

Usporedba energetske karakteristike vjetroelektrana i fotonaponskih elektrana

Šimunović, Josip

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:344066>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

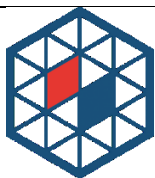
Sveučilišni studij

**USPOREDBA ENERGETSKIH KARAKTERISTIKA
VJETROELEKTRANA I FOTONAPONSKIH
ELEKTRANA**

Završni rad

Josip Šimunović

Osijek, 2022.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju

Osijek, 30.08.2022.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Prijedlog ocjene završnog rada na
preddiplomskom sveučilišnom studiju**

Ime i prezime Pristupnika:	Josip Šimunović
Studij, smjer:	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	4736, 23.07.2019.
OIB Pristupnika:	98621929299
Mentor:	Izv. prof. dr. sc. Goran Knežević
Sumentor:	Zorislav Kraus, dipl. ing.
Sumentor iz tvrtke:	
Naslov završnog rada:	Usporedba energetske karakteristike vjetroelektrana i fotonaponskih elektrana
Znanstvena grana rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak završnog rada:	U završnom radu potrebno je istražiti iznose instalirane snage i proizvedene energije vjetroelektrane (VE) i fotonaponske elektrane (FNE) te na temelju istih odrediti vremena T_v (vršno). Za jednaku instaliranu snagu (karakterističnu za hrvatske prilike VE) usporediti investicijske troškove za pojedini tip elektrane s detaljnim opisom istih. Za jednaku proizvedenu energiju (pripadajuće VE elektrane) usporediti investicijske troškove za pojedine tipove elektrana i za taj slučaj usporediti potrebne instalirane snage. Nadalje, potrebno je usporediti potrebne površine zemljišta za pojedina rješenja. Sumentor s FERIT-a: Zorislav Kraus, dipl.ing.el. Tema rezervirana za studenta: Josip Šimunović
Prijedlog ocjene završnog rada:	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
Datum prijedloga ocjene od strane mentora:	30.08.2022.
Datum potvrde ocjene od strane Odbora:	07.09.2022.
Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	<i>Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.</i>
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 07.09.2022.

Ime i prezime studenta:

Josip Šimunović

Studij:

Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

Mat. br. studenta, godina upisa:

4736, 23.07.2019.

Turnitin podudaranje [%]:

8

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Usporedba energetske karakteristike vjetroelektrana i fotonaponskih elektrana**

izrađen pod vodstvom mentora Izv. prof. dr. sc. Goran Knežević

i sumentora Zorislav Kraus, dipl. ing.

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Zadatak završnog rada	1
2. PREGLED PODRUČJA TEMA	2
3. ENERGETSKE KARATERISTIKE VJETROELEKTRANA	3
3.1. Prilike u Hrvatskoj i svijetu	3
3.2. Projektiranje vjetroelektrana	5
3.3. Mjerenje vjetropotencijala.....	6
3.4. Izračun energije vjetra	7
3.5. Procjena proizvodnje energije	7
3.6. Vjetroelektrane.....	8
3.7. Izgradnja vjetroelektrana	8
3.8. Održavanje vjetroelektrana	9
3.9. Snage vjetroelektrana u Hrvatskoj.....	9
4. ENERGETSKE KARATERISTIKE FOTONAPONSKIH ELEKTRANA	10
4.1. Prilike u Hrvatskoj i svijetu	10
4.2. Projektiranje fotonaponskih elektrana	12
4.3. Izgradnja fotonaponskih elektrana	15
4.4. Održavanje fotonaponskih elektrana	16
4.5. Fotonaponske elektrane u Hrvatskoj	17
5. PRORAČUN	18
5.1. Usporedba vršnog vremena vjetroelektrane i fotonaponske elektrane.....	18
5.2. Usporedba investicijskih troškova po instaliranoj snazi	19
5.3. Usporedba investicijskih troškova pri jednako proizvedenoj energiji te opis potrebnih instaliranih snaga	22
5.4. Usporedba vjetroelektrana i fotonaponskih elektrana prema površini.....	24
6. ZAKLJUČAK	26

7. SAŽETAK.....	27
8. ABSTRACT	28
9. LITERATURA	29
10. ŽIVOTOPIS.....	32

1. UVOD

Svijet se sve više okreće obnovljivim izvorima energije. Ponajviše zbog zagađenja okoliša te jednog od većih svjetskih problema, a to je globalno zagrijavanje zemlje koje dovodi do izumiranja brojnih životinjskih i biljnih vrsta. Razvojem tehnologije i sve češćom uporabom iste dolazi do znatnog pada cijena materijala i investicijskih troškova za izgradnju elektrana na obnovljive izvore energije pa tako i vjetroelektrana te fotonaponskih elektrana. Brojne svjetske vlade pa tako i Hrvatska vlada podupire odnosno sufinancira izgradnje elektrana na obnovljive izvore. Hrvatska kotira za najviša mjesta na ljestvici po svome vjetropotencijalu i potencijalu energije Sunčeva zračenja, unatoč tome još uvijek nije pronašla svoje mjesto na vrhu ljestvice u proizvodnji električne energije iz obnovljivih izvora. Ukoliko bi Hrvatska počela proizvoditi energiju iz obnovljivih izvora znatno bi smanjila potrebu za uvozom energije iz stranih zemalja. Završni rad kao zadatak ima detaljnu usporedbu vršnih sati, investicijskih troškova po instaliranoj snazi, proizvedenoj energiji te površinske potrebe kako vjetroelektrana tako i fotonaponskih elektrana, na taj se način može vidjeti veća ekonomska isplativost između elektrana.

1.1. Zadatak završnog rada

Zadatak završnog rada je istražiti iznose instalirane snage i proizvedene energije vjetroelektrane (VE) i fotonaponske elektrane (FNE) te na temelju istih odrediti vremena T_v (vršno). Za jednaku instaliranu snagu (karakterističnu za hrvatske prilike VE) usporediti investicijske troškove za pojedini tip elektrane s detaljnim opisom istih. Za jednaku proizvedenu energiