$\Sigma=35^\circ$	-1.57	-1.31	-1.09	-0.99	-3.21	-2.67	-2.22	-2.01
$\Sigma=45^\circ$	-2.06	-1.69	-1.29	-1.11	-3.33	-2.76	-2.15	-1.92

Tabela 5.6. Numerički rezultati za Δw_p za nekoliko vrijednosti Σ i D i za koeficijente refleksije površine između FN redova u iznosu od 0.6 i 0.8

ρ	0.6				0.8			
D [m]	6	8	10	12	6	8	10	12
$\Sigma=5^\circ$	-1.78	-1.84	-1.84	-1.85	-2.41	-2.48	-2.48	-2.50
$\Sigma=15^\circ$	-3.43	-3.13	-3.08	-3.09	-4.56	-4.14	-4.07	-4.09
$\Sigma=25^\circ$	-4.28	-3.57	-3.26	-3.18	-5.67	-4.70	-4.27	-4.16
$\Sigma=35^\circ$	-4.81	-3.96	-3.27	-2.96	-6.36	-5.19	-4.26	-3.85
$\Sigma=45^\circ$	-4.98	-4.08	-3.16	-2.81	-6.57	-5.33	-4.10	-3.63

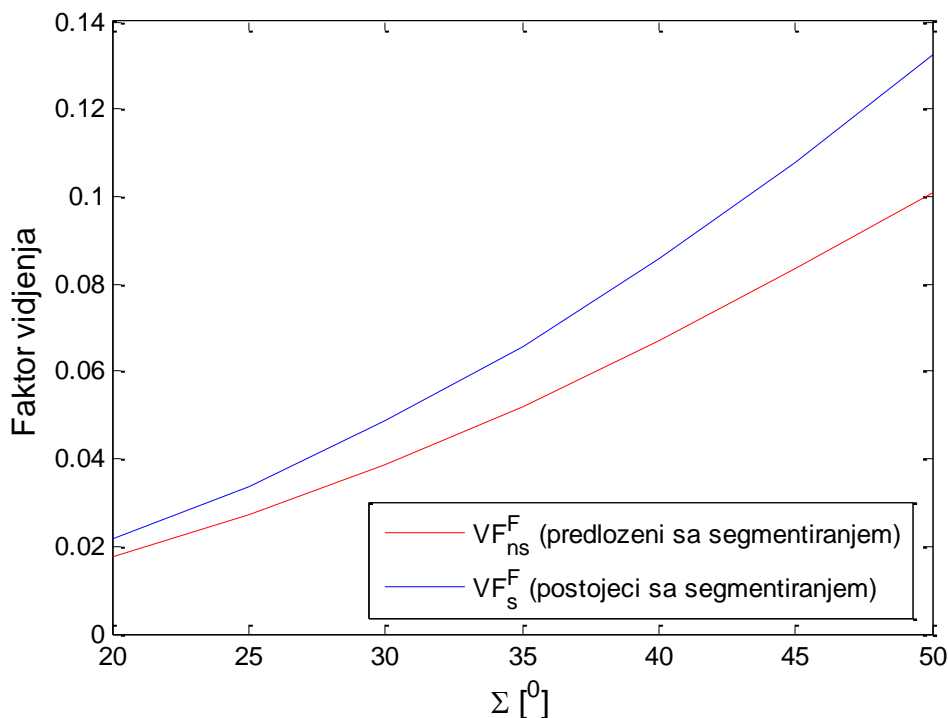
Prikazani rezultati u tabelama 5.5 i 5.6 ukazuju da se nešto veće vrijednosti iradijacije dobijaju sa modelom bez segmentacije. Razlika između predloženih modela sa i bez segmentacije raste sa porastom koeficijenta refleksije. Najveća razlika iznosi 6.57% i dobija se u slučaju da je koeficijent refleksije površine između FN redova 0.8, nagibni ugao FN redova 45° i rastojanje između FN redova 6 m. Ipak, važno je istaći da pri manjim vrijednostima koeficijenta refleksije površine između PV redova, odstupanje predloženog modela iradijacije je u prihvatljivim granicama. Na primjer, za koeficijent refleksije površine između FN redova od 0.2 odstupanje za analizirane podatke, samo u jednom scenariju prelazi 2%. Kao zaključak ove analize, može se konstatovati da je primjena predloženog modela bez segmentacije praktično prihvatljiva ako ne postoje reflektori na površinama između FN panela. Na kraju, važno je istaći, da su numerički proračuni iradijacije

značajno zahtjevniji u slučaju modela kod kojih se vrši segmentacija, pa je i vrijeme izvršavanja računarskog programa značajno duže u odnosu na pojednostavljeni model bez segmentiranja površina.

5.3.4. Poređenje predloženog modela iradijacije sa segmentacijom i postojećeg modela sa segmentacijom

U ovoj sekciji su izvršeni proračuni faktora viđenja prema predloženom modelu (5.15) sa segmentiranjem i postojećem modelu sa segmentiranjem (5.1). Na slici 5.18 prikazani su uporedni rezultati za srednje vrijednosti faktori viđenja sa prednje strane predloženog modela sa segmentacijom i postojećeg modela sa segmentacijom za različite nagibne uglove FN redova.

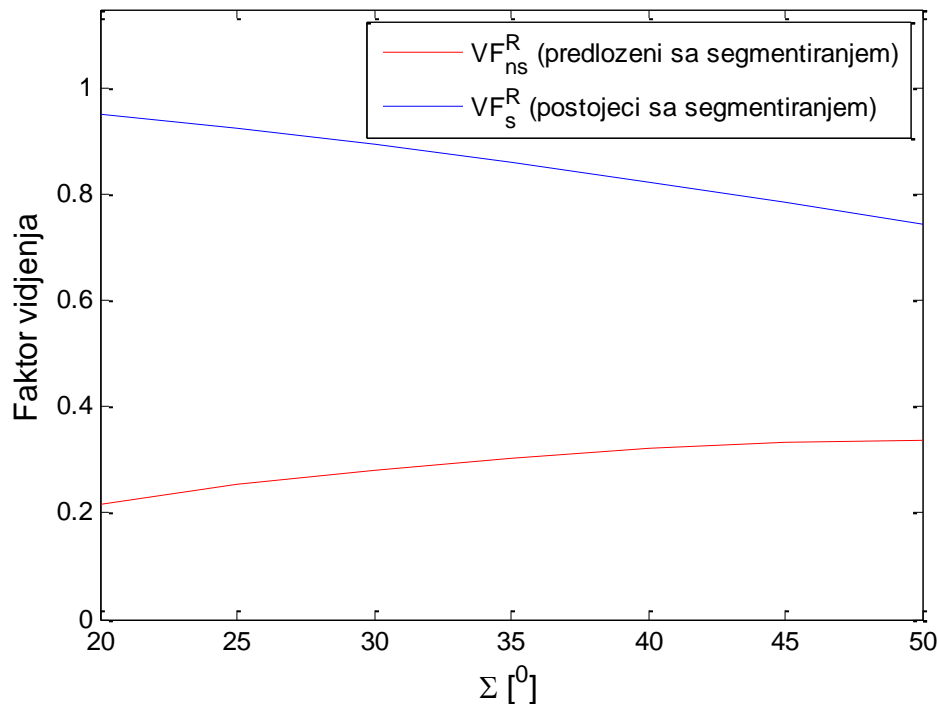
Proračunata vrijednost faktora viđenja prema predloženoj metodologiji je u izvesnoj mjeri manja od faktora viđenja računatog prema postojećem modelu, pri čemu je ta razlika veća što je nagibni ugao FN redova veći. Sličan zaključak je dobijen i u slučaju poređenja sa modelom bez segmentiranja, slika 5.7.



Slika 5.18. Faktori viđenja sa prednje strane u zavisnosti od Σ za predloženi model sa segmentiranjem (VF_{ns}^F) i postojeći model sa segmentiranjem (VF_s^F)

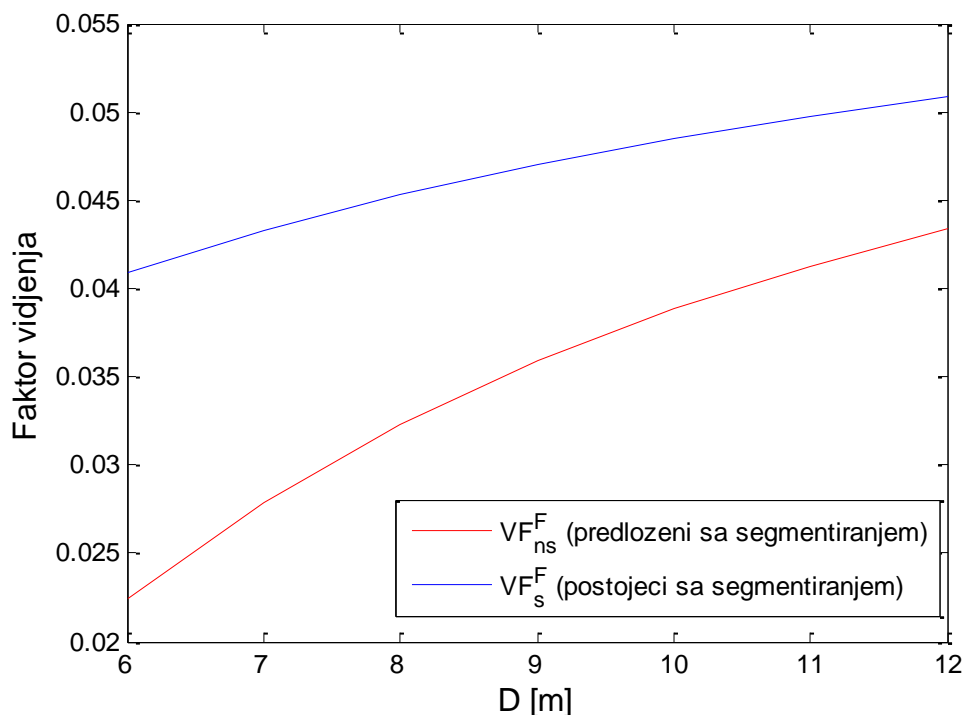
Na slici 5.19 prikazani su uporedni rezultati za srednje vrijednosti faktori viđenja sa zadnje strane računate prema predloženom modelu sa segmentacijom i postojećem modelu sa segmentacijom za različite nagibne uglove FN redova. Razlika u proračunu faktora viđenja sa zadnje strane FN reda je značajna, naročito u slučaju manjih nagibnih uglova FN redova, što je takođe potvrđeno i kroz raniju uporednu analizu modela bez segmentacije, slika 5.8.

Slike 5.20 i 5.21 respektivno prikazuju zavisnosti faktora viđenja sa prednje i zadnje strane bFN redova od rastojanja između FN redova za slučaj proračuna prema predloženom i postojećem modelu faktora viđenja sa segmentacijom.

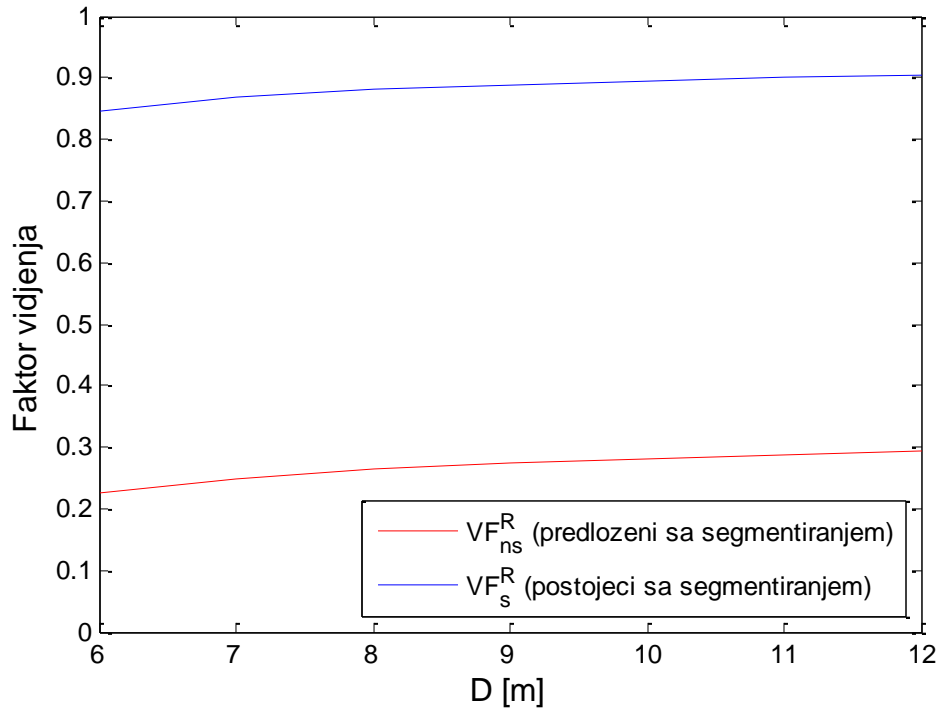


Slika 5.19. Faktori viđenja sa zadnje strane u zavisnosti od Σ za predloženi model sa segmentiranjem (VF_{ns}^R) i postojeći model sa segmentiranjem (VF_s^R)

Zaključci u pogledu predloženog i postojećeg modela za proračun faktora viđenja i u slučaju primjene segmentiranja površina su slični ranije utvrđenim zaključcima pri poređenju modela bez segmentiranja.



Slika 5.20. Faktori viđenja sa prednje strane u zavisnosti od D za predloženi model sa segmentiranjem (VF_{ns}^F) i postojeći model sa segmentiranjem (VF_s^F)



Slika 5.21. Faktori viđenja sa zadnje strane u zavisnosti od D za predloženi model sa segmentiranjem (VF_{ns}^R) i postojeći model sa segmentiranjem (VF_s^R)

Bitno je istaći da sprovedene analize pokazuju da se primjenom postojećih metodologija proračuna faktora viđenja dobijaju veće vrednosti faktora viđenja od onih koji daje proračun predložen u ovoj disertaciji. To za posledicu ima da je i proračunata očekivana godišnja proizvodnja bFN elektrane u izvjesnoj mjeri veća od one koja bi se dobila prema modelu iradijacije predloženom u ovoj disertaciji. Navedno potvrđuje i poređenje očekivane godišnje proizvodnje bFN elektrane zasnovano na predloženom modelu iradijacije sa segmentacijom (W_{p_s}), jednačina (5.25), i na postojećem modelu iradijacije sa segmentacijom (W_{e_s}), jednačina (5.26). Kvantitativno poređenje je izvršeno prema procentualnom odstupanju, računatoj prema formuli (5.33).

$$\Delta W_s (\%) = \frac{W_{e_s} - W_{p_s}}{W_{e_s}} \cdot 100. \quad (5.33)$$

Rezultati poređenja proizvodnje bFN elektrane na analiziranoj mikrolokaciji za različite vrijednosti D , Σ i ρ , zasnovani na postojećem modelu sa segmentacijom i predloženom modelu sa segmentacijom su prikazani u tabelama 5.7 i 5.8.

Tabela 5.7. Numerički rezultati za $\Delta W_s (\%)$ za nekoliko vrijednosti Σ i D i za koeficijente refleksije površine između FN redova u iznosu od 0.2 i 0.4

ρ	0.2				0.4			
D [m]	6	8	10	12	6	8	10	12
$\Sigma=5^\circ$	6.36	6.48	6.51	6.53	11.85	12.06	12.11	12.14
$\Sigma=15^\circ$	3.88	4.97	5.17	5.20	7.36	9.30	9.63	9.67
$\Sigma=25^\circ$	2.48	3.65	4.03	4.14	4.76	6.87	7.53	7.72
$\Sigma=35^\circ$	1.77	2.67	3.12	3.30	3.41	5.04	5.84	6.15
$\Sigma=45^\circ$	1.45	1.46	2.49	2.63	2.81	3.97	4.66	4.89

Tabela 5.8. Numerički rezultati za Δw_s (%) za nekoliko vrijednosti Σ i D i za koeficijente refleksije podloge između FN redova u iznosu od 0.6 i 0.8

ρ	0.6				0.8			
D [m]	6	8	10	12	6	8	10	12
$\Sigma=5^\circ$	16.63	16.91	16.97	17.00	20.83	21.15	21.22	21.26
$\Sigma=15^\circ$	10.49	13.08	13.51	13.56	13.32	16.42	16.92	16.97
$\Sigma=25^\circ$	6.84	9.73	10.59	10.82	8.77	12.27	13.54	13.54
$\Sigma=35^\circ$	4.93	7.17	8.22	8.62	6.35	9.08	10.33	10.78
$\Sigma=45^\circ$	4.06	5.65	6.55	6.85	5.22	7.15	8.22	8.55

Na osnovu rezultata prikazanih u tabelama 5.7 i 5.8, može se donijeti sličan zaključak kao i za razmatrane modele iradijacije bez segmentacije. Generalno, postojeći modeli iradijacije za velike bFN elektrane daju u izvjesnoj mjeri veću iradijaciju od one koja je proračunata prema predloženom modelu, što za posledicu ima da očekivana godišnja proizvodnja bFN elektrane prema predloženom modelu je u izvjesnoj mjeri konzervativnija u odnosu na proračune bazirane na postojećem modelu iradijacije. Te razlike mogu iznositi i preko 20% kod bFN elektrana sa jakim prisustvom reflektovane komponente svjetlosti.

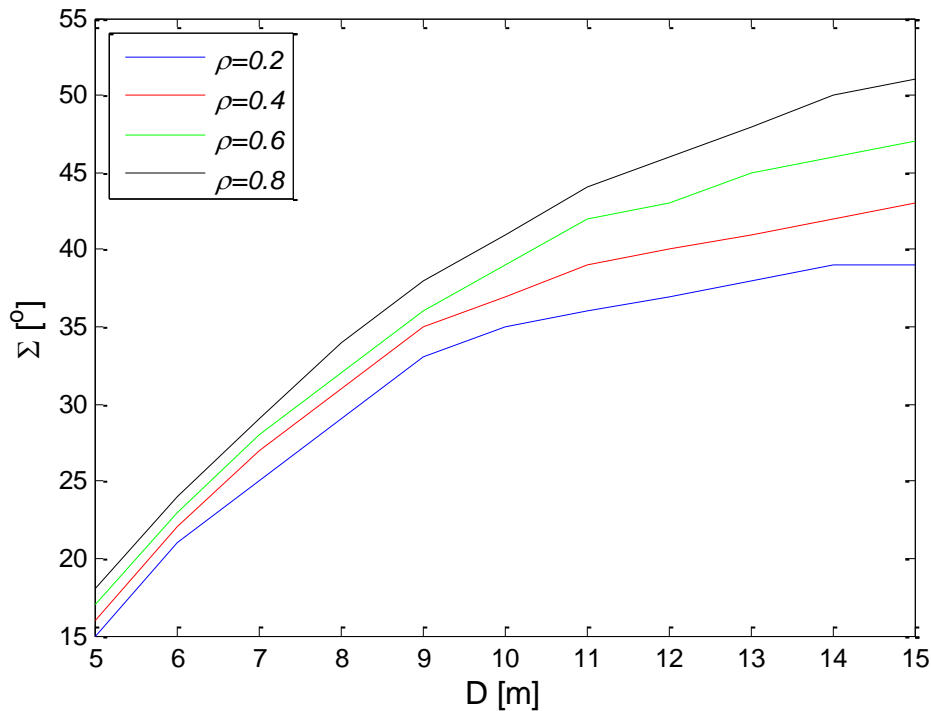
5.4. Komparativna tehno-ekonomska analiza bFN i mFN elektrane

U ovom potpoglavlju su prikazane tehničke karakteristike bFN elektrane, a zatim je dato uporedno poređenje bFN i mFN elektrana kroz tehno-ekonomske parametre.

5.4.1. Karakteristike proizvodnje bFN elektrane

U ovoj sekciji prikazane su karakteristike proizvodnje FN elektrana u zavisnosti od nagibnog ugla FN redova, rastojanja između FN redova i koeficijenta refleksije površine između FN redova. U proračunima je korišćen razvijen model iradijacije bez segmentacije. Na slici 5.22 prikazane su vrijednosti optimalnih nagibnih uglova FN redova za različite vrijednosti rastojanja između FN redova. Optimalni nagibni uglovi FN redova su određeni prema kriterijumu maksimalne godišnje proizvodnje FN elektrane.

Prikazani rezultati ukazuju da optimalni nagibni ugao FN redova raste kako raste koeficijent refleksije površine između FN redova i rastojanje između FN redova. Veći optimalni nagibni ugao FN redova znači da doprinos reflektovanog zračenja sa prednje strane FN redova i difuzionog zračenja sa zadnje strane FN redova više doprinosi proizvodnji energije nego reflektovano zračenje sa zadnje strane FN redova i difuziono zračenje sa prednje strane FN redova. Naime, imajući u vidu jednačine 5.9-5.12 reflektovano zračenje koje pada na prednju stranu FN redova se povećava sa porastom nagibnog ugla FN reda i povećanjem površine reflektujuće podloge, dok se reflektovano zračenje koje pada na zadnju stranu FN redova smanjuje. Sa druge strane, za difuziono zračenje kojeg određuju jednačine 5.5-5.6, važi obrnuto.



Slika 5.22. Optimalni nagibni uglovi FN redova za različita rastojanja između FN redova i koeficijenta refleksije podloge između FN redova

U cilju dodatne potvrde datih objašnjenja, u tabeli 5.9 su prikazani doprinosi pojedinih komponenti u ukupnoj proizvodnji bFN elektrane za dva slučaja. Naime, razmatrana je bFN elektrana sa reflektujućom podlogom opisanom sa koeficijentom refleksije od 0.6. U tabeli 5.9 su dati procentualni godišnji doprinosi pojedinih komponenti sunčevog zračenja za dvije vrijednosti rastojanja između FN redova, pri čemu su za nagibne uglove FN redova usvojene optimalne vrijednosti.

Tabela 5.9. Učešće pojedinih komponenti sunčevog zračenja u ukupnoj proizvodnji bFN elektrane

	Direktna [%]	Difuziona prednja [%]	Difuziona zadnja [%]	Reflektovana prednja [%]	Reflektovana zadnja [%]
Scenario 1 ($D=8$ m; $\Sigma=31^\circ$)	58.50	29.19	1.61	1.24	9.44
Scenario 2 ($D=12$ m; $\Sigma=45^\circ$)	56.24	26.04	3.12	3.41	11.17

Rezultati prikazani u tabeli 5.9 potvrđuju prethodno dato objašnjenje za doprinos pojedinih komponenti sunčevog zračenja. Ovdje treba naglasiti da se povećanjem rastojanja između FN redova, uz povećanje vrijednosti optimalnog nagibnog ugla FN redova, smanjuje u izvjesnoj mjeri doprinos direktne komponente sunčevog zračenja.

Imajući u vidu da insolacija koja pada na FN panel zavisi od rastojanja između FN redova i nagibnog ugla FN redova, u tabelama 5.10 i 5.11 prikazane su insolacije za nekoliko rastojanja između FN redova. Za svako rastojanje između FN redova usvojene vrijednosti za nagibne uglove su one pri kojima se dobija maksimalna proizvodnja bFN elektrane. Rezultati za insolaciju su proračunati za četiri različita koeficijenta refleksije podloge.

Tabela 5.10. Prosječna dnevna insolacija koja pada na prednju i zadnju stranu bFN panela za koeficijent refleksije površine između FN redova u iznosu od $\rho=0.2$ i $\rho=0.4$

D [m]	$\rho=0.2$			$\rho=0.4$		
	Σ [°]	G^F [kWh/m ² /dan]	G^R [kWh/m ² /dan]	Σ [°]	G^F [kWh/m ² /dan]	G^R [kWh/m ² /dan]
5	15	3.93	0.08	16	3.93	0.16
6	21	3.94	0.13	22	3.94	0.22
7	25	4.09	0.16	27	4.09	0.31
8	29	4.13	0.20	31	4.13	0.36
9	33	4.14	0.24	35	4.15	0.41
10	35	4.15	0.27	37	4.16	0.45
11	36	4.16	0.28	39	4.17	0.48
12	37	4.17	0.30	40	4.18	0.50
13	38	4.17	0.31	41	4.18	0.52
14	39	4.18	0.32	43	4.19	0.55
15	39	4.18	0.33	43	4.20	0.55

Tabela 5.11. Prosječna dnevna insolacija koja pada na prednju i zadnju stranu bFN panela za koeficijent refleksije površine između FN redova u iznosu od $\rho=0.6$ i $\rho=0.8$

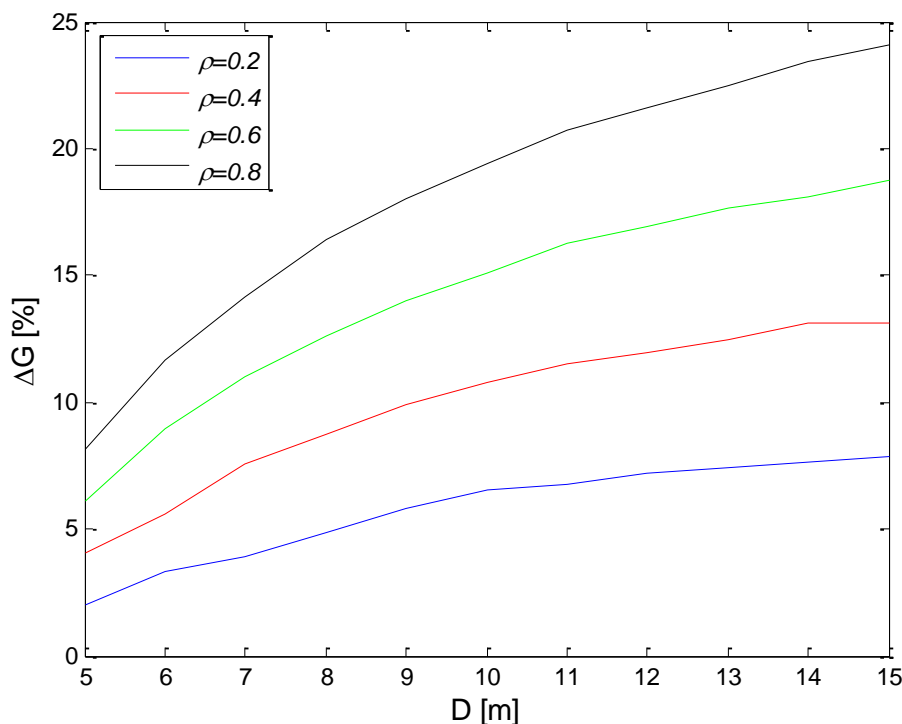
D [m]	$\rho=0.6$			$\rho=0.8$		
	Σ [°]	G^F [kWh/m ² /dan]	G^R [kWh/m ² /dan]	Σ [°]	G^F [kWh/m ² /dan]	G^R [kWh/m ² /dan]
5	17	3.93	0.24	18	3.93	0.32
6	23	4.02	0.36	24	4.02	0.47
7	28	4.10	0.45	29	4.10	0.58
8	32	4.13	0.52	34	4.14	0.68
9	36	4.15	0.58	38	4.16	0.75
10	39	4.17	0.63	41	4.18	0.81
11	42	4.18	0.68	44	4.20	0.87
12	43	4.19	0.71	46	4.21	0.91
13	45	4.20	0.74	48	4.22	0.95
14	46	4.20	0.76	50	4.23	0.99
15	47	4.21	0.79	51	4.24	1.02

Na slici 5.23 prikazan je procentualni odnos ukupne insolacije koje dopijeva na zadnju stranu FN panela i ukupne insolacije koja pada na prednju stranu FN panela, a koji je računat prema sljedećoj formuli:

$$\Delta G(\%) = \frac{G^R}{G^F} \cdot 100, \quad (5.34)$$

gdje je G^R insolacija koja pada na zadnju stranu FN panela, a G^F insolacija koja pada na prednju stranu FN panela.

Slika 5.23, kao i rezultati u tabelama 5.10 i 5.11 upućuju na zaključak da sa porastom koeficijenta refleksije podloge raste i procentualni udio insolacije koja pada na zadnju stranu FN reda, pri čemu je taj udio veći pri većim rastojanjima između FN redova i može iznositi i preko 15% u slučaju podloga sa jakom refleksijom.



Slika 5.23. Odnos insolacije koja pada na zadnju stranu i insolacije koja pada na prednju stranu FN redova postavljenih pod optimalnim fiksnim nagibnim uglom, za različite vrijednosti D i ρ

S obzirom da do sada dobijeni rezultati upućuju da koeficijent refleksije značajno utiče na proizvodnju bFN elektrane, u ovome radu je izračunata ukupna sunčeva energija koja dopijeva na horizontalnu površinu koju zauzima FN elektrana (5.35) i ukupna sunčeva energija koja pada na prednju (5.36) i zadnju stranu FN redova (5.37).

$$W^H = G^H \cdot D \cdot L_{pv} \cdot n_{pv}, \quad (5.35)$$

$$W^F = G^F \cdot A_{pv} \cdot L_{pv} \cdot n_{pv}, \quad (5.36)$$

$$W^R = G^R \cdot A_{pv} \cdot L_{pv} \cdot n_{pv}. \quad (5.37)$$

U formulama (5.35 - 5.37) W^H , W^F i W^R su sunčeva energija koja pada na horizontalnu površinu FN elektrane, prednju stranu FN panela i zadnju stranu FN panela. Sagledavajući rezultate dobijene navedenim formulama, može se uočiti koliki procentualni dio od globalne godišnje sunčeve iradijacije koju zahvata prostor na kojem je izgrađena bFN elektrana dopijeva na prednju i zadnju stranu FN redova.

Rezultati proračuna su prikazani u tabelama 5.12 i 5.13 za iste vrijednosti rastojanja između FN redova, nagibnih uglova FN redova i koeficijenta refleksije površine između FN redova kao što su usvojeni u tabelama 5.10 i 5.11.

Tabela 5.12. Prosječna dnevna sunčeva energija koja pada na horizontalnu površinu FN elektrane, prednju i zadnju stranu FN redova za koeficijent refleksije $\rho=0.2$ i $\rho=0.4$

D [m]	W^H [MWh/dan]	$\rho=0.2$			$\rho=0.4$		
		Σ [°]	W^F [MWh/dan]	W^R [MWh/dan]	Σ [°]	W^F [MWh/dan]	W^R [MWh/dan]
5	79.58	15	62.88	1.28	16	62.88	2.56
6	95.50	21	63.04	2.08	22	63.04	3.52
7	111.42	25	65.44	2.56	27	65.44	4.96
8	127.34	29	66.08	3.20	31	66.08	5.76
9	143.25	33	66.24	3.84	35	66.4	6.56
10	159.17	35	66.40	4.32	37	66.56	7.20
11	175.09	36	66.56	4.48	39	66.72	7.68
12	191.01	37	66.72	4.80	40	66.88	8.00
13	206.92	38	66.72	4.96	41	66.88	8.32
14	222.84	39	66.88	5.12	43	67.04	8.80
15	238.76	39	66.88	5.28	43	67.20	8.80

Tabela 5.13. Prosječna dnevna sunčeva energija koja pada na horizontalnu površinu FN elektrane, prednju i zadnju stranu FN redova za koeficijent refleksije $\rho=0.6$ i $\rho=0.8$

D [m]	W^H [MWh/dan]	$\rho=0.6$			$\rho=0.8$		
		Σ [°]	W^F [MWh/dan]	W^R [MWh/dan]	Σ [°]	W^F [MWh/dan]	W^R [MWh/dan]
5	79.58	17	62.88	3.87	18	62.88	5.15
6	95.50	23	64.32	5.80	24	64.32	7.63
7	111.42	28	65.60	7.23	29	65.60	9.42
8	127.34	32	66.08	8.35	34	66.24	10.92
9	143.25	36	66.40	9.35	38	66.56	12.12
10	159.17	39	66.72	10.16	41	66.88	13.08
11	175.09	42	66.88	10.91	44	67.20	13.96
12	191.01	43	67.04	11.36	46	67.36	14.65
13	206.92	45	67.20	11.91	48	67.52	15.29
14	222.84	46	67.20	12.28	50	67.68	15.88
15	238.76	47	67.36	12.64	51	67.84	16.31

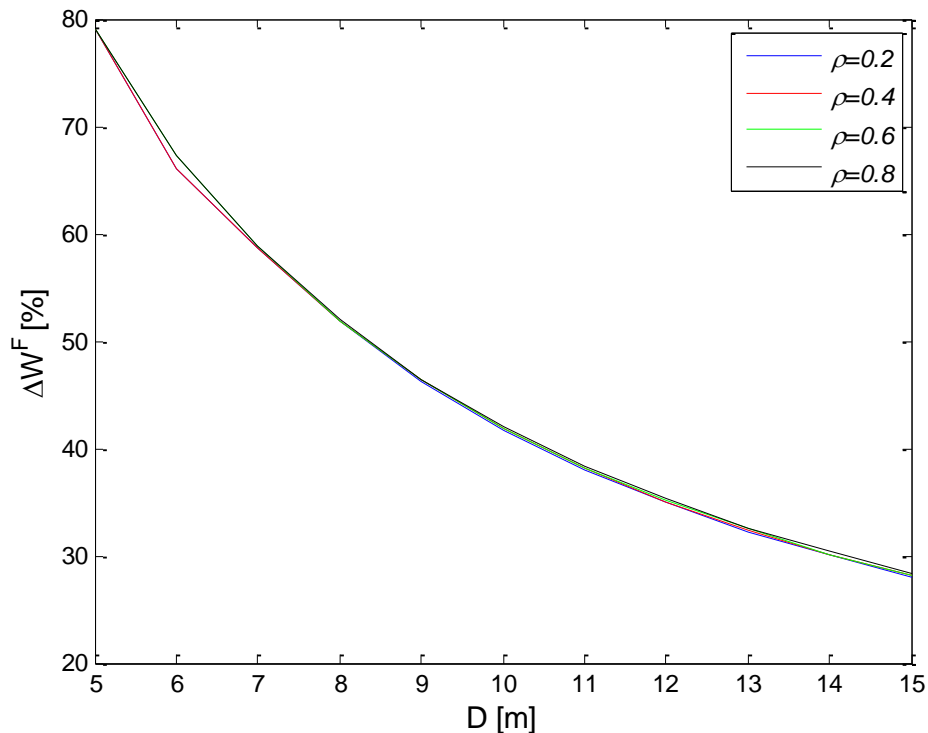
Sa porastom rastojanja između FN redova, povećava se i sunčeva energija koja pada i na prednju i zadnju stranu FN redova. Pri čemu je značajno veći porast sunčeve energije koja pada na zadnju stranu FN panela, što je ilustrovano grafičkima na slikama 5.24, 5.25 i 5.26 a na kojima su prikazani sljedeći odnosi:

$$\Delta W^F (\%) = \frac{W^F}{W^H} \cdot 100, \quad (5.38)$$

$$\Delta W^R (\%) = \frac{W^R}{W^H} \cdot 100. \quad (5.39)$$

$$\Delta W^R (\%) = \frac{W^F + W^R}{W^H} \cdot 100 \quad (5.40)$$

gdje ΔW^F određuje koji dio sunčeve energije koji dopijeva na horizontalnu površinu FN elektrane pada na prednju stranu FN panela, a ΔW^R određuje koji dio sunčeve energije koji dopijeva na horizontalnu površinu FN elektrane pada na zadnju stranu FN panela.

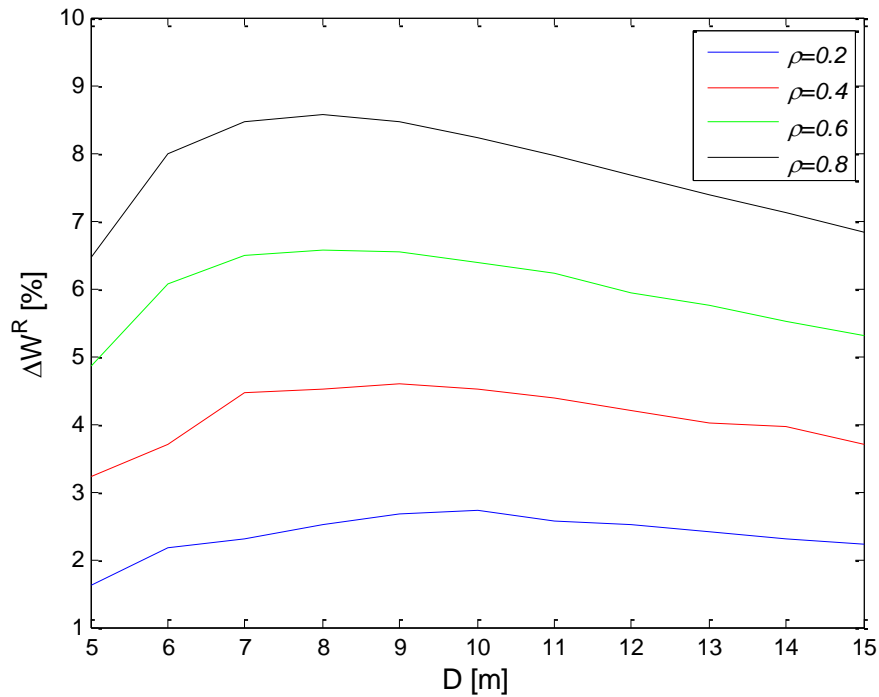


Slika 5.24. Odnos sunčeve energije koja dopijeva na prednju stranu FN redova i ukupne sunčeve energije koja pada na horizontalnu površinu bFN elektrane, za različite vrijednosti D i ρ

Sa slike 5.24 je uočljivo da odnos sunčeve energije koja pada na prednju stranu FN redova i sunčeve energije koja pada na horizontalnu površinu skoro da ne zavisi od koeficijenta refleksije površine između FN redova, te se zaključuje da kod mFN elektrana refleksija podloge na kojoj je izgrađena elektrana nema bitnih efekata na proizvodnju. Takođe, jasno je uočljivo da se iskorišćenje globalne insolacije koja pada na prostor elektrane smanjuje sa povećanjem rastojanja između FN redova, što je posledica pojave nezasjenčenih površina između redova.

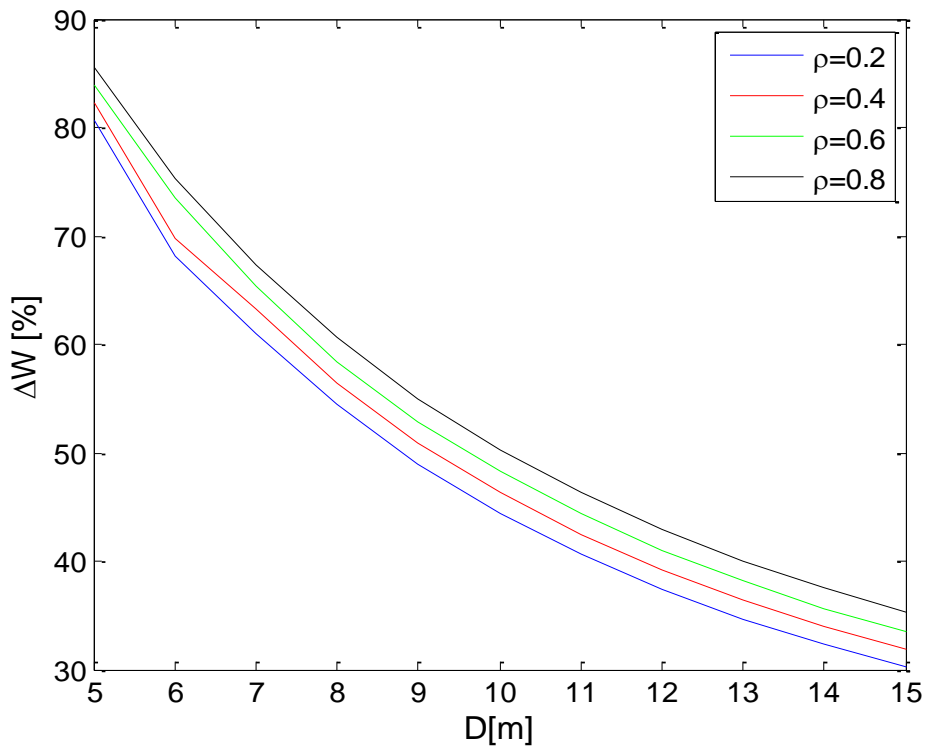
Slika 5.25 ukazuje da je sunčeva energija koja dopijeva na zadnju stranu FN redova izrazito zavisna od koeficijenta refleksije podloge. Za razliku od slike 5.24, sa slike 5.25 se može uočiti da odnos sunčeve energije koja pada na zadnju stranu FN elektrane i sunčeve energije na horizontalnu površinu nije monotono opadajuća funkcija na posmatranom intervalu. Odnos definisan relacijom 5.40 pokazuje koliko iznosi ukupno iskorišćenje horizontalne iradijacije koja pada na FN panele.

Slika 5.26 pokazuje da je ovaj odnos značajno veći ukoliko je rastojanje između redova manje. Takođe, slika 5.26 potvrđuje da što je veći koeficijent refleksije podloge to je iskorišćenje horizontalne iradijacije veće.

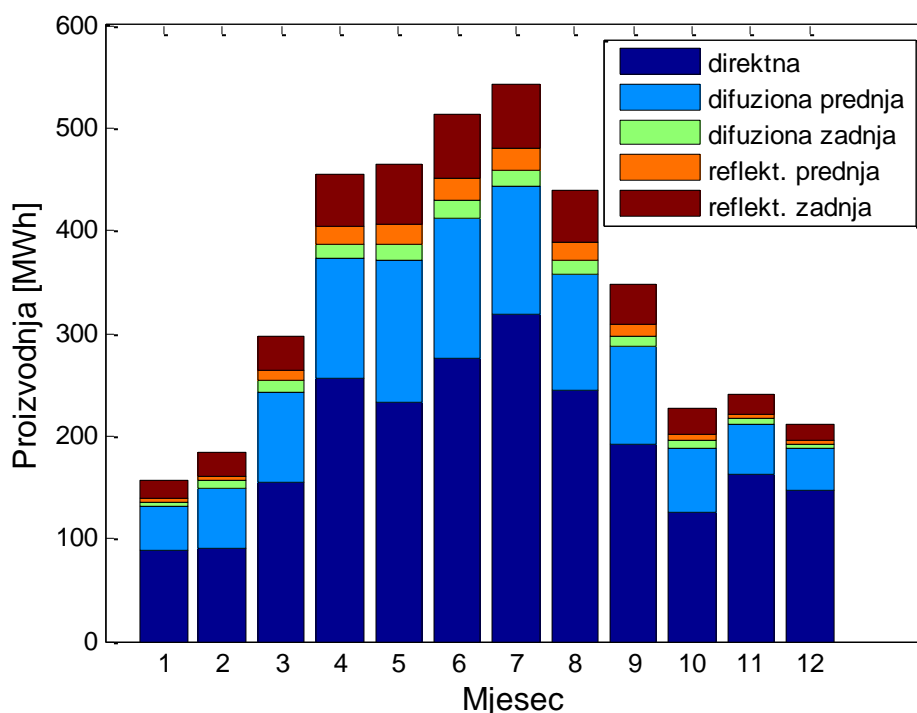


Slika 5.25. Odnos godišnje sunčeve energije koja dopijeva na zadnju stranu FN redova i sunčeve energije koja pada na horizontalnu površinu bFN elektrane, za različite vrijednosti D i ρ

Raspodjela proizvodnje bFN elektrane po mjesecima, očekivano ima sličan oblik kao i kod tipične mFN elektrane. Na slici 5.27 je prikazana je proračunata proizvodnja po mjesecima za test bFN elektranu za sljedeće parametre bFN elektrane: $P=2.4$ MWp, $D=12$ m, $\Sigma=42^\circ$ i $\rho=0.6$.



Slika 5.26. Odnos godišnje sunčeve energije koja dopijeva na prednju i zadnju stranu FN redova i sunčeve energije koja pada na horizontalnu površinu bFN elektrane, za različite vrijednosti D i ρ



Slika 5.27. Doprinos pojedinih komponenti insolacije na proizvodnju električne energije bFN elektrana za svaki mjesec

Sa slike 5.27 može se uočiti da pored direktne i difuzione iradijacije u ukupnoj proizvodnji značajno doprinosi i reflektovana iradijacija koja se od podloge odbija na zadnju stranu FN panela. Reflektovana iradijacija koja se odbija na zadnju stranu FN redova više doprinosi u odnosu na zbir reflektovane iradijacije koja se odbija od podloge ka prednjoj strani FN redova i difuzione iradijacije koja pada na zadnju stranu FN redova. U tabeli 5.14 su dati mjeseci u kojima se dobija najveći doprinos pojedinih komponenti sunčevog zračenja.

Tabela 5.14. Karakteristike bFN elektrane

	Direktna	Difuziona prednja	Difuziona zadnja	Reflektovana prednja	Reflektovana zadnja
Mjesec sa najvećom proizvodnjom (vrijednost energije)	Jul (317.88 MWh)	Maj (137.59 MWh)	Maj (16.51 MWh)	Jul (22.50 MWh)	Jun (63.18 MWh)
Mjesec sa najvećim doprinosom pojedinih komponenti iradijacije (procenat u ukupnoj mjesečnoj proizvodnji)	Decembar (70.55%)	Februar (32.18%)	Februar (3.86%)	Jul (4.17 %)	Maj (12.66%)

5.4.2. Poređenje tehnoloških parametara bFN i mFN elektrane

U cilju poređenja proizvodnje bFN i mFN elektrane, potrebno je prvo definisati odgovarajući model za proračun proizvodnje FN elektrane sa mFN panelima. Uvažavajući slične pretpostavke uvedene za bFN elektrane, odnosno činjenicu da površina između FN redova nije ozračena 'punom difuzionom' iradijacijom, model iradijacije za mFN elektrane se može formalno matematički predstaviti sljedećom jednačinom:

$$I^m = (1 - \varepsilon) \cdot I_b + F_{dif}^f \cdot I_{dif}^f + \rho \cdot (F_{r-un}^f \cdot I_{r-un}^f + F_{r-s}^f \cdot I_{r-s}^r). \quad (5.41)$$

Poređenje FN elektrane sa bFN i mFN panelima je izvršeno kroz dvije kriterijumske funkcije. Razmatrane kriterijumske funkcije predstavljaju tipične interese vlasnika FN elektrana i one su formulisane na sljedeći način;

$$J_1 = \max\{W\}, \quad (5.42)$$

$$J_2 = \min\{LCOE\} = \frac{C_I + \sum_{n_t=1}^{20} \frac{C_M + C_L}{(1+i)^{n_t}}}{\sum_{n_t=1}^{20} \frac{W \cdot \left(1 - \frac{n_t \cdot d}{100}\right)}{(1+i)^{n_t}}}, \quad (5.43)$$

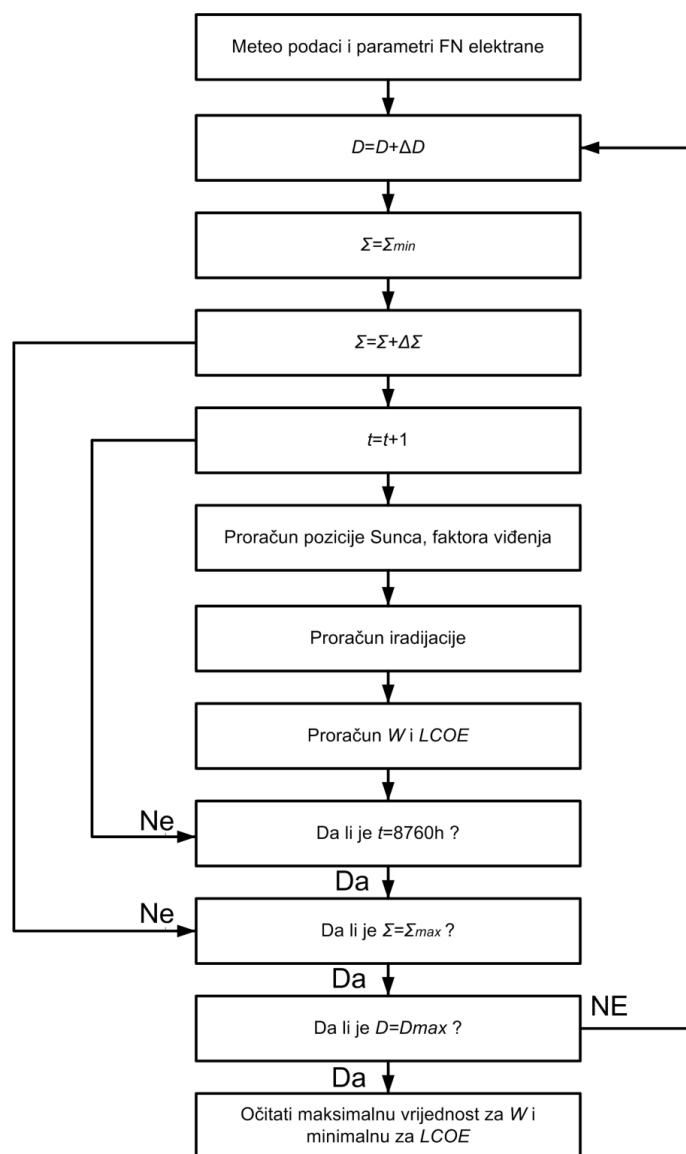
gdje je t analizirana godina eksploatacionog vijeka elektrane, n_t je životni vijek elektrane, i je interesna stopa, C_I ukupna novčana investicija u FN module, invertore i ostalu opremu, C_M su troškovi održavanja FN panela i invertora, C_L su troškovi zakupa zemljišta na kojem je postavljena elektrana, d je godišnji pad efikasnost FN panela usljed starenja. U radu je pretpostavljeno da investicioni troškovi za mFN elektranu iznose 1.00 Milion€/MWp [73]. Troškovi investicije za bFN elektrane su usvojeni prema dostupnim podacima koji se odnose na lokacije bliske analiziranoj mikrolokaciji. Naime, u radu [73] na osnovu podataka za mFN i bFN panele u Njemačkoj, Španiji i Švajcarskoj, cijena bFN panela je veća 4.9% - 6.7% u odnosu na mFN panele. Takođe, pored većih investicionih troškova za FN panele, postoje i dodatni troškovi za inverter. Naime, zbog veće proizvodnje električne energije bFN elektrana u odnosu na mFN elektranu, potrebno je ugraditi inverter veće snage kod bFN elektrane koje su južno orijentisane. Imajući u vidu da inverter iznosi 10% - 15% ukupnih troškova investicije za FN elektranu, za usvojeno tipično povećanje snage invertora oko 20% [73] ukupni investicioni troškovi za bFN elektranu su procijenjeni da su 8% veću u odnosu na mFN elektranu. U tabeli 5.15 prikazane su ostale usvojene vrijednosti za proračun LCOE.

Tabela 5.15. Korišćene vrijednosti za proračun cijene proizvedene električne energije

C_I [Milion€/MWp]	1.08	d [%]	1
C_L [€/m ²]	0.4	i [%]	5
C_M [€/godina]	$0.04 \cdot C_I / n_t$	n_t [godina]	20

Optimizacioni zadatak predstavljen kriterijumskom funkcijom J_1 određuje vrijednosti upravljačkih promjenljivih sa ciljem maksimizacije godišnje proizvodnje, dok druga kriterijumska funkcija određuje vrijednosti upravljačkih promjenljivih sa ciljem minimizacije svedenih troškova proizvedene električne energije.

U disertaciji je, shodno rezultatima [73] usvojena pretpostavka da je optimalni azimutni ugao nula stepeni za obje razmatrane FN elektrane, dok nagibni ugao FN panela (Σ) i rastojanje između FN redova (D) predstavljaju upravljačke promjenljive za rješavanje postavljenih optimizacionih zadataka. Pronalaženje maksimalne vrijednosti za kriterijumsku funkciju J_1 , odnosno minimalne za kriterijumsku funkciju J_2 je određeno prostim algoritmom pretrage prikazanim na slici 5.28.



Slika 5.28. Algoritamski koraci za rešavanje optimizacionih zadataka J_1 i J_2

Ovdje je potrebno naglasiti da je, s obzirom na snagu FN modula i pretpostavljenu snagu FN elektrane, broj FN redova 20. Uzimajući u obzir raspoložive dimenzije elektrane, maksimalno rastojanje između FN redova iznosi 15 m. Optimalna vrijednost nagibnog ugla je ispitana u opsegu od 0° do 60° , a optimalna vrijednost za rastojanje između FN redova tražena je u opsegu od 5 m do 15 m.

Primjenjujući opisanu proceduru sa vrijednostima koraka od $\Delta\Sigma=1^\circ$ i $\Delta D=1$ m, u tabelama 5.16 i 5.17 su prikazani rezultati postavljenih optimizacionih zadataka za bFN elektranu, dok su tabelama 5.18 i 5.19 prikazani rezultati za mFN elektrane. U tabelama 5.16 – 5.19 su prikazane optimalne vrijednosti za upravljačke promjenljive (D i Σ), očekivanu godišnju proizvodnju, svedenu cijenu troškova proizvodnje i profit u toku životnog vijeka, koji je računat prema formuli:

$$Profit = \left(\sum_{t=1}^{n_t} W \cdot \left(1 - \frac{t \cdot d}{100} \right) \cdot C_e \right) - C_I + \sum_{t=1}^{n_t} \frac{C_M + C_L}{(1+i)^t}, \quad (5.44)$$

gdje je za cijenu otkupa električne energije (C_e) dobijene iz FN elektrane usvojena vrijednost od 60 €/MWh. Pretpostavljeno je da je elektrana snage 2.4 MWp i da se sastoji od 20 FN redova jednakih dimenzija.

Tabela 5.16. Rješenja optimizacionog zadatka J_1 za bFN elektranu

	Scenario 1 ($\rho=0.2$)	Scenario 2 ($\rho=0.4$)	Scenario 3 ($\rho=0.6$)	Scenario 4 ($\rho=0.8$)
Σ [°]	38	42	46	50
D [m]	15	15	15	15
W [MWh]	3765.14	3963.68	4171.84	4388.59
$LCOE$ [€/MWh]	52.50	49.87	47.38	45.04
$Profit$ [Milion€]	2.02	2.25	2.49	2.74

Tabela 5.17. Rješenja optimizacionog zadatka J_2 za bFN elektranu

	Scenario 1 ($\rho=0.2$)	Scenario 2 ($\rho=0.4$)	Scenario 3 ($\rho=0.6$)	Scenario 4 ($\rho=0.8$)
Σ [°]	32	36	42	47
D [m]	9	10	12	13
W [MWh]	3664.53	3849.56	4090.38	4320.25
$LCOE$ [€/MWh]	51.13	49.12	47.06	44.96
$Profit$ [Milion€]	2.03	2.219	2.45	2.70

Tabela 5.18. Rješenja optimizacionog zadatka J_1 za mFN elektranu

	Scenario 1 ($\rho=0.2$)	Scenario 2 ($\rho=0.4$)	Scenario 3 ($\rho=0.6$)	Scenario 4 ($\rho=0.8$)
Σ [°]	30	32	35	38
D [m]	15	15	15	15
W [MWh]	3533.15	3562.47	3596.52	3636.13
$LCOE$ [€/MWh]	52.34	51.91	51.42	50.86
$Profit$ [Milion€]	1.90	1.94	1.97	2.02

Tabela 5.19. Rješenja optimizacionog zadatka J_2 za mFN elektranu

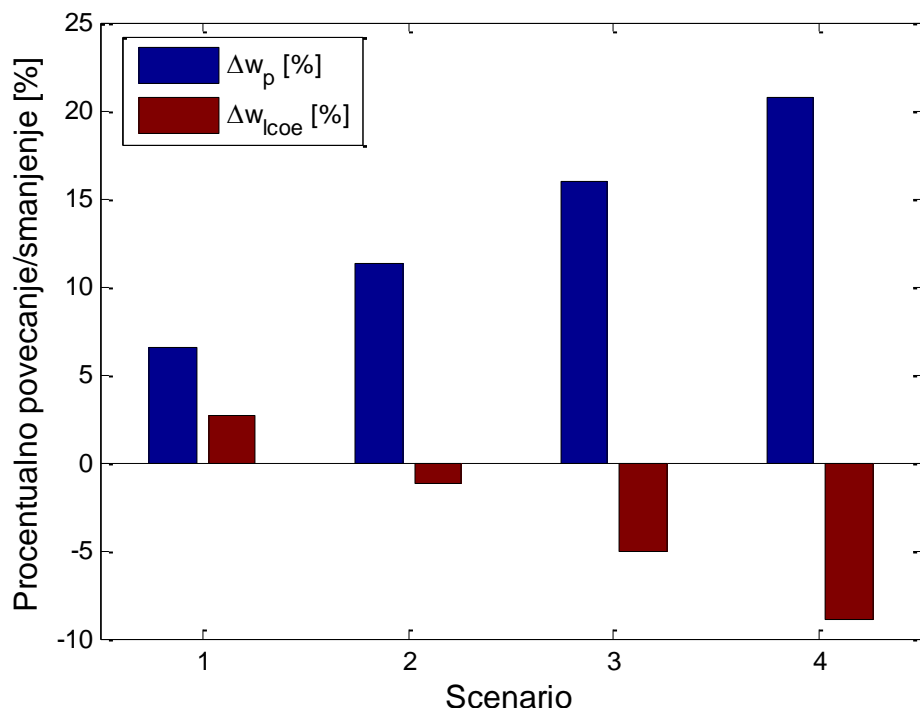
	Scenario 1 ($\rho=0.2$)	Scenario 2 ($\rho=0.4$)	Scenario 3 ($\rho=0.6$)	Scenario 4 ($\rho=0.8$)
Σ [°]	21	25	26	27
D [m]	7	8	8	8
W [MWh]	3435.93	3479.18	3489.65	3500.66
$LCOE$ [€/MWh]	49.82	49.70	49.54	49.39
$Profit$ [Milion€]	1.95	1.98	1.99	2.01

Na osnovu rezultata, prikazanim u tabelama 5.16 - 5.19, može se zaključiti da za razmatrane kriterijume važi da što je veći koeficijent refleksije, to je i veći optimalni nagibni ugao FN redova kako kod mFN tako i kod bFN elektrane. Takođe, vrijednosti nagibnog ugla FN redova kod bFN elektrane su veće u odnosu na mFN elektrane. S obzirom na to da se povećanjem rastojanja između FN redova povećava refleksiona površina a smanjuju gubici usljed samozasjenčenja, što doprinosi povećanju proizvodnje FN elektrane, za kriterijum J_1 rezultati su očekivani. Tačnije, kao što se vidi u tabelama 5.16 - 5.19, optimalne vrijednosti za rastojanje između bFN ili mFN redova je jednako maksimalnoj vrijednosti. Sa druge strane, optimalna vrijednost rastojanja, za zadatak J_2 , je uvijek manja od maksimalne moguće. Tačnije, optimalne vrijednosti rastojanja su veće, za isti Scenario, za bFN u odnosu na mFN elektranu. Takođe, može se primjetiti da što je veći koeficijent refleksije to je i veća vrijednost za rastojanje između FN redova. Navedeno se može objasniti da usljed povećanja koeficijenta refleksije i veličine refleksione površi se povećava i doprinos reflektovane komponente iradijacije. Za razmatrane kriterijume i tipove FN elektrana, za preostalu upravljačku promjenljivu Σ , važi da što je veći koeficijent refleksije podloge to je i veća njena vrijednost. Optimalne vrijednost za nagibni ugao FN redova za kriterijum J_2 , za isti Scenario, je veća kod bFN u odnosu na mFN elektranu zbog većeg doprinosa reflektovane komponente iradijacije na proizvodnju.

Poređenje bFN i mFN elektrane kroz proizvodnju i cijene proizvodnje električne energije, na osnovu tabela 5.16 – 5.19 je dato na slici 5.29. Za kriterijum J_1 izvršeno je poređenje prema proizvodnji, dok je za kriterijum J_2 poređenje izvršeno prema LCOE. Poređenje je izračunato prema procentualnom povećanju ili smanjenju koristeći sljedeće formule:

$$\Delta w_p^i (\%) = \frac{W_b^i - W_m^i}{W_m^i} \cdot 100, \quad (5.45)$$

$$\Delta w_{lcoe}^i (\%) = \frac{LCOE_b^i - LCOE_m^i}{LCOE_m^i} \cdot 100. \quad (5.46)$$



Slika 5.29. Poređenje bFN i mFN elektrane prema proizvedenoj energiji i LCOE

Rezultati ukazuju da se samo u slučaju Scenarija 1, rješenje optimizacionih zadataka J_1 i J_2 karakteriše da se ne dobija smanjenje LCOE i povećanje proizvodnje bFN u odnosu na mFN elektrane. Za ostale analizirane Scenarije dobija se da je elektrana sa bFN panelima, projektovana prema kriterijum J_1 ili J_2 , u odnosu na elektranu sa mFN panelima efikasnija u tehničkom i isplativija u ekonomskom smislu. Pored toga, jasno se primjećuje da što je koeficijent refleksije veći to je i veća efikasnost bFN u odnosu na mFN elektrane. Tako, na primjer, za analiziranu lokaciju dobija se da je, u slučaju Scenarija 4, procentualno povećanje proizvodnje bFN u odnosu na mFN elektranu za kriterijum J_1 iznosi 20.69%, dok procentualno smanjenje LCOE, za kriterijum J_2 iznosi 8.97%.

Imajući u vidu rezultate za Scenarije 3 i 4, gdje se dobija pored značajno veće proizvodnje i smanjenje LCOE, može se reći, sa sigurnošću da je bFN elektrana bolje rješenje u odnosu na mFN elektranu, bilo da je projektovana prema kriterijumu J_1 ili J_2 . Na primjer, ako uporedimo bFN i mFN elektranu projektovanu prema kriterijumu J_1 , za Scenario 1, uočava se sljedeće: iako je proizvodnja bFN elektrane veća za 6.55% u odnosu na mFN elektranu, LCOE za bFN u odnosu na mFN elektranu je veći za 2.69%. Shodno tome, ovdje je analiziran i krajnji interes investitora kroz profit FN elektrane. Rezultati dobijeni za profit ukazuju da se u bilo kojem Scenariju profit ostvaren za bFN elektranu veći u odnosu na mFN elektranu. Takođe, rezultati u tabelama 5.16 - 5.19 ukazuju da za isti tip FN elektrane, raste profit sa porastom koeficijenta refleksije podloge.

5.4.3. Određivanje granične cijena reflektora

U cilju određivanja granične (maksimalne opravdane) cijene reflektora, potrebno je uporediti relevantne pokazatelje dobijene u Scenarijama 2, 3 i 4 u odnosu na Scenario 1. Imajući u vidu rezultate dobijene u prethodnom potpoglavlju, kao kriterijum za određivanje prihvatljive cijene reflektora je profit vlasnika elektrane. Najprije, parametri FN elektrane su određeni prema kriterijumu maksimizacije profita vlasnika FN elektrane tokom životnog vijeka FN elektrana, formula (5.47):

$$J_3 = \max \{Profit\} = \left(\sum_{t=1}^{n_H} W \cdot \left(1 - \frac{t \cdot d}{100} \right) \cdot C_e \right) - C_I + \sum_{t=1}^{n_H} \frac{C_M + C_L}{(1+i)^t} \quad (5.47)$$

U tabelama 5.20 i 5.21 prikazani su dobijene optimalne vrijednosti za upravljačke promjenljive (D i Σ), kriterijumsku funkciju J_3 , kao i vrijednosti za W i $LCOE$.

Tabela 5.20. Rješenja optimizacionog zadatka J_3 za bFN elektranu

	Scenario 1 ($\rho=0.2$)	Scenario 2 ($\rho=0.4$)	Scenario 3 ($\rho=0.6$)	Scenario 4 ($\rho=0.8$)
Σ [°]	35	42	46	50
D [m]	12	14	15	15
W [MWh]	3713.50	3948.20	4171.84	4388.59
$LCOE$ [€/MWh]	51.38	49.63	47.38	45.04
$Profit$ [Milion€]	2.044	2.25	2.49	2.74

Tabela 5.21. Rješenja optimizacionog zadatka J_3 za mFN elektranu

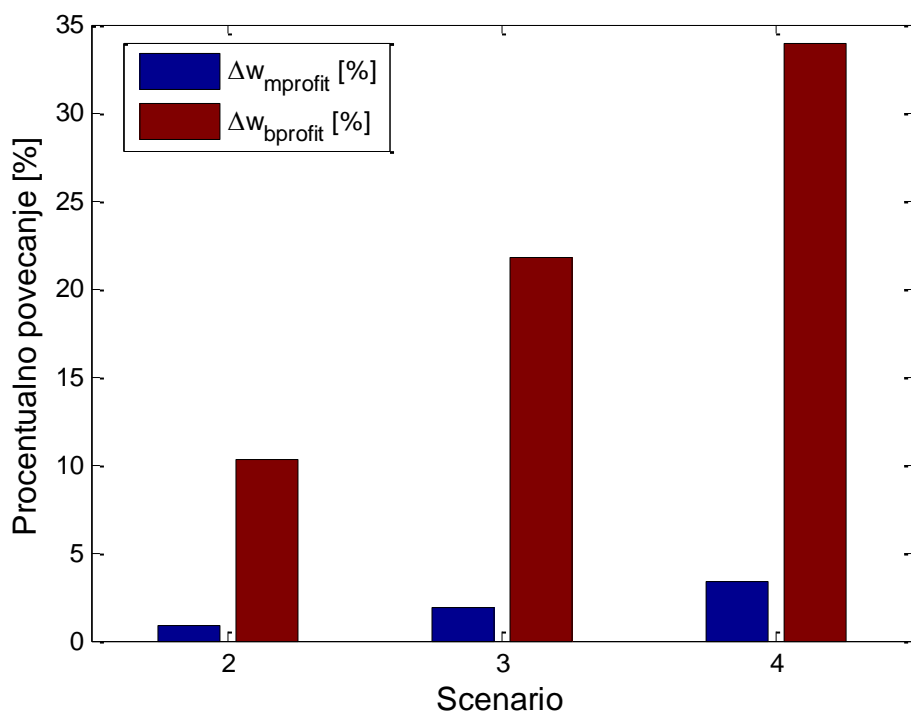
	Scenario 1 ($\rho=0.2$)	Scenario 2 ($\rho=0.4$)	Scenario 3 ($\rho=0.6$)	Scenario 4 ($\rho=0.8$)
Σ [°]	27	28	30	35
D [m]	9	9	10	12
W [MWh]	3488.32	3502.65	3538.28	3598.10
$LCOE$ [€/MWh]	50.06	49.85	49.84	49.96
$Profit$ [Milion€]	1.97	1.99	2.01	2.04

Upoređujući dobijene rezultate za kriterijum J_3 , tabele 5.20 i 5.21, sa rezultatima iz tabela 5.16 - 5.19, može se zaključiti da su optimalne vrijednosti za upravljačke promjenljive za bFN elektranu bliže vrijednostima dobijenim rješavanjem prema kriterijumima J_1 nego J_2 . Naime, u slučaju bFN elektrane, za Scenarije 2, 3 i 4, za rješenje prema kriterijumua J_3 dobijene su identične vrijednosti za promjenljive kao i rješenjem kriterijuma J_1 . Rješenja, za upravljačke promjenljive dobijena rješavanjem kriterijuma J_3 za mFN elektranu, karakteriše da su bliske aritmetičkoj sredini vrijednosti za upravljačke promjenljive dobijene rješavanjem kriterijumima J_1 i J_2 . Koristeći formule (5.48) i (5.49) izračunato je procentualno povećanje profita u Scenarijima 2, 3 i 4 u odnosu na Scenario 1 za bFN i mFN elektranu, što je ilustrovano na slici 5.30.

$$\Delta w_{b_Profit}^i (\%) = \frac{Profit_b^i - Profit_b^1}{Profit_b^1} \cdot 100, \quad (5.48)$$

$$\Delta w_{m_Profit}^i (\%) = \frac{Profit_m^i - Profit_m^1}{Profit_m^1} \cdot 100. \quad (5.49)$$

Najveće procentualno povećanje proizvodnje u odnosu na Scenario 1 se dobija za Scenario 4 u iznosu od 33.95% za bFN, odnosno 3.34% za mFN elektranu. Najmanje procentualno povećanje proizvodnje u odnosu na Scenario 1 se dobija za Scenario 2 u iznosu od 10.23% za bFN, odnosno 0.83% za mFN elektranu.



Slika 5.30. Procentualno povećanje profita za Scenarije 2, 3 i 4 u odnosu na Scenario 1 za bFN i mFN elektrane

Sprovedene analize upućuju da je moguće povećati efikasnost rada bFN elektrane povećanjem koeficijenta refleksije površine između FN redova koristeći prirodne ili vještačke reflektore. Za bFN elektrane instalisane na zemlji, povećanje koeficijenta refleksije se može postići posipanjem bijelog pijeska između FN redova, čiji je koeficijent refleksije 0.4 [86]. Koeficijente refleksije u iznosu od 0.6 ili 0.8 se može dobiti postavljanjem bijelih blokova između FN redova ili farbanjem bijelom bojom površinu između FN redova. Veći koeficijent refleksije površine između FN redova se može postići postavljanjem vještačkih reflektora napravljenih od aluminijskih folija ili aluminijskih ploča. U ovoj sekciji ispitana je mogućnost povećanja proizvodnje mFN elektrane sa reflektorima od aluminijuma [10] koji su postavljeni pod određenim nagibnim uglom FN redova u odnosu na horizontalnu podlogu. U [56] eksperimentalno su ispitane refleksione karakteristike aluminijskih ploča i aluminijskih folija.

Međutim, postavljanje bilo kakvih reflektora iziskuje određenu novčanu investiciju. Imajući u vidu da koeficijent refleksije od 0.2 odgovara slučaju kada je FN elektrana bez reflektora, granična cijena reflektora za Scenarije 2, 3 i 4 je određena u odnosu na Scenario 1. Postupak određivanja granične cijene reflektora sastoji se u mijenjanju vrijednosti cijene reflektora dok se ne dobije da je profit u Scenarijama 2, 3 i 4 jednak profitu prema Scenariju 1. Usvojene vrijednosti za upravljačke promjenljive su one koje predstavljaju rezultate rješavanja optimizacionog zadatka J_3 . Cijena reflektora je uračunata u kriterijumu za profit na sljedeći način:

$$Profit_{REF} = \left(\sum_{n_t=1}^{n_t=20} W \cdot \left(1 - \frac{t \cdot d}{100} \right) \cdot C_e \right) - C_I - C_{REF} - \sum_{n_t=1}^{n_t=20} \frac{C_M + C_L}{(1+i)^t}, \quad (5.50)$$

gdje je $Profit_{REF}$ profit u toku životnog vijeka FN elektrane sa obuhvatanjem cijene investicije u reflektore, C_{REF} je cijena reflektora.

Predloženom metodologijom, u tabeli 5.22 prikazane su granične cijene reflektora za sve analizirane Scenarije.

Tabela 5.22. Granična cijena reflektora za mFN i bFN elektrane

	C_{REF} [€/m ²] za Scenario 2	C_{REF} [€/m ²] za Scenario 3	C_{REF} [€/m ²] za Scenario 4
bFN elektrana	3.50	7.40	11.50
mFN elektrana	0.40	0.90	1.40

Dobijeni rezultati u tabeli 5.22 ukazuju da su reflektori finansijski isplativi kod bFN elektrana, dok postavljanje reflektora kod mFN elektrane nije isplativo. Tačnije, postavljanje reflektora između FN redova sa analizirane vrijednosti koeficijenta refleksije, tržišnu cijenu reflektora u okolini mikrolokacije i za meteo podatke mikrolokacije ima opravdanost u slučaju bFN elektrane pod uslovom da je koeficijent refleksije reflektora nije manji od 0.6 (Scenario 3).

Drugim riječima, smatra se da je isplativo koristiti reflektore u slučaju da im je koeficijent refleksije 0.6 i 0.8, a da cijena reflektora po m² nije veća od 7.4 €/m² i 11.5 €/m², respektivno.

5.5 Uticaj horizontalnog reflektora na karakteristike bFN elektrane sa vertikalno postavljenim FN panelima

5.5.1. Uvod

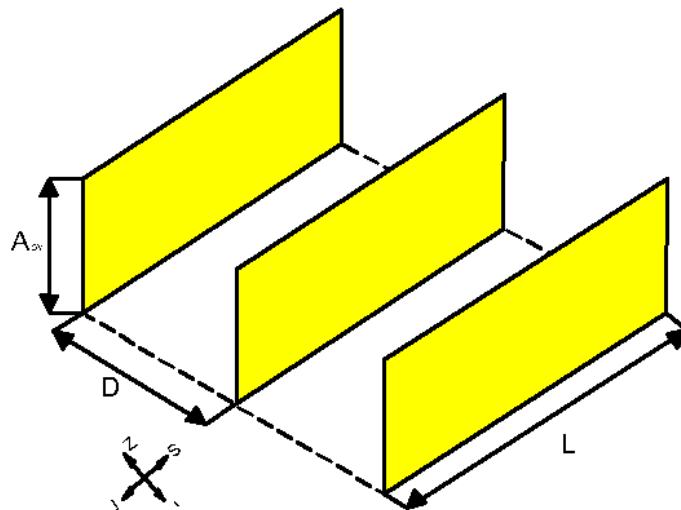
Integracija FN elektrana sa južno orijentisanim modulima u elektroenergetski sistem prate problemi jednovremenosti proizvodnje takvih elektrana i nekorelisanost sa tipičnim dijagramom potrošnje električne energije konzuma. Ovaj problem je veoma aktuelan pa je i tema mnogih radova u kojima je prepoznato da sistemi za skladištenje energije kao i fleksibilnost potrošnje, mogu biti dio rješenja u cilju postizanja veće integracije FN elektrana u elektroenergetski sistem. Dio rješenja mogu biti vFN elektrane (bFN elektrane sa vertikalno postavljenim FN panelima čije su aktivne površine orijentisane prema istoku i zapadu) [87]. Ovakve elektrane karakteriše da je prosječni dijagram proizvodnje sličniji sa prosječnim dijagramom potrošnje u odnosu na rješenja južno orijentisanih FN elektrana. Detaljna analiza vFN elektrana je tema ovog potpoglavlja.

5.5.2. Tehno-ekonomske karakteristike vFN elektrane

U ovom potpoglavlju korišćen je predloženi model iradijacije sa segmentacijom koji omogućava sagledavanje tehničkih i ekonomskih pokazatelja vFN elektrane. Pored toga, u cilju povećanja proizvodnje ispitan je uticaj reflektora koji bi bio postavljen između FN redova.

Kroz sagledavanje uticaja reflektora na povećanje proizvodnje, profil dnevnog dijagrama proizvodnje i faktor korelisanosti proizvodnje i tržišne cijene električne energije izvršena je analiza opravdanosti razvoja vFN elektrana i upotrebu reflektora. Na slici 5.31 prikazana je konfiguracija elektrane sa vertikalnim FN panelima orijentisanim u pravcu istok-zapad. Imajući u vidu da vFN elektrane velike snage karakteriše relativno velika dužina FN redova (L_{pv}) i relativno veliko rastojanje između FN redova (D), ovdje je predložena konfiguracija vFN elektrane sa horizontalnim reflektorima postavljenim između FN redova.

Pošto površina između FN redova može biti relativno velika, ovdje se pod reflektorima podrazumijevaju relativno jeftini reflektori koji se mogu realizovati posipanjem sitnog bijelog pijeska između FN redova. Važna karakteristika ovakvih reflektora je da se dospjelo sunčevo zračenje na reflektore odbija difuziono ka FN panelima.



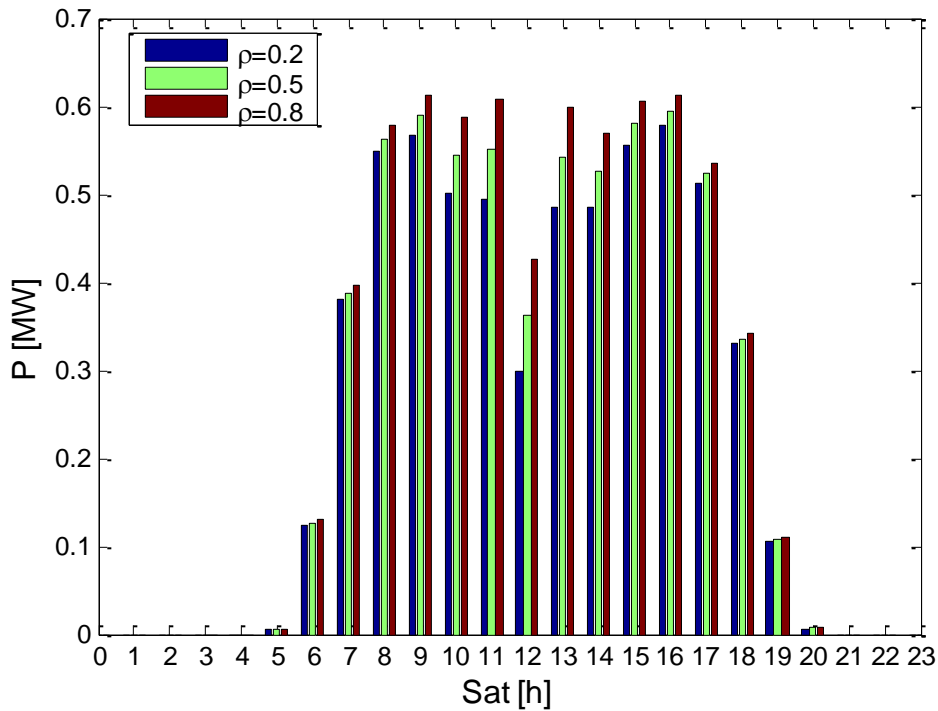
Slika 5.31. vFN elektrana orijentisana u pravcu istok-zapad

Uvažavajući činjenicu da se analiziraju FN elektrane velike snage, prilikom izbora za model iradijacije usvojena je pretpostavka da reflektovana komponenta koja pada na FN panele može poticati samo od reflektora. Sa druge strane, imajući u vidu da se radi o relativno velikim površinama FN redova i reflektora, a radi što preciznijeg proračuna iradijacije i proizvodnje, korišćena je tehnika segmentiranja površina FN redova i reflektora.

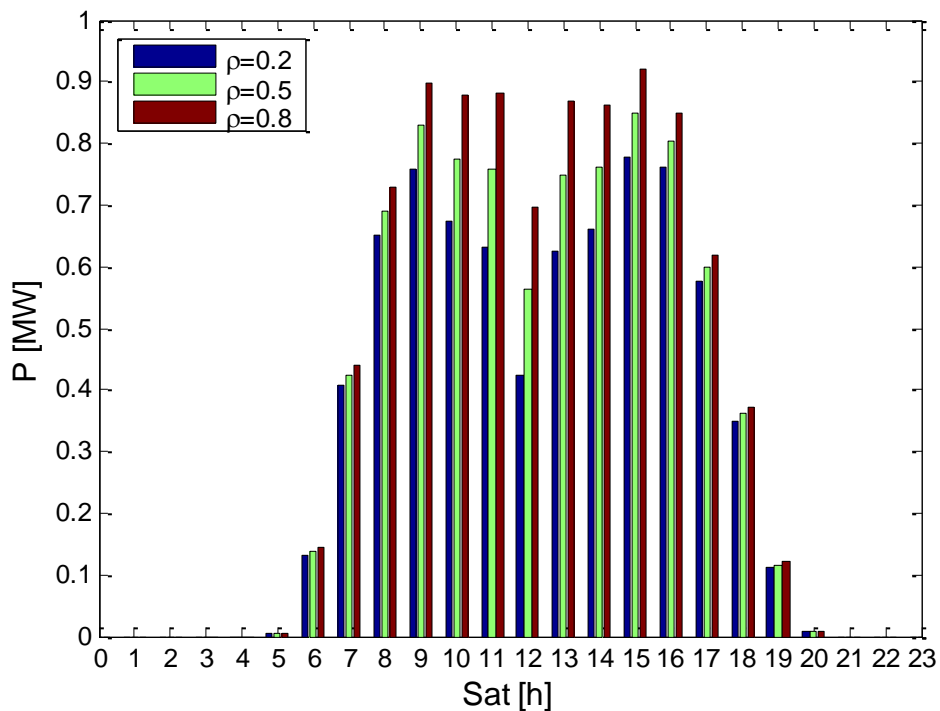
Primjenom modela za proračun iradijacija iz poglavlja 5.3.2 i za meteo podatke prikazane u tabeli 4.1 ispitana je vFN elektrana instalisane snage 2.4 MWp i koja se sastoji od 20 FN redova. Analiziran je uticaj rastojanja između FN redova i koeficijenta refleksije reflektora na godišnju proizvodnju i na prosječni dnevni dijagram proizvodnje vFN elektrane. Analiza godišnje proizvodnje električne energije je sprovedena za opseg vrijednosti rastojanja između FN redova od 4 m do 12 m. Imajući u vidu da širina FN reda iznosi 4 m, ispitan je uticaj rastojanja između FN redova za sljedeće odnose rastojanja između FN redova i širine FN redova (D/A_{pv}): 1, 2 i 3.

Takođe, analize su sprovedene i za tri vrijednosti koeficijenta refleksije reflektora: 0.2, 0.5 i 0.8. Uvažavajući [86] i [88], koeficijent refleksije od 0.2 odgovara zemljanoj površi, dok se granična gornja vrijednost koeficijenta refleksije od 0.8 može dobiti sa vještačkim reflektorom [11], [88].

Na slikama 5.32 - 5.34 prikazani su prosječni dnevni dijagram proizvodnje vFN elektrane za tri različite vrijednosti koeficijenta refleksije reflektora i za tri različite vrijednosti dužine rastojanja između FN redova. Prosječni dnevni dijagram je dobijen dijeljenjem ukupne godišnje satne proizvodnje sa brojem dana u godini.

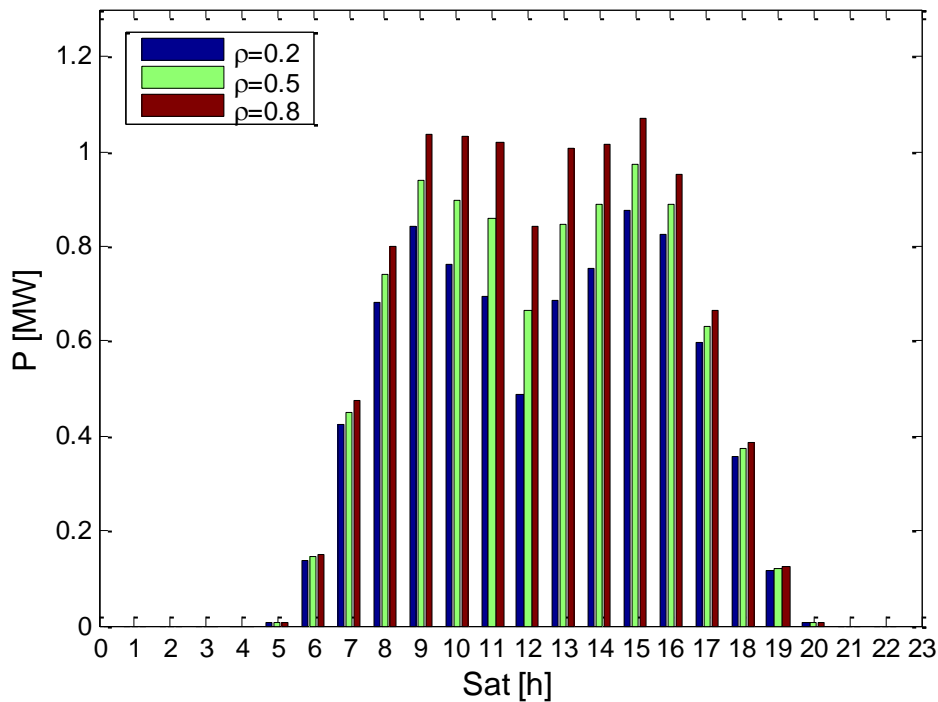


Slika 5.32. Prosječni dnevni dijagram proizvodnje vFN elektrane za tri različita koeficijenta refleksije reflektora za vrijednost rastojanja između FN redova od 4 m



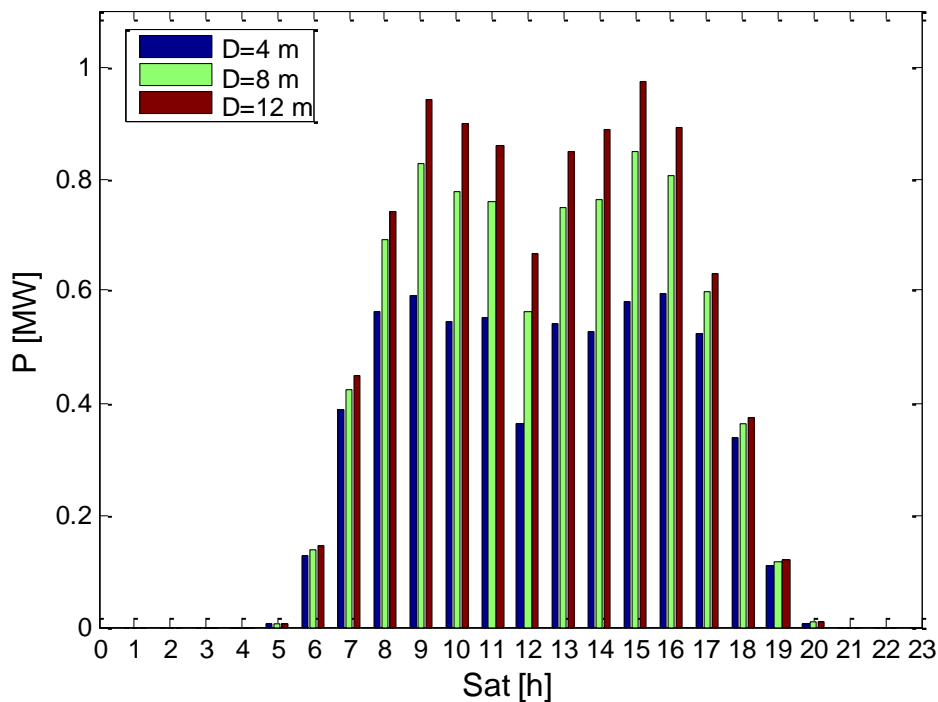
Slika 5.33 Prosječni dnevni dijagram proizvodnje vFN elektrane za tri različita koeficijenta refleksije reflektora za vrijednost rastojanja između FN redova od 8 m

Važno je istaći da se za razliku od južno orijentisane FN elektrane sa optimalnim nagibnim uglom FN redova proizvodnja vFN elektrane je veća u periodima od 8 h-11 h i 13 h-17 h nego u 12 h. Imajući u vidu da je orijentacija vFN elektrane u pravcu istok-zapad, dijagram proizvodnje vFN elektrane je gotovo idealno simetričan u odnosu na podne.



Slika 5.34. Prosječni dnevni dijagram proizvodnje vFN elektrane za tri različita koeficijenta refleksije reflektora za vrijednost rastojanja između FN redova od 12 m

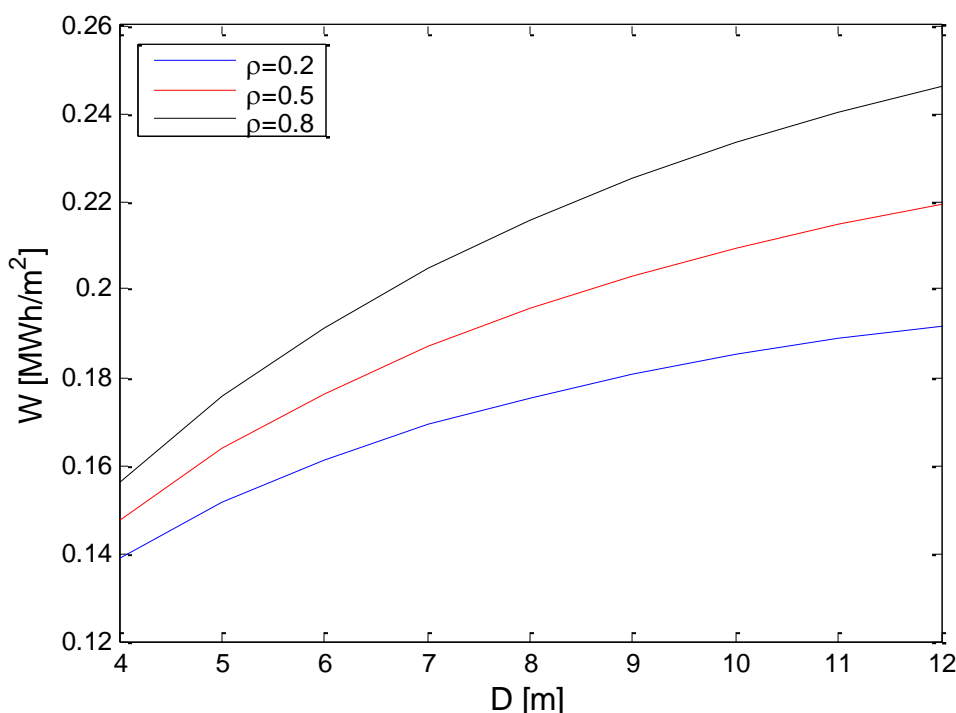
U cilju boljeg sagledavanja uticaja rastojanja između FN redova na prosječni dnevni dijagram vFN elektrane poslužiće slika 5.35. Slika 5.35 prikazuje prosječni dnevni dijagram proizvodnje vFN elektrane za tri različite vrijednosti rastojanja između FN redova (4 m, 8 m i 12 m) za usvojeni koeficijent refleksije reflektora od 0.5.



Slika 5.35. Prosječni dnevni dijagram proizvodnje vFN elektrane za tri različite vrijednosti rastojanja između FN redova (4 m, 8 m i 12 m) pri čemu je koeficijent refleksije reflektora 0.5

Sa slika 5.32 - 5.35 može se uočiti da se veća proizvodnja postiže sa većim rastojanjem između FN redova i većim koeficijentom refleksije reflektora. Takođe, sa istih slika, može se uočiti kako reflektor mijenja izgled prosječnog dnevnog dijagrama proizvodnje vFN elektrane. Naime, vidi se da reflektori dominantno povećavaju proizvodnju vFN elektrane u periodu oko 12 h, te se time ublažava karakteristični sedlasti profil dnevnog dijagrama proizvodnje vFN. Dobijeni rezultat opravdava činjenica da upravo u tom periodu na reflektor pada najviše sunčeve energije, pa se samim time dobija i najveće povećanje proizvodnje vFN elektrane sa reflektorom. Pored toga, upravo u 12 h, zbog orijentacije vFN elektrane u pravcu istok-zapad, ne postoji nikakva prepreka koja zaklanja reflektore od sunčevog zračenja.

Slika 5.36, na kojoj je prikazana godišnja proizvodnja vFN elektrane po m² površine FN panela u zavisnosti od rastojanja između FN redova za različite koeficijente refleksije reflektora, potvrđuje da godišnja proizvodnja najbrže raste sa porastom rastojanja između FN redova ukoliko je koeficijent refleksije reflektora ima najveću vrijednost od analiziranih.



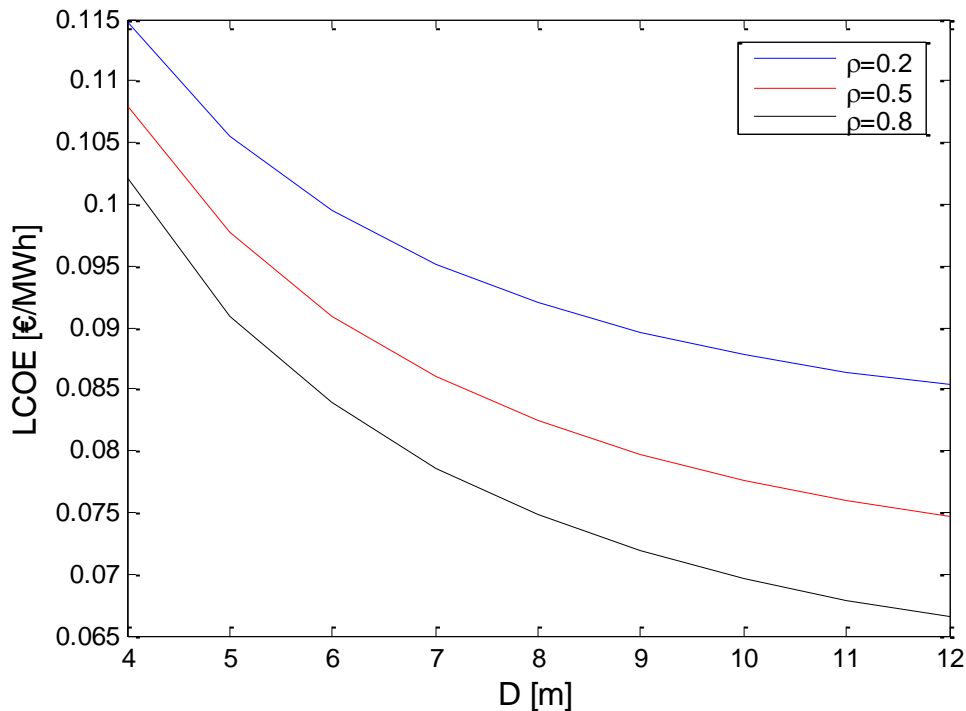
Slika 5.36. Zavisnost godišnje proizvodnje vFN elektrane po m² površine FN panela od rastojanja između FN redova za različite koeficijente refleksije reflektora

Pored godišnje proizvodnje analizirana je i ekonomska isplativost vFN elektrane. Ulazni podaci za ekonomsku analizu su dati u tabeli 5.15. Očekivano, najveći pad svedenih troškova proizvodnje vFN elektrane u zavisnosti od rastojanja između FN redova se dobija ukoliko je koeficijent refleksije reflektora najveći od analiziranih vrijednosti. Na osnovu slike 5.37 se može odrediti da li investicija u povećanje koeficijenta refleksije podloge između FN redova je ekonomski opravdana prostim poređenjem LCOE za slučaj vFN elektrane sa povećanim koeficijentom refleksije podloge između FN redova i LCOE sa slučaj vFN elektrane sa koeficijentom refleksije podloge koja odgovara zemljanoj površini (ρ=0.2).

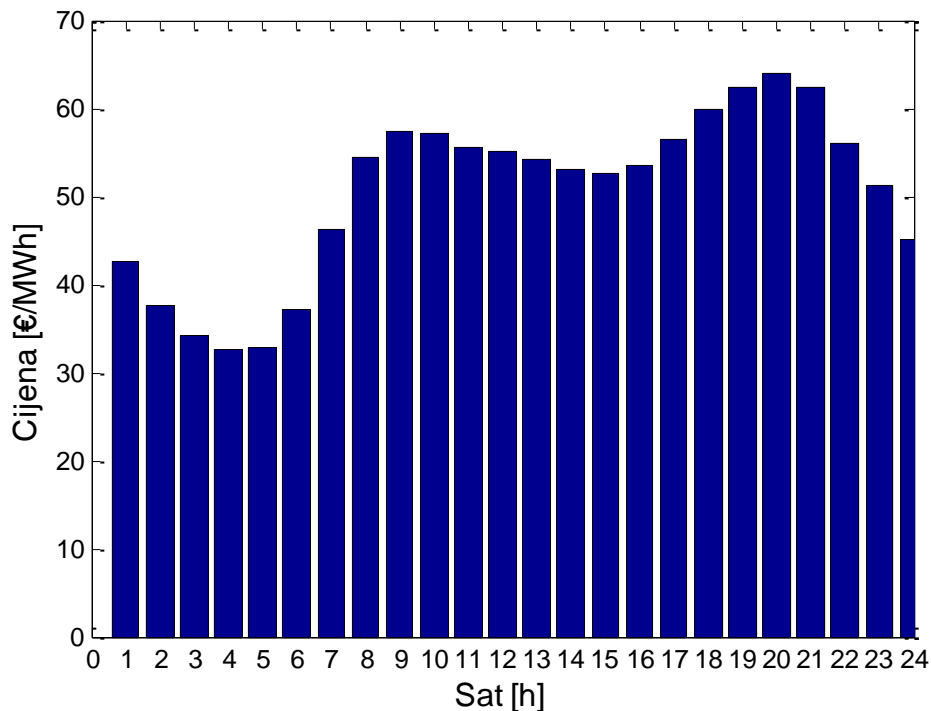
U tržišnim uslovima eksploatacije FN elektrane, važna karakteristika FN elektrane je korelisanost proizvodnje i cijene električne energije na tržištu, formula (5.51) [89].

$$c_{PVM} = \frac{1}{24} \cdot \frac{\sum_{j=1}^{24} P_j \cdot C_{OMj}}{P_{avg} \cdot C_{OMavg}}, \quad (5.51)$$

gdje su P_t satna proizvodnja FN elektrane, P_{avg} je prosječna dnevna proizvodnja FN elektrane, C_{OMt} je satna tržišna cijena električne energije i C_{OMavg} je prosječna cijena električne energije. Prosječna cijena električne energije na berzi SEEPEX u toku 2019. godine je prikazana na sljedećem grafiku.

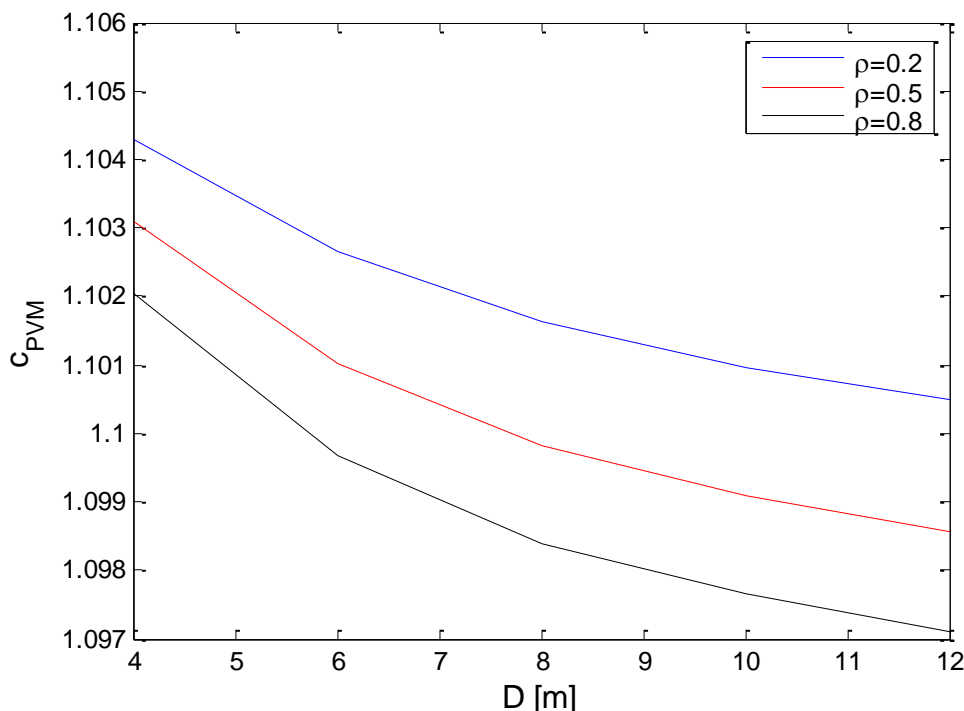


Slika 5.37. Zavisnost troškova proizvodnje vFN elektrane od rastojanja između FN redova za različite koeficijente refleksije reflektora.



Slika 5.38. Prosječna cijena električne energije u toku 2019 godine

FN elektrana čiji je faktor korelisanosti c_{PVM} veći omogućava vlasniku takve FN elektrane veću zaradu u odnosu na FN elektranu iste instalisane snage ali sa manjim faktorom korelisanosti. Na slici 5.39 prikazano je kako povećanje koeficijenta refleksije reflektora utiče na faktor korelisanosti proizvodnje vFN elektrane i tržišne cijene električne energije.



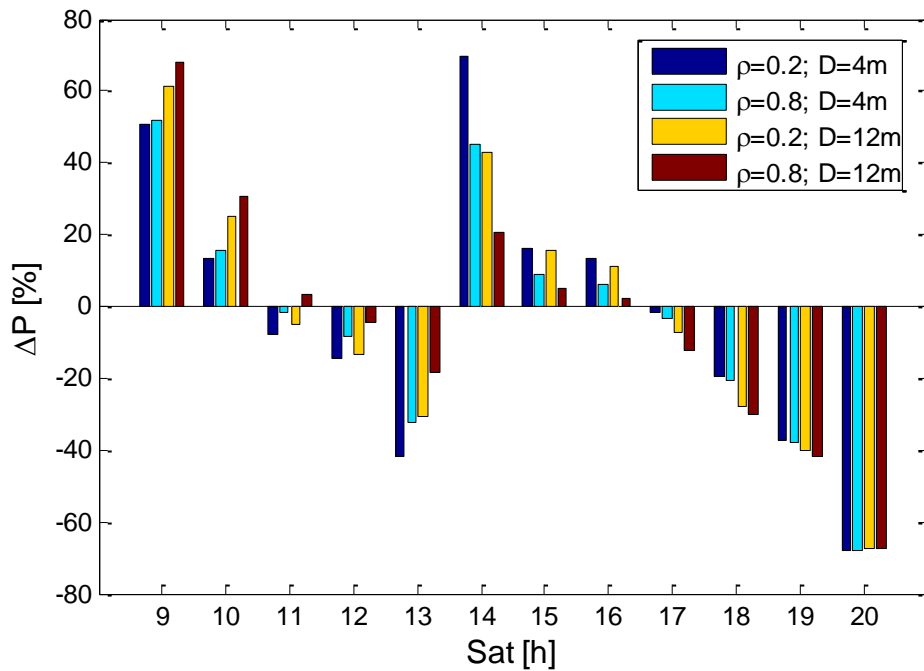
Slika 5.39. Zavisnost koeficijenta c_{PVM} u funkciji rastojanja između FN redova za različite koeficijente refleksije podloge između FN redova

Na osnovu rezultata prikazanih na slici 5.39, može se zaključiti da veći koeficijent refleksije reflektora utiče vrlo malo na korelisanost između proizvodnje vFN elektrane i tržišne cijene električne energije. Važno je istaći da faktor c_{PVM} , za bilo koju vrijednost koeficijenta refleksije reflektora, opada sa porastom rastojanja između FN redova.

Najveće smanjenje faktora korelisanosti sa porastom rastojanja između FN redova se dobija za vFN elektranu sa reflektorom čiji je koeficijent refleksije 0.8, dok se najmanje smanjenje faktora korelisanosti sa porastom rastojanja između FN redova dobija za vFN elektranu sa podlogom čiji je koeficijent refleksije 0.2. Radi dubljeg sagledavanja tehničkih karakteristika potrebnih za planiranje rada elektroenergetskog sistema sa predloženim vFN elektranama pored dnevnog dijagrama analizirana je satna promjena snage ovakve elektrane.

Slika 5.40 ilustruje satnu promjenu snage za vFN elektranu za četiri granična scenarija za period od 9 h do 20 h. Scenariji su dobijeni kombinovanjem minimalnih i maksimalnih vrijednosti rastojanja između FN redova i koeficijenta refleksije reflektora. Pored povećanja proizvodnje vFN elektrane, koeficijent refleksije reflektora i rastojanje između FN redova utiču i na satnu brzinu promjene snage vFN elektrane. Prosječna satna promjena snage vFN elektrane sa reflektorima je računata prema sljedećoj formuli:

$$\Delta P(t) = \frac{P(t) - P(t-1)}{P(t-1)} \cdot 100 [\%]. \quad (5.52)$$



Slika 5.40. Satna promjena snage vFN elektrane za četiri različita scenarija

Sa aspekta uticaja koeficijenta refleksije reflektora na brzinu promjene snage dnevni dijagram može se podijeliti na dva karakteristična perioda za analizirane meteo podatke i pretpostavke o konstrukciji vFN elektrane. Prvi period bi bio od 09 h do 11 h i od 17 h do 20 h, a drugi period bi bio od 12 h do 16 h. Naime, satna promjena snage vFN elektrane sa većim koeficijentom refleksije reflektora i većim rastojanjem između FN redova je veća u periodima od 09 h do 11 h i od 17 h do 20 h nego kod vFN elektrane sa manjim koeficijentom refleksije reflektora i manjim rastojanjem između FN redova. Sa druge strane, u periodu od 12 h do 16 h dobija se obrnuta situacija. Tada je satna promjena snage vFN elektrane sa manjim koeficijentom refleksije reflektora i manjim rastojanjem između FN redova veća nego kod vFN elektrane sa većim koeficijentom refleksije i većim rastojanjem između FN redova. Za analizirane scenarije, najveća satna promjena snage vFN elektrane, za prvi period, se dobija u 9 h za sljedeće vrijednosti parametara vFN elektrane: $\rho=0.8$ i $D=12$ m. Tada je $\Delta p=68.03\%$. Za prvi period najmanja satna promjena snage se dobija u 17 h u iznosu od -1.49% za sljedeće parametre vFN elektrane: $\rho=0.2$ i $D=4$ m. Za drugi period, najveća satna promjena snage vFN elektrane se dobija u 12 h u iznosu od -14.65% i za sljedeće vrijednosti parametara vFN elektrane: $\rho=0.2$ i $D=4$ m. Za isti period, najmanja satna promjena snage vFN elektrane se dobija u 16 h u iznosu od 1.98% i za sljedeće vrijednosti parametara vFN elektrane: $\rho=0.8$ i $D=12$ m. Sprovedene analize ukazuju da se prilikom integracije ovakvih vFN elektrana mora analizirati uticaj reflektora na očekivanu godišnju proizvodnju, svedene troškove proizvodnje, oblik dnevnog dijagrama i satnu brzinu promjene snage.

5.5.3. Analiza proizvodnje vFN elektrane u regionima sa izraženim sniježnim padavinama

U ovoj sekciji da je kratak izvod rezultata koje autor ove disertacije uradio kao jedan od učesnika u okviru studije [90]. Zaključak ove studije treba da pokaže da li vFN elektrana u planinskim uslovima ima prednost u odnosu na mFN elektranu orijentisanu ka jugu pod optimalnim nagibnim uglom.

U sniježnim uslovima prednosti vFN elektrane u odnosu na mFN elektrane orijentisane ka jugu sa FN panelima nagnutim pod optimalnim uglom je u tome što se snijeg ne zadržava na FN

panelima, te su time smanjeni gubici usljed neraspoloživosti FN modula. Pored toga, dugi periodi vremena sa prisustvom sniježnog pokrivača između FN redova povećavaju reflektovanu komponentu zračenja, što ima mnogo veći doprinos kod bFN elektran u odnosu na južno orijentisane mFN. Prisustvo snijega u okolini FN modula, zbog veoma visokog koeficijenta refleksije, koji može da iznosi i do 0.8, doprinosi povećanju proizvodnje FN elektrane [31], [91]. Upravo ovakav scenario je moguć kod vFN elektrana u toku perioda godine sa sniježnim padavinama koje se grade u planinskim predjelima. Ako se radi o mikrolokaciji sa izrazitom planinskom klimom, realno je za očekivati da je debljina sniježnog prekrivača u zimskim mjesecima dovoljno velika tako da je prekrivena cjelokupna podloga između FN redova snijegom, što znači da koeficijent refleksije površine između FN redova ima relativno veliku vrijednost. U periodu godine sa sniježnim padavinama ne postoji ili je vrlo mala proizvodnja električne energije kod mFN elektrane orijentisane ka jugu sa FN panelima nagnutnim pod optimalnim uglom zbog zadržavanja snijega na samim FN panelima. Ovdje je usvojeno je da u toku dana sa sniježnim padavinama najveći dio FN panela prekriven snijegom dovoljne debljine tako da ne postoji proizvodnja električne energije. Pod navedenim pretpostavkama, izvedena je komparativna analiza vFN i mFN elektrane na mikrolokaciji Duga Poljana koja se nalazi u blizini mjesta Sjenica [90]. Glavni meteorološki podaci (direktna, difuziona iradijacija i temperatura ambijenta [53]) kao i podaci o broju dana sa sniježnim padavinama i broju dana sa sniježnim pokrivačem [92] su prikazani u tabeli 5.23.

Tabela 5.23. Meteo podaci za mikrolokaciju Duga Poljana

Mjesec	Direktna insolacija [kWh/m ² /dan]	Difuziona insolacija [kWh/m ² /dan]	Ambijentalna temperatura [°C]	Dani sa sniježnim padavinama	Dani sa sniježnim pokrivačem
Januar	3.25	0.64	7.40	13	27
Februar	2.25	1.14	9.40	13	23
Mart	3.25	1.56	10.86	11	18
April	3.22	2.24	15.58	4	4
Maj	4.50	2.45	19.05	0	0
Jun	5.73	2.50	24.23	0	0
Jul	7.63	2.01	27.69	0	0
Avgust	7.35	1.83	29.01	0	0
Septembar	5.09	1.91	22.42	0	0
Oktobar	4.47	1.19	17.04	1	2
Novembar	2.44	0.88	13.93	7	9
Decembar	2.01	0.66	8.52	12	21

Na ciljnoj lokaciji je predviđen razvoj projekata FN elektrane velike snage. Instalirana snaga je ograničena raspoloživim prostorom i kapacitetom priključne elektroenergetske mreže. Prema informacijama dobijenim od Klijenta FN elektrana bi se razvijala u blokovskoj strukturi, pri čemu bi instalirana snaga svakog bloka bila oko 8 MW. Iz tog razloga, u daljoj analizi kao jedinična snaga elektrane je usvojena snaga bloka, dakle 8 MW. Procjena ukupne proizvodnje elektrane može se jednostavno dobiti multipliciranjem prema broju blokova u elektrani.

Razmatrana su dva varijantna rješenja realizacije FN elektrane i to u izvedbi kao mFN i vFN elektrane. Kod vFN elektrane se podrazumijevaja da su bFN paneli orijentisani u pravcu istok-zapad, a kod mFN da su južno orijentisani sa optimalnim nagibnim uglom. U studiji je usvojeno da je snaga FN panela 350 Wp, a da su dimenzije jednog FN panela 2000 mm x 1000 mm. Visina jednog FN reda iznosi 4 m, broj FN redova je 19, a širina jednog FN reda je 600 m. Za nagibni ugao FN redova kod južno orijentisane mFN elektrane usvojena vrijednost pri kojoj se dobija najveća proizvodnja. Performanse projektovane FN elektrane u bitnoj mjeri zavise od izabranog rastojanja između dva susjedna FN reda. Povećanje rastojanja između FN redova doprinosi smanjenju

gubitaka usljed međusobnog zasjenčenja redova, kao i povećanje reflektovane komponente, ali sa druge strane povećava uzurpiranu površinu zemljišta, što može biti povezano i sa troškovima investiranja u zemljište namenjenog za izgradnju elektrane. U daljim analizama vršena je varijacija stepena iskorišćenja terena za oba varijantna rješenja, sa ciljem da se utvrdi kakav uticaj ovaj faktor ima na godišnju proizvodnju električne energije i potrebnu površinu terena za realizaciju FN elektrane instalisane snage 8 MW. Ovdje je definisan stepen iskorišćenja kao odnos širine FN panela (A_{pv}) i rastojanja između FN redova (D) Rezultati su dati u tabeli 5.24 za nekoliko različitih vrijednosti stepena iskorišćenja terena koristeći PVsyst softver.

Tabela 5.24. Komparativno poređenje mFN i vFN elektrane instalisane snage 8 MW_p

A_{pv}/D	Proizvodnja mFN elektrane [GWh]	Proizvodnja vFN elektrane [GWh]	Potrebna površina zemljišta za FN panele [ha]
0.20	10.46	11.52	21.00
0.25	10.44	11.11	16.80
0.30	10.41	10.70	14.00
0.35	10.38	10.30	15.00
0.40	10.33	9.89	10.50
0.45	10.25	9.53	9.35
0.50	10.11	9.16	8.45

Analizom podataka iz tabele 5.24 mogu se izvesti sljedeći zaključci:

- stepen iskorišćenja terena više utiče na proizvodnju električne energije dobijenu iz vFN nego iz mFN elektrane,
- proizvodnja električne energije iz vFN elektrane postaje veća od proizvodnje mFN elektrane ukoliko je faktor iskorišćenja terena manji od 0.35,
- za tipičan opseg stepena iskorišćenja terena (0.35-0.45) koji se usvaja pri projektovanju FN elektrana, varijantno rješenje sa mFN modulima daće 1% - 7% veću proizvodnju nego rješenje sa vFN modulima.

Analiza uticaja snijega na proizvodnju mFN i vFN elektrane je rađena za stepen iskorišćenja terena od 0.375. Pošto širina FN redova iznosi 4 m, to znači da je rastojanje između FN redova 10.5 m. Optimalni nagibni ugao FN redova za mFN elektranu je 25°.

U tabeli 5.25 je prikazan odnos proizvodnje mFN i vFN elektrane kada se uvaži uticaj snijega i bez uvažavanja uticaja snijega. Usvojena je pretpostavka da se snijeg ne može zadržati na vFN panelima, tako da negativan uticaj zadržavanja snijega na FN module kod vFN elektrane ne postoji.

Tabela 5.25. Uticaj snijega na proizvodnju mFN i vFN elektrane.

	proizvodnja elektrane sa uvažavanjem snijega [MWh]	proizvodnja elektrane bez uvažavanja snijega [MWh]
mFN elektrana	10345.85	10356.16
vFN elektrana	10035.07	9814.29

Tabela 5.25 vodi ka zaključku da u slučaju mFN elektrane negativan efekat zadržavanja snijega na FN module se skoro u potpunosti eliminiše usled povećanja reflektovane komponente iradijacije koja se odbija zbog zadržavanja snijega između FN redova. Sa druge strane, zadržavanje snijega između FN redova, za analiziranu mlokaciju, može doprinijeti proizvodnji vFN elektrane za oko 2.21%.

6. UTICAJ VREMENSKE KONSTANTE ZAGRIJAVANJA MODULA NA IZLAZNE ELEKTRIČNE KARAKTERISTIKE FN MODULA

6.1. Uvod

Sa porastom učešća FN elektrana u ukupnoj proizvodnji električne energije, rastao je i broj naučnih radova čija je tema bilo modelovanje FN modula. Iako se proces pretvaranja sunčeve u električnu energiju vrši pomoću dobro poznatog fotonaponskog efekta, modelovanje FN ćelije je i dalje aktuelno. Najčešće korišćeni model FN ćelije je jednodiodni model, dok nešto komplikovaniji je dvo-diodni model. Zajedničko za oba modela je što parametri takvog modela nijesu poznati. Naime, tipično je da proizvođač FN panela u svojoj dokumentaciji dostavlja podatke o karakterističnim vrijednostima struja i napona, stepenu efikasnosti, korektivnih koeficijenata zavisnih od temperature FN modula. Za potrebe modelovanja električnog kola FN modula neophodno je poznavati vrijednosti električnih parametara FN modula. S obzirom na navedeno, tema velikog broja radova su algoritmi sa ciljem što preciznije procjene parametara FN modula. Matematički model FN modula je opisan u radovima [93], [94], dok su radovi [95], [96], [97] posvećeni algoritmima za procjenu parametara FN modula. Jedan od najčešće korišćenih algoritama, koji je predložen u radu [98], je korišćen i u ovoj disertaciji. Treba istaći i istraživanja koja su sprovedena u radovima [99] i [100], čiji se doprinos ogleda u tome što cilj predloženih postupaka za modelovanje FN ćelija nije samo preciznost već i da su predloženi modeli pogodni za numeričke analize priključenja FN modula /elektrana u elektroenergetski sistem. Imajući u vidu da parametri zamjenske šeme FN modula zavise od temperature FN modula, proračun termičkih karakteristika FN modula je takođe istraživan. U radovima [17] i [101] je prikazan detaljan termički model FN modula kao termičkog tijela, a uticaj termičkih karakteristika na osnove električne karakteristike FN modula je analiziran u [18], [102], [103].

Imajući u vidu da je izlazna zavisnost snaga-napon izrazito nelinearna, neizostavni dio FN modula je i pretvarač (kolo koji se sastoji od komponenata energetske elektronike) koji omogućuje da FN modula radi sa najvećom mogućom snagom. Navedeno se postiže promjenom rada režima pretvarača, prema unaprijed utvrđenim koracima sa ciljem praćenja tačke maksimalne snage (MPPT). Postupak promjene parametara pretvarača su algoritmi od kojih se izdvajaju peturb&observe (P&O) [104], IndCond [105], Hill Climbing [106] i drugi. Sa aspekta principa funkcionisanja ovi algoritmi su vrlo slični i njihova logika se sastoji u tome da sve dok se ne postigne tačka maksimalne snage da se mijenjaju parametri pretvarača. Važno je istaći da se komparativna razlika navedenih algoritama svodi na broj mjerenja, odnosno mjernih uređaja, složenost algoritma kao i preciznost praćenja tačke maksimalne snage u različitim uslovima eksploatacije FN modula [107]. Osim pomenute logike rada MPPT algoritama, postoji i određeni broj gdje su algoritmi zasnovani na neuralnim mrežama.

U ovoj disertaciji radu predložen je model FN modula koji uzima u obzir termičku karakteristiku FN modula, a to je vremenska konstanta zagrijavanja FN modula. Naime, u radovima su prikazani modeli kao i eksperimentalni rezultati mjerenja vremenske konstante zagrijavanja FN modula. Međutim, u dostupnoj literaturi nije analiziran uticaj vremenske konstante zagrijavanja FN modula na izlaznu snagu FN modula prilikom tipičnih dnevnih promjena ulaznih parametara – iradijacije i temperature ambijenta. Imajući u vidu navedeno, jedan od doprinosa ove disertacije se ogleda u inkorporiranju vremenske konstante zagrijavanja FN modula u postojeći široko korišćen model za proračun izlazne snage FN modula. Prednost predloženog modela FN modula je u tome što na jednostavan način, pomoću poznatih relacija, uvažava uticaj temperature FN modula na njegovu izlaznu snagu. Jednostavnost predloženog modela FN modula je u tome što se može lako integrisati

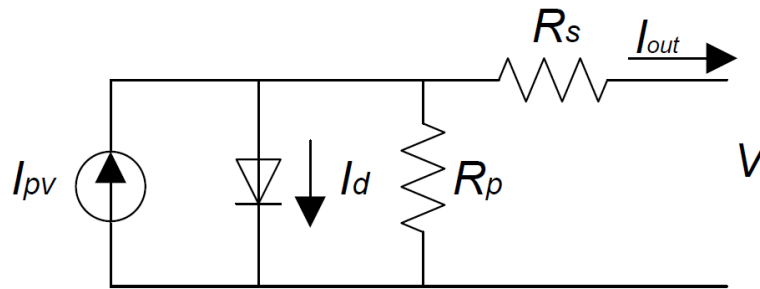
u postojeće MPPT algoritme, tako da se sama logika MPPT algoritma ne mijenja. Dobijeni rezultati ukazuju da predloženi model omogućava sagledavanje dinamičkog odziva sistema u uslovima velikih varijacija iradijacije, koje su tipične za promjenljivo oblačne dane.

6.2. Modelovanje FN modula

Za potrebe modelovanja FN modula usvojen je jedan od najčešće korišćenih modela FN ćelije. Pretpostavka kod ovoga modela da je FN panel sastavljen od redno vezanih FN ćelija. Model prikazan na slici 6.1, opisan je sljedećim jednačinama (6.1) i (6.2), [98]:

$$I_{out} = I_{PV} - I_d - \frac{V + R_s \cdot I_{out}}{R_p} = I_{PV} - I_0 \cdot \left[e^{\frac{V + R_s \cdot I_{out}}{N_s \cdot k \cdot T \cdot a}} - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot I_{out}}{R_p}, \quad (6.1)$$

gdje je I_{out} izlazna struja FN modula, I_{pv} je struja nastala fotonaponskim efektom, I_d je struja kroz diodu, V je napon na priključcima FN modula, R_s je serijska otpornost, R_p je paralelna otpornost, I_0 je struja zasićenja diode, N_s je broj FN ćelija povezanih u rednu vezu, k je Bolzmanova konstanta, T je temperatura FN modula, a je faktor diode i q je konstanta naelektrisanja elektrona.



Slika 6.1. Zamjenska električna šema FN panela

Za proizvoljnu vrijednost iradijacije i temperature, struja zasićenja diode je računata prema sljedećoj jednačini [98]:

$$I_0 = \frac{\left(\frac{R_s + R_p}{R_p} \cdot I_{scn} + K_i \cdot (T - T_n) \right) \cdot \frac{I}{I_n} - \frac{V_{ocn} + K_v \cdot (T - T_n)}{R_p}}{e^{\frac{V_{ocn} + K_v \cdot (T - T_n)}{N_s \cdot k \cdot (T - T_n) \cdot a}} - 1}, \quad (6.2)$$

gdje je I_{scn} nominalna struja kratkog spoja FN modula, K_i je temperaturno-strujni koeficijent, K_v je temperaturno-naponski koeficijent, V_{ocn} je nominalni napon praznog hoda, T_n je nominalna temperatura FN modula, T je trenutna temperatura FN modula, I je trenutna iradijacija koja pada na FN modula i I_n je nominalna iradijacija.

Uvrstavajući jednačinu (6.2) u (6.1), dobija se nelinearna jednačina koja opisuje zavisnost napona i struje FN modula. Algoritmom predstavljenim u radu [98] za zadatu vrijednost napona na krajevima FN modula, temperature i iradijacije može se dobiti vrijednost struje na priključcima FN modula. Ovdje je važno napomenuti da usvojeni algoritam za estimaciju izlaznih veličina FN modula

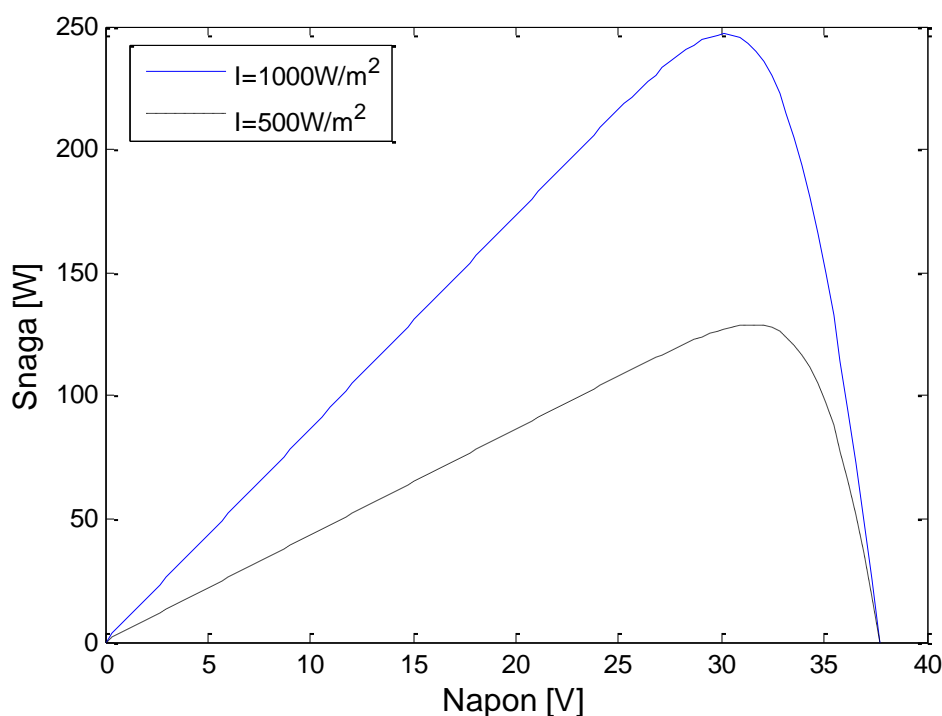
uvažava temperaturnu zavisnost serijske i paralelne otpornosti FN modula. Osnovni podaci o korišćenom FN modula su dati u tabeli 6.1.

Tabela 6.1. Tipične vrijednosti FN modula

$I_{scn} = 8.7 \text{ A}$	$K_v = -0.32/100 \cdot V_{ocn}$	$k = 1.3806503 \cdot 10^{-23}$
$V_{ocn} = 37.7 \text{ V}$	$K_i = -0.032/100 \cdot I_{scn}$	$q = 1.60217646 \cdot 10^{-19}$
$I_{mp} = 8.2 \text{ A}$	$V_{mp} = 30.1 \text{ V}$	$N_s = 60$

U tabeli 6.1 I_{mp} je struja za tačku maksimalne snage a V_{mp} je napon za tačku maksimalne snage.

Na slici 6.2 je prikazana dobro poznata nelinearna zavisnost P - V FN modula koja je dobijena primjenom algoritma iz [98] za nominalnu temperaturu ($25 \text{ }^\circ\text{C}$), pri iradijaciji od 1000 W/m^2 i 500 W/m^2 .



Slika 6.2. Zavisnost snage i napona FN modula pri različitim vrijednostima iradijacije

Postoji više modela za procjenu temperature FN modula [108]. Složeniji modeli za procjenu temperatura zahtijevaju poznavanje brzine i smjera vjetrova kojem je izložen FN modul. Jednostavan model koji zavisi samo od standardnih meteo podataka (iradijacije koja pada na FN modul i temperature ambijenta) a ujedno i najčešće korišćeni dat je sljedećom jednačinom:

$$T = T_{amb} + \left(\frac{NOCT - 20^\circ}{0.8} \right) \cdot I, \quad (6.3)$$

gdje je T temperatura FN modula, T_{amb} je temperatura ambijenta a $NOCT$ je nominalna radna temperatura FN modula.

S obzirom na nelinearnu P - V karakteristiku, u cilju dobijanja što veće efikasnosti FN modula, postoji veliki broj MPPT algoritama za zadatkom određivanja radne tačke pri kojoj se dobija najveća moguća izlazna snaga FN modula. Ovdje usvojeni MPPT algoritam je zasnovan na tehnici P&O [104] koji je i najčešće korišćen. Usvojena vrijednosti za korak promjene napona je 0.2 V .

Dobijeni rezultati se baziraju na 10 minutnim realnim podacima o insolaciji i temperaturi vazduha u blizini grada Negotina u Srbiji. Usvojena vrijednost za vrijeme semplovanja P&O je 0.2 s.

6.3. Model FN modula sa uvažavanjem vremenske konstante zagrijavanja FN modula

Jednačina bilansa toplote za FN modula kao homogenog tijela je [18]:

$$S \cdot C_{TH} \cdot \frac{dT}{dt} = I - P_{pv} - Q_{conv} \quad (6.4)$$

gdje je S površina FN modula, C_{TH} je termički kapacitet FN modula, P_{pv} je električna snaga na priključcima FN modula i Q_{conv} predstavlja toplotu koja se odvodi konvekcijom.

Gubici koji nastaju odvođenjem toplote konvekcijom su posledica razlike temperatura FN modula i temperature ambijenta. Oni su računati prema sljedećoj formuli:

$$Q_{conv} = S \cdot h_{conv} \cdot (T - T_{amb}), \quad (6.5)$$

gdje h_{conv} predstavlja koeficijent odvođenja toplote konvekcijom. Postoje različiti izrazi za određivanje koeficijenta h_{conv} , ali većina njih je linearna zavisnost od brzine vjetra [17].

Uvrštavajući rješenje diferencijalne jednačine (6.3) i izraze (6.4) i (6.5), zavisnost temperature FN modula od vremena je:

$$T(t) = \left[1 - e^{-\left(\frac{h_{conv} \cdot t}{C_{TH}}\right)} \right] \cdot \frac{\alpha \cdot S \cdot E - P_{PV}}{S \cdot h_{conv}} + T_{amb}, \quad (6.6)$$

Definisanjem vremenske konstante zagrijavanja (τ) kao C_{TH}/h_{conv} i temperature FN modula u stacionarnom stanju kao $T_{stac} = \frac{\alpha \cdot S \cdot E - P_{PV}}{S \cdot h_{conv}}$, prethodni izraz se može zapisati kao:

$$T_{PV}(t) = (1 - e^{-t/\tau}) \cdot T_{stac} + T_{amb}, \quad (6.7)$$

U radu [17] prikazan je detaljan postupak određivanja vremenske konstante zagrijavanja FN modula koristeći ekvivalentno RC kolo. Vrijednosti izmjerenih vremenskih konstanti zagrijavanja FN modula iznose 6.38 min pri brzini vjetra od 0.77 m/s, odnosno 3.96 min pri brzini vjetra 5.76 m/s. Slično tome, u radu [18] računata je vremenska konstanta zagrijavanja FN modula postavljenih na krovovima stambenih objekata pri različitim vrijednostima iradijacije, brzine vjetra i temperature ambijenta. Zaključak istraživanja sprovedenih u radu [18] je da je vrijednost vremenske konstante zagrijavanja FN modula u širokim granicama od 5 min pa do čak 20 min.

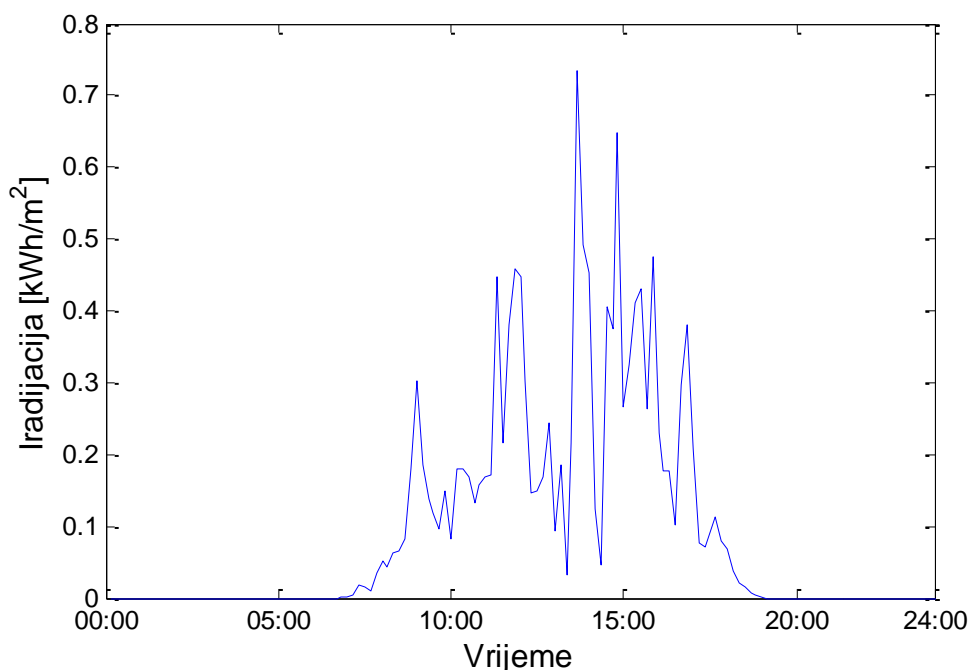
Ako se iskoristi široko primjenjivana relacija (6.3) za procjenu temperature FN modula u stacionarnom stanju i uvrsti u jednačinu (6.7), tada se dobija da je temperatura FN modula koji prethodno nije bilo zagrijan, odnosno izložen Suncu:

$$T(t) = (1 - e^{-t/\tau}) \cdot \left(\frac{NOCT - 20^\circ}{0.8} \right) \cdot I + T_{amb}. \quad (6.14)$$

Imajući u vidu da se vremenska konstanta zagrijavanja FN modula mijenja u širokim granicama, korišćenjem prethodne relacije se može jednostavno ispitati njen uticaj na izlazne karakteristike FN modula.

6.4. Numeričke simulacije i diskusija rezultata

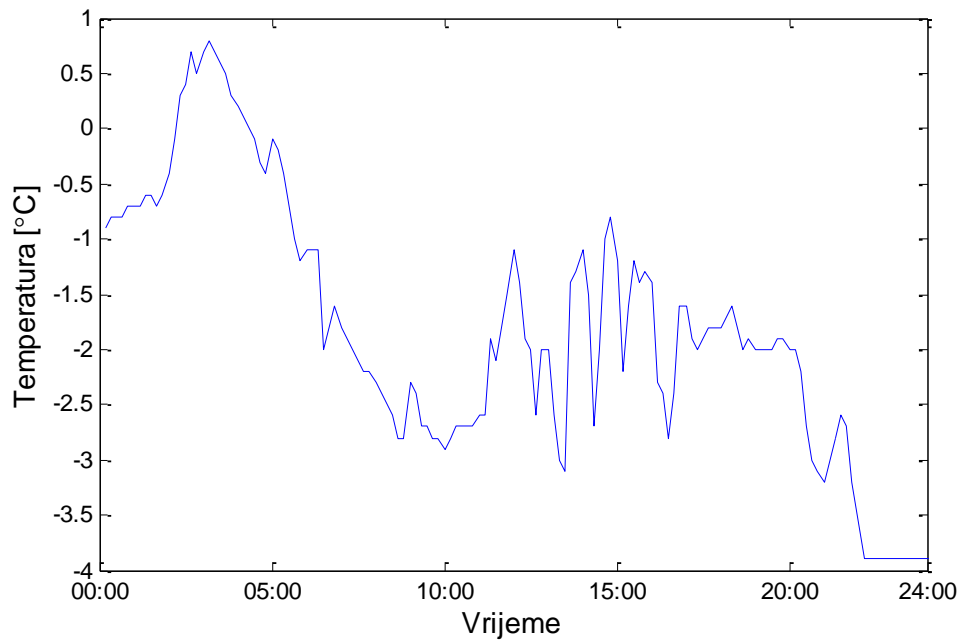
Uticaj vremenske konstante zagrijavanja FN modula na dinamiku FN modula je ispitan koristeći realne meteo podatke sa 20 minutnom rezolucijom. Podaci za FN modul su prikazani u tabeli 6.1. Na slikama 6.3 i 6.4 sa 20 minutnom rezolucijom prikazana su horizontalna iradijacija i temperatura ambijenta za oblačan dan (18.03.2018). Karakteristika promjenljivo oblačnog dana u toku prolječnih dana su relativno velike varijacije dnevne iradijacije.



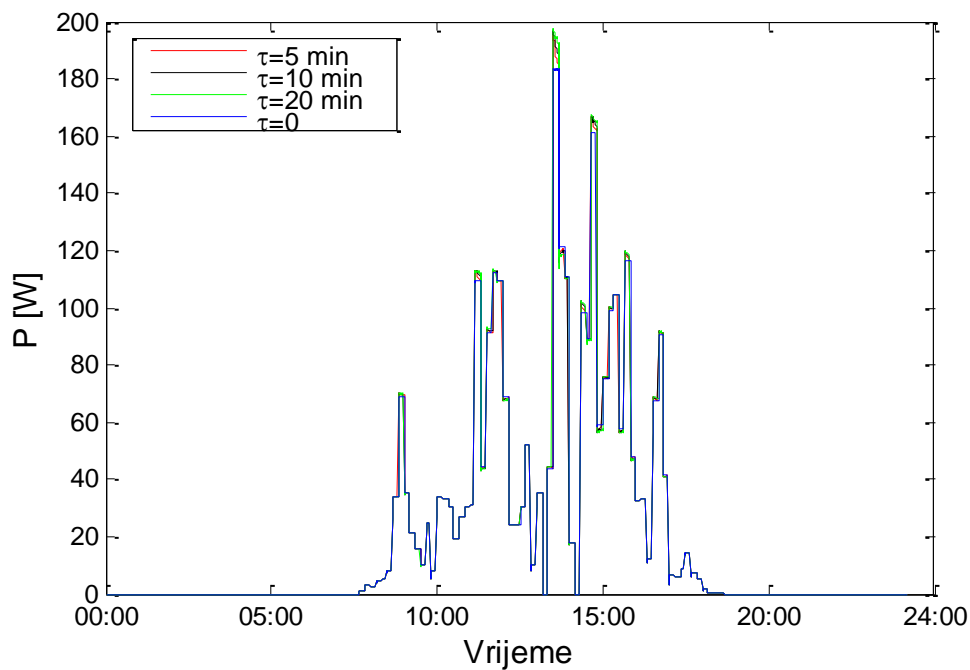
Slika 6.3. Dnevna horizontalna iradijacija za tipično oblačan dan

Uticaj vremenske konstante zagrijavanja FN modula na izlaznu snagu ispitan je za četiri sljedeće vrijednosti τ : 0 min, 5 min, 10 min i 20 min. Takođe, na istoj slici prikazana je izlazna karakteristika postojećeg modela FN modula koji ne obuhvata vremensku konstantu FN modula. Temperatura FN modula je procijenjena na osnovu relacije (6.3). Uticaj vremenske konstante zagrijavanja FN modula na dnevni profil snage je prikazan na slici 6.5.

Slika 6.5 ukazuje da na ukupnu dnevnu proizvedenu električnu energiju FN modula malo utiče vremenska konstanta zagrijavanja FN modula. Međutim, može se uočiti da model FN model koji uključuje vremensku konstantu zagrijavanja FN modula se razlikuje u odnosu na model FN modula bez vremenske konstante zagrijavanja po pikovima koji se javljaju prilikom nagle promjene iradijacije koja pada na FN modul što se u praksi dešava kada posle dužeg oblačnog perioda progrije Sunce i hladan panel bude osvjetljen sa punom iradijacijom.

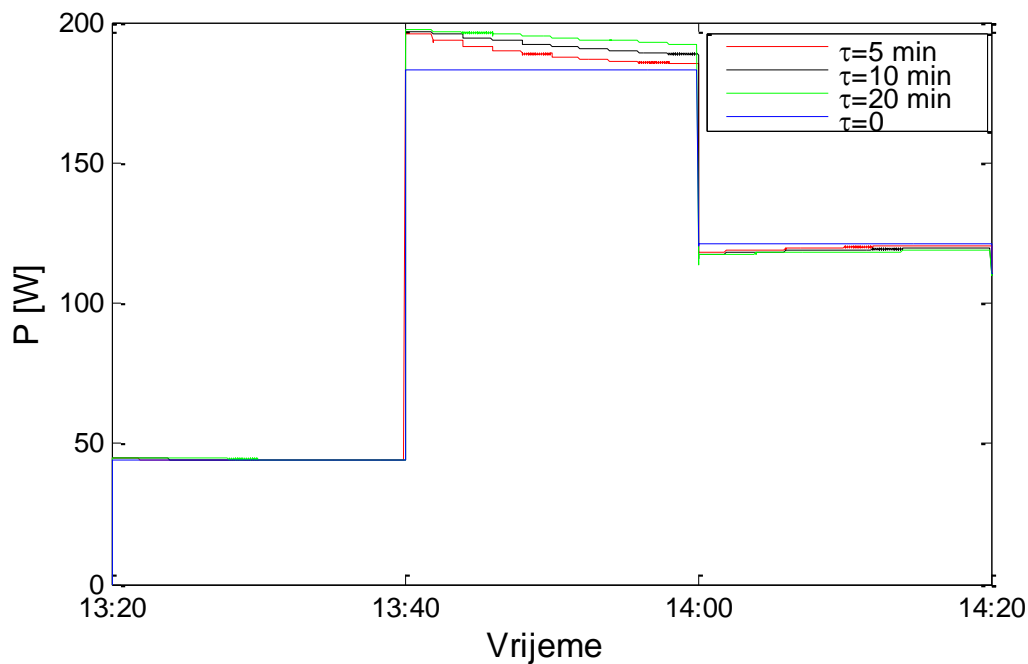


Slika 6.4. Ambijentalna temperatura za analizirani promjenljivo oblačan dan



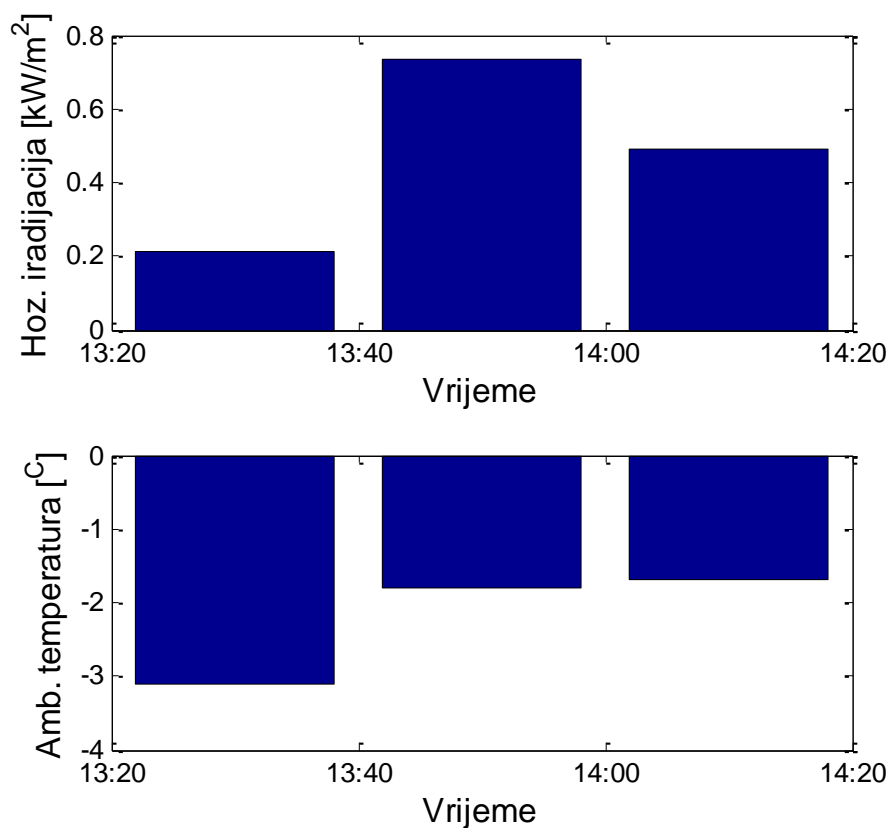
Slika 6.5. Izlazna dnevna snaga FN modula za nekoliko vrijednosti vremenske konstante zagrijavanja modula

Slika 6.5 ukazuje da se dobijaju veći udari snage sa modelom FN modula koji obuhvata vremensku konstantu zagrijavanja FN modula u odnosu model FN modula koji ne uzima u obzir vremensku konstantu zagrijavanja FN modula. Da bi se bolje uočio uticaj vremenske konstante zagrijavanja FN modula, na slici 6.6 je prikazana promjena snage za različite vrijednosti vremenskih konstanti zagrijavanja FN modula za period od 13:40 h do 14:20 h, dok su na slici 6.7 prikazane horizontalna iradijacija i temperatura ambijenta za posmatrani period vremena.



Slika 6.6. Izlazna snaga FN modula za oblačni dan za period od 13:20 h do 14:20 h

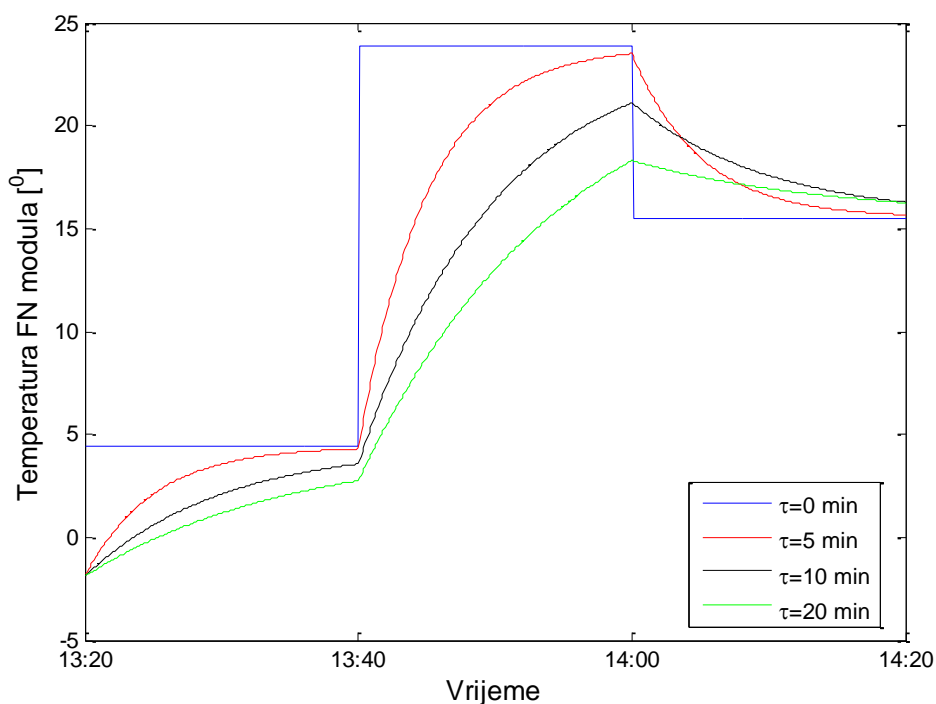
Slika 6.6 ukazuje da se sa manjom vremenskom konstantom zagrijavanja FN modula dobijaju veći udari odnosno propadi snage. Glavni uzrok navedenih udara odnosno propada napona su nagle promjene iradijacije.



Slika 6.7. Horizontalna iradijacija i temperatura ambijenta za oblačan dan u periodu od 13:20 h i 14:20 h

Varijacije ambijentalne temperature na 20 minutnom periodu su značajno manje. Trenutak oko 13:40 h predstavlja period dana kada postoje uslovi da se javi najveći udar snage. Naime, jasno je da će se najveći uticaj temperature na FN modul na udar snage javiti kada imamo povećanje iradijacije i temperature u odnosu na prethodni vremenski trenutak.

Sa slike 6.7 se vidi da se u 13:40 h značajno povećala iradijacija, dok se ambijentalna temperatura relativno malo povećala u odnosu na 13:20 h. Uticaj vremenske konstante za oblačan dan je lakše shvatiti uz sliku 6.8 na kojoj je prikazana temperatura FN modula za analizirani period.



Slika 6.8. Temperatura FN modula za vedar dan u period od 13:20 h do 14:20 h

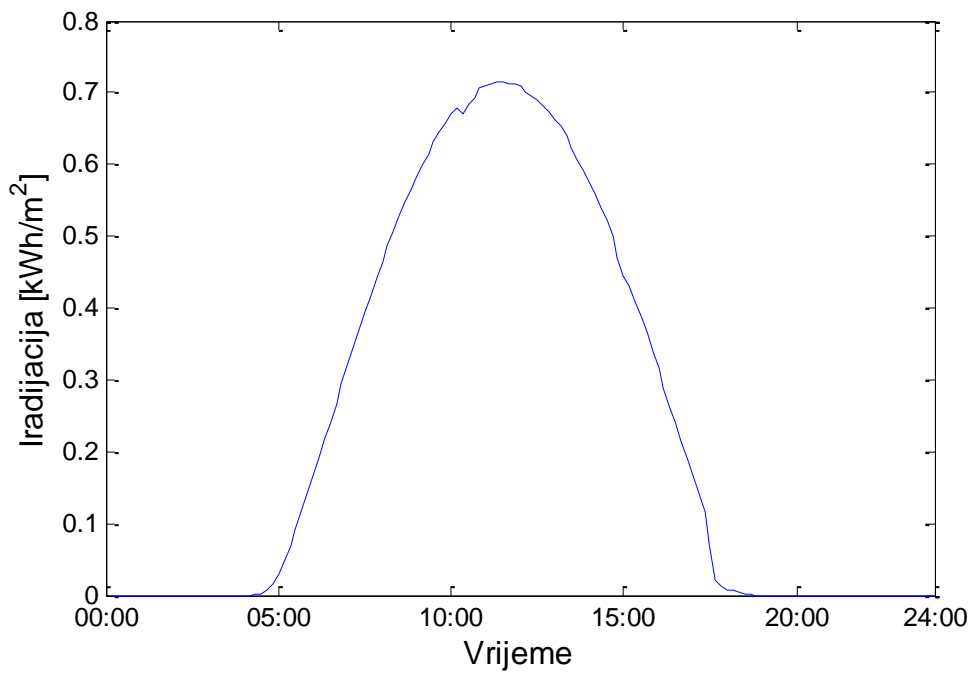
U periodima dana kada postoji veliki skok iradijacije, FN modul se zbog vremenske konstante zagrijavanja modula biti manje zagrijan u tom trenutku. Shodno tome, u tom trenutku se javlja skok izlazne snage FN modula.

Rezultati ukazuju da postoji značajno odstupanje između predloženog modela FN modula koji obuhvata vremensku konstantu zagrijavanja i postojećeg modela FN modula. Što je manja vrijednost vremenske konstante zagrijavanja FN modula dobija se veće odstupanje između predloženog i postojećeg modela FN modula. Međutim, važno je naglasiti da se i pri većoj vrijednosti vremenske konstante zagrijavanja FN modula, dobijaju udari snage koji su značajno veći u odnosu na bazični model.

Slika 6.6 ukazuje da je propad snage u 14:00 h značajno manji u odnosu na skok snage u 13:40 h. Razlozi za to su male promjene iradijacije a pogotovo ambijentalne temperature u 14:00h, slika 6.7. Rezultati prikazani na slici 6.6 vode ka zaključku da se sa postojećim modelom FN modulom koji ne obuhvata vremensku konstantu zagrijavanja FN modula dobija manja izlazna snaga pri skokovima iradijacije i ambijentalne temperature, odnosno veća snaga u trenucima naglog smanjenja iradijacije i temperature u odnosu na stvarne vrijednosti.

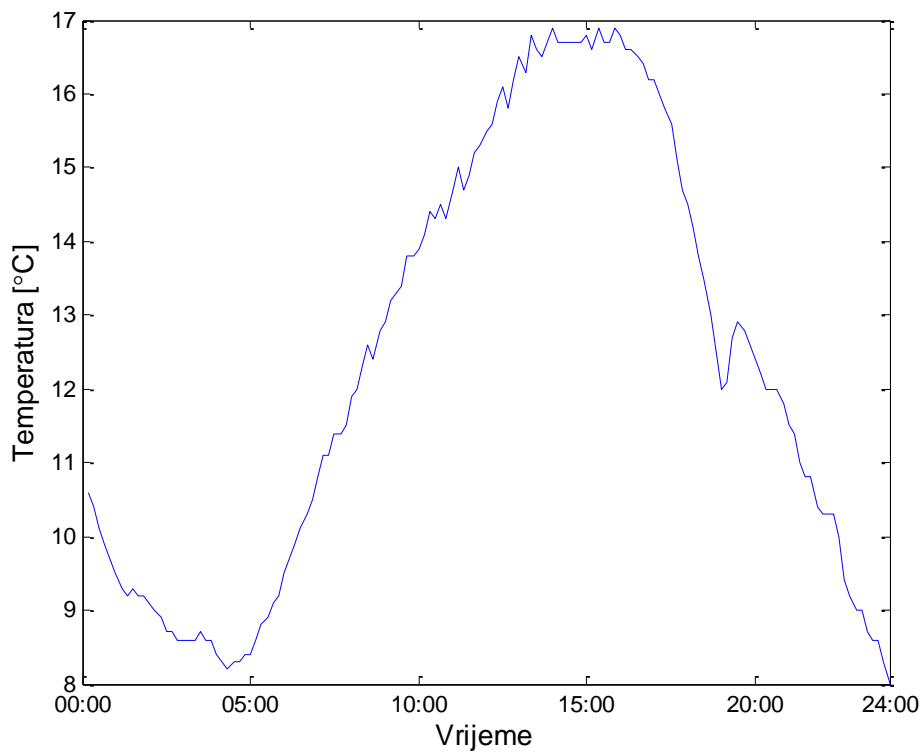
Na slikama 6.9 i 6.10 sa 20 minutnom rezolucijom prikazana su horizontalna iradijacija i temperatura ambijenta za jedan vedar dan (26.04.2018). Poznato je da vedar dan karakterišu značajno manje promjene iradijacije u odnosu na oblačan dan. Ambijentalna temperatura u toku

vedrog dana takođe ima značajno manjih varijacija u odnosu na ambijentalnu temperaturu u toku oblačnog dana.

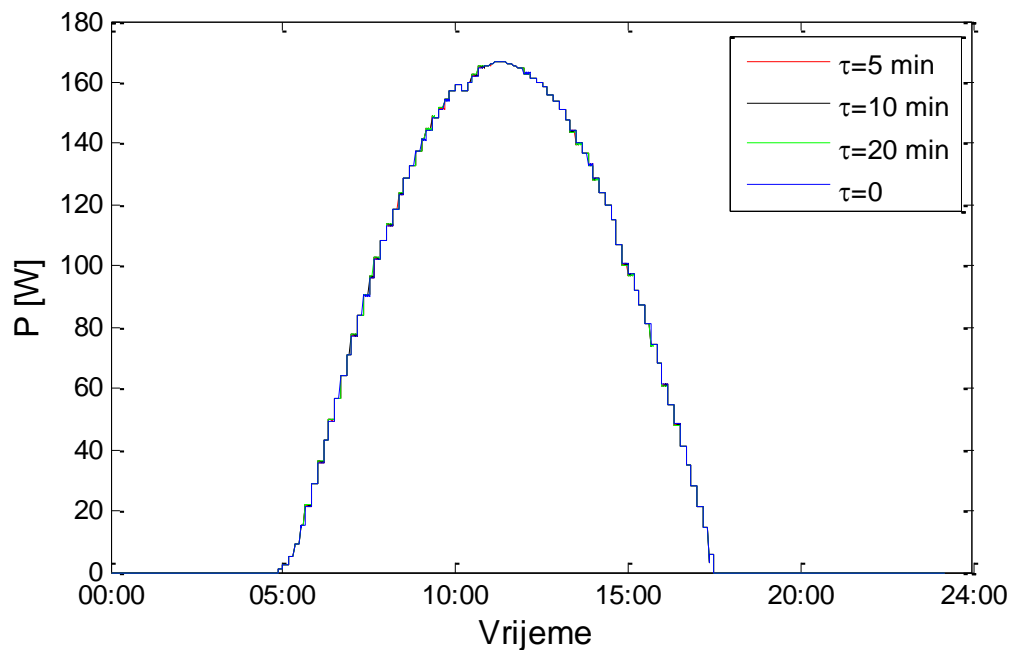


Slika 6.9. Dnevna horizontalna iradijacija za tipično vedar dan

Na slici 6.11 prikazana je promjena izlazne snage FN panela koji obuhvata uticaj vremenske konstante zagrijavanja FN panela.



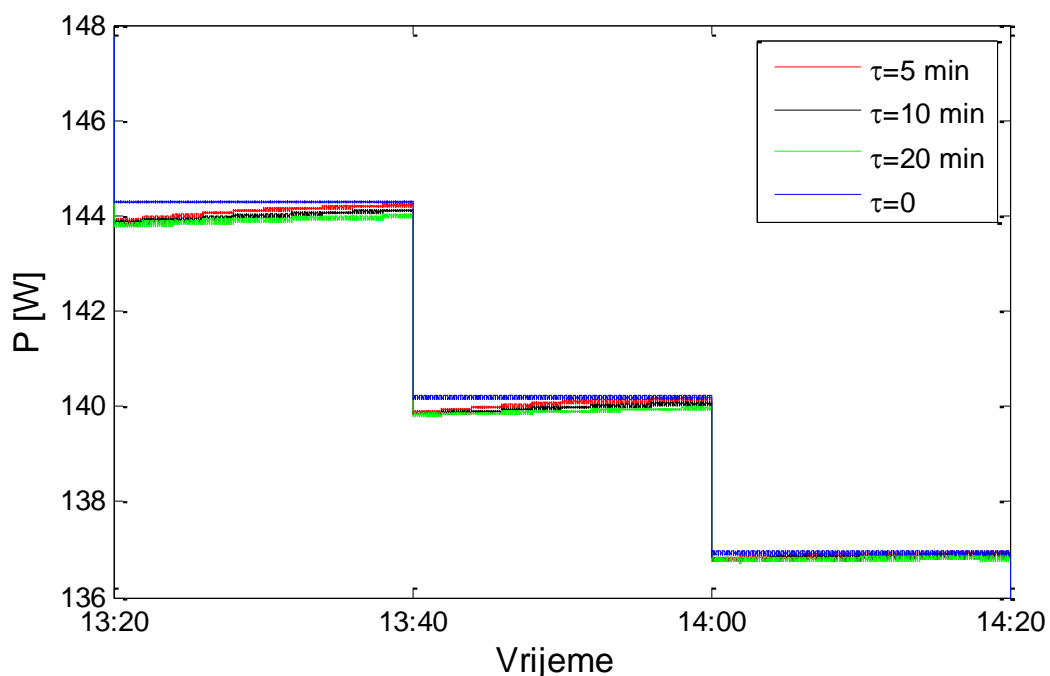
Slika 6.10. Ambijentalna temperatura za vedar dan



Slika 6.11. Izlazna dnevna snaga FN modula za nekoliko vrijednosti vremenske konstante zagrijavanja modula

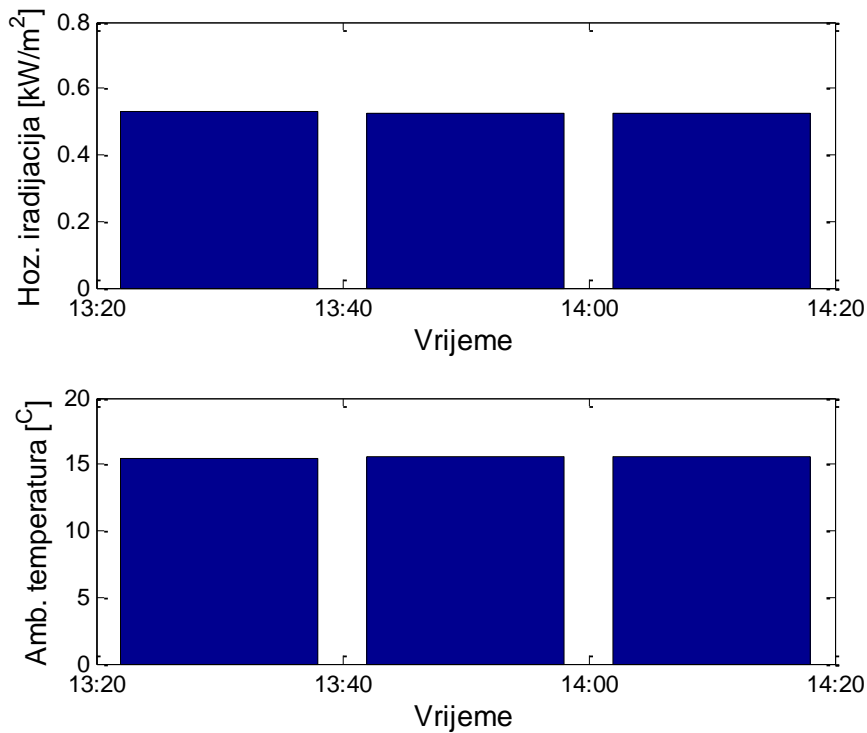
Slika 6.11 vodi ka zaključku da je uticaj vremenske konstante zagrijavanja FN modula na izlaznu snagu FN modula u toku vedrog dana praktično zanemarljiv.

Na slici 6.12 prikazan je izlazna snaga FN modula za period 13:20 h do 14:20 h, dok je na slici 6.13 prikazana iradijacija koja pada na FN modula i ambijentalna temperatura za taj period.



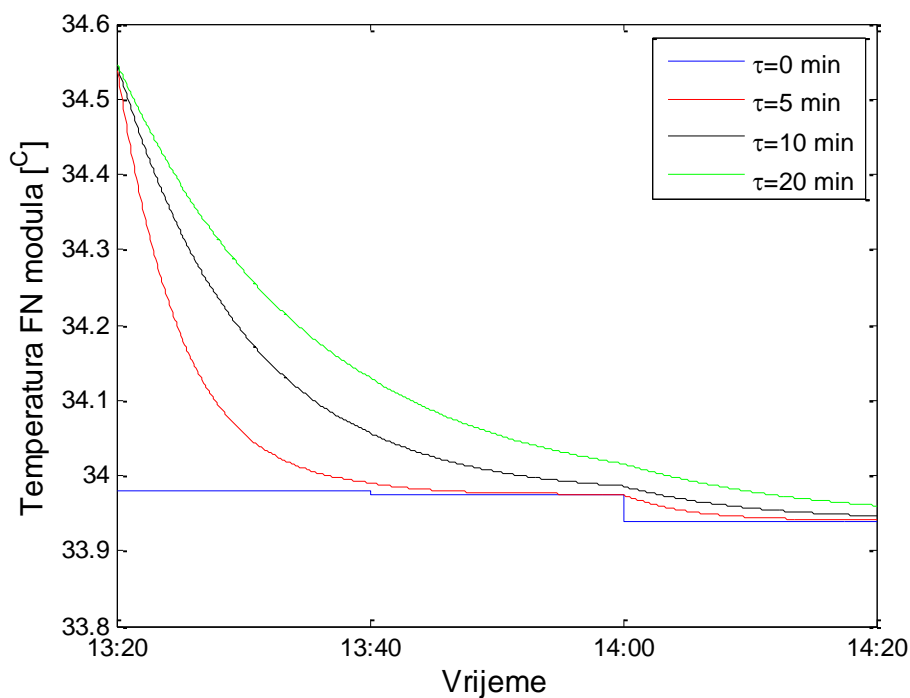
Slika 6.12. Izlazna snaga FN modula za vedar dan od 13.40 h do 14.20 h

Slike 6.12 i 6.13 potvrđuju prethodni zaključak da kada nema velikih promjena iradijacije i ambijentalne temperature tada se uticaj vremenske konstante zagrijavanja FN modula na izlaznu snagu modula može zanemariti.



Slika 6.13. Horizontalna iradijacija i temperatura ambijenta za vedar dan u periodu od 13:20 h i 14:20 h

Na slici 6.14 prikazana je promjena temperature FN modula u toku vedrog dana za analizirani period od 13:20 h do 14:20 h.



Slika 6.14. Temperatura FN modula za vedar dan u period od 13:20 h do 14:20 h

Sa slike 6.14 se može uočiti da postoje relativno male varijacije temperature FN modula jer nema naglih promjena vrijednosti iradijacije. Samim tim skokovi, odnosno propadi izlazne snage FN modula nijesu izraženi.

7. Zaključak

Negativni efekti, posebno ekološki, pri primjeni fosilnih goriva, kao primarnog energenta za dobijanje električne energije, podstakao je istraživanja o mogućnostima dobijanja električne energije iz alternativnih izvora. Ekološki prihvatljivi su se nametnuli obnovljivi izvori energije, od kojih se posebno u poslednjih desetak godina izdvojile FN elektrane. Ovake elektrane, tipične za evropski kontinent, su prepoznate kao jedan od budućih glavnih izvora električne energije a sa druge strane kao i efikasno rješenje za smanjenje emisije CO₂ gasa, što predstavlja motivaciju za dalja istraživanja. U ovoj disertaciji je predstavljeno unapređenje postojećih koncepata FN elektrana i metoda za precizniju procjenu tehno-ekonomskih indikatora FN elektrana. Razmatrane su FN elektrane velike snage za čije projektovanje i eksploataciju je dominantno vezan problem male efikasnosti FN elektrane. Naime, imajući u vidu relativno malu gustinu snage FN elektrana, kao i činjenicu da negativan uticaj temperature dolazi do izražaja u vidu smanjenja proizvodnje kod velikih FN elektrana jasno je da se navedeni tehnički problemi preslikavaju i na ekonomsku isplativost FN elektrana. Drugačije rečeno, imperativ koji se i dalje nameće kod FN elektrana velike snage je povećanje efikasnosti.

U ovoj disertaciji su predstavljeni koncepti dizajna FN elektrana koji omogućavaju efikasniju konverziju sunčeve u električnu energiju a time i poboljšanje tehno-ekonomskih indikatora u odnosu na postojeća rješenja FN elektrana. Pored toga, u disertaciji je predstavljen novi analitički matematički model za proračun iradijacije baziran na realnim fizičkim karakteristikama FN elektrane. U prvom poglavlju dat je uvod, dok je u drugom poglavlju dat sažet prikaz karakteristika trenutnih i budućih FN elektrana. Glavni doprinosi disertacije su sadržani u poglavljima 3-6.

U trećem poglavlju prikazano je idejno rješenje za povećanje efikasnosti PFN elektrana. PFN elektrane u odnosu na FN elektrane instalisane na kopnu predstavljaju efikasnije rješenje u smislu smanjenja uzurpacije aktivnog zemljišta i smanjenja negativnog uticaja temperature ambijenta na FN konverziju. U ovoj disertaciji predstavljeno je moguće rješenje kroz koncept RPFN elektrane. Takav koncept, zasnovan na platformi koja omogućava praćenje azimutnog ugla Sunca ima za posljedicu veću proizvodnju FN elektrana instalisanih na vodi umjesto dosadašnjih rješenja za PFN elektrane. Komparativna analiza, koja potvrđuje efikasnost predloženog rješenja, je sprovedena na realnim meteo podacima koji se odnose na Skadarsko jezero. Predloženi koncept RPFN elektrane omogućava veću proizvodnju za 22.38% na godišnjem nivou u odnosu na postojeće koncepte PFN elektrane. Od značaja je napomenuti da se predloženim konceptom RPFN elektrane dobija za 25.84% veća proizvodnja u odnosu na FN elektranu instalisanu na kopnu. Predložena gradnja RPFN elektrane ima dobre ekonomske indikatore ali i značajan doprinos očuvanju Skadarskog jezera jer omogućava smanjenje isparavanja vode na godišnjem nivou u iznosu od 1.67 mil m³. Druga potencijalna lokacija za RPFN elektranu koja je razmatrana u disertaciji je akumulaciono jezero HE Bajina Bašta. Predstavljeno idejno rješenje RPFN elektrane omogućava veći godišnju proizvodnju u iznosu od 21.54% u odnosu na postojeći koncept PFN elektrane. U ovome primjeru je pokazano da instalacija RPFN elektrane omogućava da smanjenje isparavanja vode ima ne samo ekološki već i finansijski efekat. Finansijski benfit za RHE Bajina Bašta zbog smanjenja isparavanja vode je procijenjen na oko 40000 €/god.

U četvrtom poglavlju predstavljeno je rješenje za dalje unapređenje efikasnosti RPFN elektrana upotrebom reflektora. Reflektori postavljeni između FN redova kod velikih FN elektrana zauzimaju velike površine pa uvažavajući imperativ ekonomske isplativosti razmatrani su aluminijumski reflektori. Analitičkom metodom proračuna iradijacije, predstavljenom u ovoj disertaciji, a koja je prilagođena predloženom konceptu elektrane, omogućava se da se na relativno brz i jednostavan način izračuna moguća godišnja proizvodnja elektrane. Tehno-ekonomska analiza je pokazala da reflektori koji su sastavljeni od aluminijumskih ploča i folija mogu biti potencijalno rješenje za

povećanje efikasnosti RPFN elektrana. Karakteristike proizvodnje RPFN elektrane za dva scenarija koja podrazumijevaju dva reflektora sa različitim refleksionim karakteristikama su detaljno ispitane. Na osnovu sprovednih analiza zaključeno je da reflektor sa većim koeficijentom direktne refleksije omogućava veću proizvodnju RPFN elektrane na godišnjem nivou. Dobijeni rezultati ukazuju da je moguće za određene nagibne uglove FN redova i rastojanja između FN redova postići veću proizvodnju od 13% do 25% RPFN elektrane sa reflektorima u odnosu na RPFN elektranu bez reflektora. S obzirom na to da se radi o relativno jeftinim reflektorima, pokazano je da takve RPFN elektrane omogućavaju manju cijenu proizvedenog kWh električne energije u odnosu na RPFN elektranu bez reflektora. Za tipičnu vrijednost nagibnog ugla FN redova u iznosu od 40° i rastojanje između FN redova od 10 m dobija se da je cijena proizvedenog kWh električne energije RPFN elektrane sa reflektorom manja za 4.95% u odnosu na RPFN elektranu bez reflektora.

U petom poglavlju je predstavljen novi analitički model za proračun iradijacije koji posebno dolazi do izražaja kod FN elektrana sa bFN modulima. Ovaj model uzima u obzir činjenicu da na rastojanje između bFN redova, koje kod velikih bFN elektrana može biti relativno veliko, ne pada cjelokupna difuziona horizontalna iradijacija. Napredak u odnosu na postojeći model iradijacije je u proširenju modela iradijacije tako što je uvaženo da na zasjenčeni i nezasjenčeni dio površine između bFN redova ne pada isti iznos iradijacije. Upravo prostor između FN redova je značajan za određivanje doprinosa reflektovane komponente u ukupnoj proizvodnji FN elektrane. Shodno tome, doprinos u razvoju novog analitičkog modela omogućava pouzdanije proračune proizvodnje bFN elektrana sa reflektorima, optimizaciju geometrije i preciznije sagledavanje ekonomske opravdanosti upotrebe horizontalnih reflektora. Precizniji proračun i obuhvatanje navedene fizičke karakteristike vezane sa prostor između bFN redova je izvršeno korišćenjem tehnike segmentacije. Rezultati upućuju na to, da se sa predloženim modelom, koji na tačniji način obuhvata reflektovanu komponentu, dobija manja proizvodnja u odnosu na postojeći široko korišćeni model iradijacije. Odstupanje proizvodnje između predloženog i postojećeg modela zavisi najviše od koeficijenta refleksije podloge između bFN redova i veličine podloge. Za konkretne meteo podatke odstupanje u godišnjoj proizvodnji između predloženog i postojećeg modela od 0.51% do čak 6.57%. Ukoliko se primijeni pristup segmentacije na postojeći i predloženi model iradijacije najmanje odstupanje proizvodnje bFN elektrane iznosi 1.45% a najveće 21.26%. Za određene vrijednosti nagibnog ugla bFN redova i rastojanja između bFN redova ($\Sigma=42^{\circ}$ i $D=12$ m) a pri koeficijentu refleksije podloge između bFN redova u iznosu 0.6 učešće reflektovane komponente sunčevog zračenja koje pada na zadnju stranu bFN panela u ukupnoj iradijaciji iznosi 12.66% u mjesecu maju. Prepoznavajući značaj reflektovane komponente sunčevog zračenja kod bFN elektrane sprovedena je analiza sa ciljem određivanja maksimalne cijene reflektora pri kojoj će bFN elektrana imati ekonomsku isplativost. Rezultati ove analize pokazuju da reflektori sa koeficijentom difuzione refleksije od 0.6 i 0.8 su isplativi ako njihova cijena nije veća od 7.4 €/m² i 11.5 €/m², respektivno.

Primjenom novog modela za proračun iradijacije analizirane su tehno-ekonomske karakteristike vFN elektrane orijentisane u pravcu istok-zapad. Veliki broj lokacija vFN elektrane odlikuje manja godišnja proizvodnja u odnosu na mFN elektrane orijentisane prema jugu, ali njihov prosječni dnevni dijagram proizvodnje je u značajnoj mjeri u većem stepenu korelacije sa dijagramom potrošnje nego što se postiže sa južno orijentisanim mFN elektrana. U ovome radu je izvršena komparativna analiza vFN elektrane, orijentisana u pravcu istok-zapad, sa mFN elektranom koja je orijentisana prema jugu na tipično planinskoj lokaciji. Pokazano je da usljed zadržavanja snijega na modulima mFN elektrane, proizvodnja vFN je manja od 1% do 7% u odnosu na mFN elektranu.

U šestom poglavlju disertacije dat je model za proračun izlazne snage FN modula koji uvažava termičku vremensku konstantu zagrijavanja FN modula. Karakteristika FN modula kao i svih fizičkih tijela je da ima određenu vremensku konstantu zagrijavanja. Upravo, inkorporiranje ove vremenske konstante zagrijavanja u postojeći opšte prihvaćen model FN modula je predstavljeno u ovom poglavlju. Koristeći rezultate dostupne u literaturi pokazano je da vremenska konstanta zagrijavanja FN modula ima izražen uticaj na izlaznu snagu posebno tokom oblačnih dana. Naime,

utvrđeno je da tokom dana sa velikim oscilacijama iradijacije i ambijentalne temperature, javljaju se udari odnosno propadi izlazne snage ako se obuhvati vremenska konstanta zagrijavanja FN modula. Dobijeni rezultati u ovom poglavlju mogu se koristiti za temeljnije i preciznije sagledavanje uticaja integracije FN elektrana u elektroenergetski sistem.

LITERATURA

- [1] "Statistics Time Series," */Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series. /Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series* (accessed Jun. 12, 2020).
- [2] "Technologies," */Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Technologies. /Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Technologies* (accessed Jun. 12, 2020).
- [3] "Electricity production by source, EU-27, 2019 (%).png - Statistics Explained." [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Electricity_production_by_source,_EU-27,_2019_\(%25\).png](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Electricity_production_by_source,_EU-27,_2019_(%25).png) (accessed Oct. 11, 2020).
- [4] P. Ranjbaran, H. Yousefi, G. B. Gharehpetian, and F. R. Astaraei, "A review on floating photovoltaic (FPV) power generation units," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 110, pp. 332–347, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.05.015.
- [5] N. Martín-Chivelet, "Photovoltaic potential and land-use estimation methodology," *Energy*, vol. 94, pp. 233–242, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.energy.2015.10.108.
- [6] K. Trapani and M. R. Santafé, "A review of floating photovoltaic installations: 2007–2013," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 23, no. 4, pp. 524–532, 2015, doi: 10.1002/pip.2466.
- [7] C. Ferrer-Gisbert, J. J. Ferrán-Gozálvez, M. Redón-Santafé, P. Ferrer-Gisbert, F. J. Sánchez-Romero, and J. B. Torregrosa-Soler, "A new photovoltaic floating cover system for water reservoirs," *Renewable Energy*, vol. 60, pp. 63–70, Dec. 2013, doi: 10.1016/j.renene.2013.04.007.
- [8] V. Durković and Ž. Đurišić, "Analysis of the Potential for Use of Floating PV Power Plant on the Skadar Lake for Electricity Supply of Aluminium Plant in Montenegro," *Energies*, vol. 10, no. 10, p. 1505, Oct. 2017, doi: 10.3390/en10101505.
- [9] S. L. Grassie and N. R. Sheridan, "The use of planar reflectors for increasing the energy yield of flat-plate collectors," *Solar Energy*, vol. 19, no. 6, pp. 663–668, 1977, doi: 10.1016/0038-092X(77)90027-5.
- [10] R. Baccoli, A. Frattolillo, C. Mastino, S. Curreli, and E. Ghiani, "A comprehensive optimization model for flat solar collector coupled with a flat booster bottom reflector based on an exact finite length simulation model," *Energy Conversion and Management*, vol. 164, pp. 482–507, May 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.02.091.
- [11] V. Durković and Ž. Đurišić, "Extended model for irradiation suitable for large bifacial PV power plants," *Solar Energy*, vol. 191, pp. 272–290, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.08.064.
- [12] S. Y. Alsadi and Y. F. Nassar, "Estimation of Solar Irradiance on Solar Fields: An Analytical Approach and Experimental Results," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 8, no. 4, pp. 1601–1608, Oct. 2017, doi: 10.1109/TSTE.2017.2697913.
- [13] J. Appelbaum, "The role of view factors in solar photovoltaic fields," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 161–171, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.07.026.
- [14] A. Cuevas, A. Luque, J. Eguren, and J. del Alamo, "50 Per cent more output power from an albedo-collecting flat panel using bifacial solar cells," *Solar Energy*, vol. 29, no. 5, pp. 419–420, Jan. 1982, doi: 10.1016/0038-092X(82)90078-0.
- [15] R. Kopecek and J. Libal, "Towards large-scale deployment of bifacial photovoltaics," *Nat Energy*, vol. 3, no. 6, pp. 443–446, Jun. 2018, doi: 10.1038/s41560-018-0178-0.
- [16] M. A. Hasan and S. K. Parida, "An overview of solar photovoltaic panel modeling based on analytical and experimental viewpoint," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 60, pp. 75–83, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.01.087.
- [17] S. Armstrong and W. G. Hurley, "A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions," *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, no. 11, pp. 1488–1495, Aug. 2010, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2010.03.012.
- [18] D. Kurz and R. Nawrowski, "Thermal Time Constant of PV Roof Tiles Working under Different Conditions," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 8, Art. no. 8, Jan. 2019, doi: 10.3390/app9081626.

- [19] A. Sahu, N. Yadav, and K. Sudhakar, "Floating photovoltaic power plant: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 66, pp. 815–824, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.08.051.
- [20] K. Trapani and D. L. Millar, "Proposing offshore photovoltaic (PV) technology to the energy mix of the Maltese islands," *Energy Conversion and Management*, vol. 67, pp. 18–26, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.enconman.2012.10.022.
- [21] S.-M. Kim, M. Oh, and H.-D. Park, "Analysis and Prioritization of the Floating Photovoltaic System Potential for Reservoirs in Korea," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 3, p. 395, Jan. 2019, doi: 10.3390/app9030395.
- [22] M. Kumar and A. Kumar, "Performance Assessment of Different Photovoltaic Technologies for Canal-Top and Reservoir Applications in Subtropical Humid Climate," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 9, no. 3, pp. 722–732, May 2019, doi: 10.1109/JPHOTOV.2019.2892520.
- [23] P. E. Campana, L. Wästhage, W. Nookuea, Y. Tan, and J. Yan, "Optimization and assessment of floating and floating-tracking PV systems integrated in on- and off-grid hybrid energy systems," *Solar Energy*, vol. 177, pp. 782–795, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.solener.2018.11.045.
- [24] "Hydrelio®: the floating PV made simple – Ciel et Terre," *Ciel et Terre International*. <https://www.ciel-et-terre.net/hydrelio-floating-solar-technology/hydrelio-products/> (accessed Apr. 02, 2020).
- [25] "World's largest floating solar plant connected in China," *PV Tech*. <https://www.pv-tech.org/news/worlds-largest-floating-solar-plant-connected-in-china> (accessed Mar. 31, 2020).
- [26] "AZALEALAN: 1,845 kWp," *Ciel et Terre International*. <https://www.ciel-et-terre.net/project/azalealaan-1845-kwp/> (accessed Apr. 02, 2020).
- [27] M. T. Patel, M. R. Khan, X. Sun, and M. A. Alam, "A worldwide cost-based design and optimization of tilted bifacial solar farms," *Applied Energy*, vol. 247, pp. 467–479, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.03.150.
- [28] C. D. Rodríguez-Gallegos, M. Bieri, O. Gandhi, J. P. Singh, T. Reindl, and S. K. Panda, "Monofacial vs bifacial Si-based PV modules: Which one is more cost-effective?," *Solar Energy*, vol. 176, pp. 412–438, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.10.012.
- [29] U. A. Yusufoglu, T. M. Pletzer, L. J. Koduvelikulathu, C. Comparotto, R. Kopecek, and H. Kurz, "Analysis of the Annual Performance of Bifacial Modules and Optimization Methods," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 5, no. 1, pp. 320–328, Jan. 2015, doi: 10.1109/JPHOTOV.2014.2364406.
- [30] H. O. R. Howlader, M. M. Sediqi, A. M. Ibrahim, and T. Senjyu, "Optimal Thermal Unit Commitment for Solving Duck Curve Problem by Introducing CSP, PSH and Demand Response," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 4834–4844, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2790967.
- [31] G. M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. John Wiley & Sons, 2013.
- [32] Ž. Đurišić, N. Arsenijević, V. Durković, I. Stamenić, and D. Vasić, "Uslovi razvoja projekta plivajuće fotonaponske elektrane na akumulacionom jezeru RHE Bajina Bašta," presented at the CIGRE Srbija, Zlatibor, Jun. 2017.
- [33] "OffshoreHydromechanics_Journee_Massie.pdf." Accessed: Mar. 31, 2020. [Online]. Available: https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/OffshoreHydromechanics_Journee_Massie.pdf.
- [34] S. B. P. P. Kumar, "CFD analysis of wind pressure over solar panels at different orientations of placement," *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*, vol. 02, no. 07, Jul. 2014.
- [35] M. Redón Santafé, J. B. Torregrosa Soler, F. J. Sánchez Romero, P. S. Ferrer Gisbert, J. J. Ferrán Gozálviz, and C. M. Ferrer Gisbert, "Theoretical and experimental analysis of a floating photovoltaic cover for water irrigation reservoirs," *Energy*, vol. 67, pp. 246–255, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.01.083.
- [36] "JIS C 8955:2011 - Design guide on structures for photovoltaic array (Foreign Standard)." <https://webstore.ansi.org/standards/jis/jis89552011> (accessed Apr. 02, 2020).
- [37] M. Shademan and H. Hangan, "Wind Loading on Solar Panels at Different Inclination Angles," p. 9.
- [38] W. P. Warsido, G. T. Bitsuamlak, J. Barata, and A. Gan Chowdhury, "Influence of spacing parameters on the wind loading of solar array," *Journal of Fluids and Structures*, vol. 48, pp. 295–315, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.jfluidstructs.2014.03.005.
- [39] "PVWatts Calculator." <https://pvwatts.nrel.gov/> (accessed Mar. 22, 2021).
- [40] V. Quaschnig, *Understanding Renewable Energy Systems*. Routledge, 2016.

- [41] F. Schiro, A. Benato, A. Stoppato, and N. Destro, "Improving photovoltaics efficiency by water cooling: Modelling and experimental approach," *Energy*, vol. 137, pp. 798–810, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.04.164.
- [42] D. Vanhoudt, D. Geysen, B. Claessens, F. Leemans, L. Jespers, and J. Van Bael, "An actively controlled residential heat pump: Potential on peak shaving and maximization of self-consumption of renewable energy," *Renewable Energy*, vol. 63, pp. 531–543, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.renene.2013.10.021.
- [43] R. Baetens *et al.*, "Assessing electrical bottlenecks at feeder level for residential net zero-energy buildings by integrated system simulation," *Applied Energy*, vol. 96, pp. 74–83, Aug. 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.12.098.
- [44] S.-H. Kim, S.-J. Yoon, and W. Choi, "Design and Construction of 1 MW Class Floating PV Generation Structural System Using FRP Members," *Energies*, vol. 10, no. 8, Art. no. 8, Aug. 2017, doi: 10.3390/en10081142.
- [45] M. Hammad, M. S. Y. Ebaid, G. Halaseh, and B. Erekat, "Large Scale Grid Connected (20MW) Photovoltaic System for Peak Load Shaving in Sahab Industrial District," vol. 9, no. 1, p. 15, 2015.
- [46] "re_technologies_cost_analysis-solar_pv.pdf." Accessed: Apr. 04, 2020. [Online]. Available: https://www.irena.org/documentdownloads/publications/re_technologies_cost_analysis-solar_pv.pdf.
- [47] "Capital Cost Estimates for Utility Scale Electricity Generating Plants," p. 141, 2016.
- [48] "Utility-Scale Solar 2013: An Empirical Analysis of Project Cost, Performance, and Pricing Trends in the United States." <https://escholarship.org/uc/item/7wd7r8cm> (accessed Mar. 31, 2020).
- [49]. Javno preduzeće Nacionalni parkovi Crne Gore, "Plan upravljanja - Nacionalni park Skadarsko jezero 2011-2015." .
- [50] Službeni list Republike Crne Gore, br. 47/91,17/92, 27/94., "Zakon o Nacionalnim parkovima Crne Gore." .
- [51] "Natural evaporation from open water, bare soil and grass | Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences." <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rspa.1948.0037> (accessed Apr. 04, 2020).
- [52] J. D. Valiantzas, "Simplified versions for the Penman evaporation equation using routine weather data," *Journal of Hydrology*, vol. 331, no. 3, pp. 690–702, Dec. 2006, doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.06.012.
- [53] "JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission." https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html (accessed Apr. 07, 2020).
- [54] R. Baccoli *et al.*, "A Mathematical Model of a Solar Collector Augmented by a Flat Plate above Reflector: Optimum Inclination of Collector and Reflector," *Energy Procedia*, vol. 81, pp. 205–214, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.12.085.
- [55] G. E. Ahmad and H. M. S. Hussein, "Comparative study of PV modules with and without a tilted plane reflector," *Energy Conversion and Management*, vol. 42, no. 11, pp. 1327–1333, Jul. 2001, doi: 10.1016/S0196-8904(00)00139-4.
- [56] Z. T. Pavlović and L. T. Kostić, "Variation of reflected radiation from all reflectors of a flat plate solar collector during a year," *Energy*, vol. 80, pp. 75–84, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.energy.2014.11.044.
- [57] L. T. Kostić and Z. T. Pavlović, "Optimal position of flat plate reflectors of solar thermal collector," *Energy and Buildings*, vol. 45, pp. 161–168, Feb. 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.10.059.
- [58] V. Durković and Ž. Đurišić, "Efficiency increase analysis of large RFPV power plants using reflectors between PV rows," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 12, no. 6, p. 063703, Nov. 2020, doi: 10.1063/5.0020233.
- [59] J. W. Bollenin and R. D. Wilk, "Modeling the solar irradiation on flat plate collectors augmented with planar reflectors," *Solar Energy*, vol. 55, no. 5, pp. 343–354, Nov. 1995, doi: 10.1016/0038-092X(95)00058-Y.
- [60] B. Perers and B. Karlsson, "External reflectors for large solar collector arrays, simulation model and experimental results," *Solar Energy*, vol. 51, no. 5, pp. 327–337, Jan. 1993, doi: 10.1016/0038-092X(93)90145-E.

- [61] A. Dang, "Collector, collector-reflector systems—an analytical and practical study," *Energy Conversion and Management*, vol. 26, no. 1, pp. 33–39, Jan. 1986, doi: 10.1016/0196-8904(86)90028-2.
- [62] R. Cazzaniga, M. Cicu, M. Rosa-Clot, P. Rosa-Clot, G. M. Tina, and C. Ventura, "Floating photovoltaic plants: Performance analysis and design solutions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 1730–1741, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.269.
- [63] C. Deline, "Partially shaded operation of a grid-tied PV system," in *2009 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Philadelphia, PA, USA, Jun. 2009, pp. 001268–001273, doi: 10.1109/PVSC.2009.5411246.
- [64] T. Kerekes, E. Koutroulis, D. Séra, R. Teodorescu, and M. Katsanevakis, "An Optimization Method for Designing Large PV Plants," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 3, no. 2, pp. 814–822, Apr. 2013, doi: 10.1109/JPHOTOV.2012.2230684.
- [65] M. A. A. Mamun, M. Hasanuzzaman, and J. Selvaraj, "Experimental investigation of the effect of partial shading on photovoltaic performance," *IET Renewable Power Generation*, vol. Volume 11, pp. 912–921, Jun. 2017, doi: 10.1049/iet-rpg.2016.0902.
- [66] J. Appelbaum and J. Bany, "Shadow effect of adjacent solar collectors in large scale systems," *Solar Energy*, vol. 23, no. 6, pp. 497–507, 1979, doi: 10.1016/0038-092X(79)90073-2.
- [67] D. Yang, "Solar radiation on inclined surfaces: Corrections and benchmarks," *Solar Energy*, vol. 136, pp. 288–302, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.06.062.
- [68] A. Asgharzadeh, B. Marion, C. Deline, C. Hansen, J. S. Stein, and F. Toor, "A Sensitivity Study of the Impact of Installation Parameters and System Configuration on the Performance of Bifacial PV Arrays," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 8, no. 3, pp. 798–805, May 2018, doi: 10.1109/JPHOTOV.2018.2819676.
- [69] A. Asgharzadeh *et al.*, "Analysis of the Impact of Installation Parameters and System Size on Bifacial Gain and Energy Yield of PV Systems," in *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, Jun. 2017, pp. 3333–3338, doi: 10.1109/PVSC.2017.8366690.
- [70] J. E. Castillo-Aguilella and P. S. Hauser, "Bifacial photovoltaic module best-fit annual energy yield model with azimuthal correction," in *2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Jun. 2016, pp. 3109–3112, doi: 10.1109/PVSC.2016.7750238.
- [71] L. Kreinin, A. Karsenty, D. Grobgeld, and N. Eisenberg, "PV systems based on bifacial modules: Performance simulation vs. design factors," in *2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Jun. 2016, pp. 2688–2691, doi: 10.1109/PVSC.2016.7750138.
- [72] U. A. Yusufoglu *et al.*, "Simulation of Energy Production by Bifacial Modules with Revision of Ground Reflection," *Energy Procedia*, vol. 55, pp. 389–395, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.08.111.
- [73] X. Sun, M. R. Khan, C. Deline, and M. A. Alam, "Optimization and performance of bifacial solar modules: A global perspective," *Applied Energy*, vol. 212, pp. 1601–1610, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.12.041.
- [74] R. Guerrero-Lemus, R. Vega, T. Kim, A. Kimm, and L. E. Shephard, "Bifacial solar photovoltaics – A technology review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 60, pp. 1533–1549, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.03.041.
- [75] S. Y. Alsadi and Y. F. Nassar, "Estimation of Solar Irradiance on Solar Fields: An Analytical Approach and Experimental Results," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 8, no. 4, pp. 1601–1608, Oct. 2017, doi: 10.1109/TSTE.2017.2697913.
- [76] C. W. Hansen *et al.*, "A Detailed Model of Rear-Side Irradiance for Bifacial PV Modules," in *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, Jun. 2017, pp. 1543–1548, doi: 10.1109/PVSC.2017.8366707.
- [77] T. C. R. Russell, R. Saive, A. Augusto, S. G. Bowden, and H. A. Atwater, "The Influence of Spectral Albedo on Bifacial Solar Cells: A Theoretical and Experimental Study," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 7, no. 6, pp. 1611–1618, Nov. 2017, doi: 10.1109/JPHOTOV.2017.2756068.
- [78] J. Mikulović and Ž. Đurišić, *Solarna energetika*. Beograd, Srbija: Akademska misao, 2020.
- [79] M. R. Vujčić, N. P. Lavery, and S. G. R. Brown, "View factor calculation using the Monte Carlo method and numerical sensitivity," *Communications in Numerical Methods in Engineering*, vol. 22, no. 3, pp. 197–203, 2006, doi: 10.1002/cnm.805.

- [80] T. Muneer, S. Ivanova, Y. Kotak, and M. Gul, "Finite-element view-factor computations for radiant energy exchanges," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 7, no. 3, p. 033108, May 2015, doi: 10.1063/1.4921387.
- [81] T. Walker, S.-C. Xue, and G. W. Barton, "Numerical Determination of Radiative View Factors Using Ray Tracing," *J. Heat Transfer*, vol. 132, no. 7, Jul. 2010, doi: 10.1115/1.4000974.
- [82] M. R. Khan, A. Hanna, X. Sun, and M. A. Alam, "Vertical bifacial solar farms: Physics, design, and global optimization," *Applied Energy*, vol. 206, pp. 240–248, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.08.042.
- [83] B. Marion *et al.*, "A Practical Irradiance Model for Bifacial PV Modules," in *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, Jun. 2017, pp. 1537–1542, doi: 10.1109/PVSC.2017.8366263.
- [84] A. Peled and J. Appelbaum, "The view-factor effect shaping of I-V characteristics," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 26, no. 4, pp. 273–280, 2018, doi: 10.1002/pip.2979.
- [85] T. S. Liang *et al.*, "A review of crystalline silicon bifacial photovoltaic performance characterisation and simulation," *Energy Environ. Sci.*, vol. 12, no. 1, pp. 116–148, Jan. 2019, doi: 10.1039/C8EE02184H.
- [86] T. Muneer, C. Gueymard, and H. Kambezidis, "6 - Ground Albedo," in *Solar Radiation and Daylight Models (Second Edition)*, T. Muneer, C. Gueymard, and H. Kambezidis, Eds. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2004, pp. 303–316.
- [87] V. Durković and Ž. Đurišić, "Impact of a horizontal reflector on the techno-economic characteristics of large VPV power plants," *Solar Energy*, vol. 220, pp. 650–659, May 2021, doi: 10.1016/j.solener.2021.03.069.
- [88] M. R. Khan, E. Sakr, X. Sun, P. Bermel, and M. A. Alam, "Ground sculpting to enhance energy yield of vertical bifacial solar farms," *Applied Energy*, vol. 241, pp. 592–598, May 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.168.
- [89] I. Babic and Z. Djuricic, "Impact of daily variation of solar radiation on photovoltaic plants economy at the open market: A case study 'Bavanište' (Serbia)," *Thermal Science*, vol. 19, no. 3.
- [90] Z. Djuricic, V. Durkovic, K. Dzodic, and D. Lazovic, "Analiza kapaciteta, optimalne strukture i uslova priključenja energetskog kompleksa solarne elektrane i vetroelektrane na Pešterskoj visoravni." Sep. 2020.
- [91] E. Molin, B. Stridh, A. Molin, and E. Wäckelgård, "Experimental Yield Study of Bifacial PV Modules in Nordic Conditions," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 8, no. 6, pp. 1457–1463, Nov. 2018, doi: 10.1109/JPHOTOV.2018.2865168.
- [92] "Klima Duga Poljana," *meteoblue*.
https://www.meteoblue.com/sr/vreme/historyclimate/climatemodelled/duga-poljana_%d0%a1%d1%80%d0%b1%d0%b8%d1%98%d0%b0_790951 (accessed Jun. 04, 2020).
- [93] T. Ma, H. Yang, and L. Lu, "Solar photovoltaic system modeling and performance prediction," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 36, pp. 304–315, Aug. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.04.057.
- [94] X. H. Nguyen and M. P. Nguyen, "Mathematical modeling of photovoltaic cell/module/arrays with tags in Matlab/Simulink," *Environ Syst Res*, vol. 4, no. 1, p. 24, Dec. 2015, doi: 10.1186/s40068-015-0047-9.
- [95] M. Sheraz Khalid and M. A. Abido, "A novel and accurate photovoltaic simulator based on seven-parameter model," *Electric Power Systems Research*, vol. 116, pp. 243–251, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.eprsr.2014.06.010.
- [96] Y. Mahmoud and E. F. El-Saadany, "A Photovoltaic Model With Reduced Computational Time," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 6, pp. 3534–3544, Jun. 2015, doi: 10.1109/TIE.2014.2375275.
- [97] U. Jadli, P. Thakur, and R. D. Shukla, "A New Parameter Estimation Method of Solar Photovoltaic," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 8, no. 1, pp. 239–247, Jan. 2018, doi: 10.1109/JPHOTOV.2017.2767602.
- [98] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 5, pp. 1198–1208, May 2009, doi: 10.1109/TPEL.2009.2013862.

- [99] Yun Tiam Tan, D. S. Kirschen, and N. Jenkins, "A model of PV generation suitable for stability analysis," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, no. 4, pp. 748–755, Dec. 2004, doi: 10.1109/TEC.2004.827707.
- [100] A. Chatterjee and A. Keyhani, "Thevenin's equivalent of photovoltaic source models for MPPT and power grid studies," in *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Jul. 2011, pp. 1–7, doi: 10.1109/PES.2011.6039203.
- [101] A. D. Jones and C. P. Underwood, "A thermal model for photovoltaic systems," *Solar Energy*, vol. 70, no. 4, pp. 349–359, Jan. 2001, doi: 10.1016/S0038-092X(00)00149-3.
- [102] D. Torres-Lobera and S. Valkealahti, "Inclusive dynamic thermal and electric simulation model of solar PV systems under varying atmospheric conditions," *Solar Energy*, vol. 105, pp. 632–647, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.solener.2014.04.018.
- [103] D. Torres Lobera and S. Valkealahti, "Dynamic thermal model of solar PV systems under varying climatic conditions," *Solar Energy*, vol. 93, pp. 183–194, Jul. 2013, doi: 10.1016/j.solener.2013.03.028.
- [104] J. J. Nedumgatt, K. B. Jayakrishnan, S. Umashankar, D. Vijayakumar, and D. P. Kothari, "Perturb and observe MPPT algorithm for solar PV systems-modeling and simulation," in *2011 Annual IEEE India Conference*, Dec. 2011, pp. 1–6, doi: 10.1109/INDCON.2011.6139513.
- [105] A. Safari and S. Mekhilef, "Simulation and Hardware Implementation of Incremental Conductance MPPT With Direct Control Method Using Cuk Converter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 4, pp. 1154–1161, Apr. 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2048834.
- [106] Weidong Xiao and W. G. Dunford, "A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems," in *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551)*, Jun. 2004, vol. 3, pp. 1957-1963 Vol.3, doi: 10.1109/PESC.2004.1355417.
- [107] S. K. Kollimalla and M. K. Mishra, "A Novel Adaptive P O MPPT Algorithm Considering Sudden Changes in the Irradiance," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 29, no. 3, pp. 602–610, Sep. 2014, doi: 10.1109/TEC.2014.2320930.
- [108] H. Mohammed, R. Gupta, O. Sastry, and D. Magare, "Assessment of different correlations to estimate distinct technology PV module operating temperature for Indian site," *Energy Science & Engineering*, vol. 7, no. 3, pp. 1032–1041, 2019, doi: 10.1002/ese3.332.

BIOGRAFIJA

Vladan R. Durković je rođen 10.03.1990. u Podgorici, Crna Gora. Završio je osnovne i specijalističke studije na Elektrotehničkom fakultetu u Podgorici, Univerzitet Crne Gore, 2011. i 2012. godine, respektivno. Master studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, Univerzitet u Beogradu upisuje 2012. godine i iste završava 2014. godine čime stiče titulu master inženjera elektrotehnike i računarstva. Iste godine upisuje doktorske studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, smjer elektroenergetski sistemi.

Od 2015. godine je zaposlen kao saradnik u nastavi na Elektrotehničkom fakultetu u Podgorici gdje izvodi računске i laboratorijske vježbe iz više disciplina na odsjeku energetika i automatika.

Oblast njegovog interesovanja su elektroenergetski sistemi, a posebno obnovljivi izvori energije. Autor i koautor je više radova, od čega je pet radova sa SCI/SCIE liste.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Владан Дурковић

Број индекса 5007/2014

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Развој нових техничких рјешења и математичких модела за анализу производње фотонапонских електрана велике снаге

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 21.01.2021

Владан Дурковић

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Владан Дурковић

Број индекса 5007/2014

Студијски програм Електротехника и рачунарство

Наслов рада Развој нових техничких рјешења и математичких модела за анализу
производње фотонапонских електрана велике снаге

Ментор др. Жељко Туришић, ванредни професор

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

У Београду, 21.01.2021.

Потпис аутора

Владан Дурковић

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Развој нових техничких рјешења и математичких модела за анализу производње фотонапонских електрана велике снаге

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

У Београду, 21.01.2021.

Потпис аутора

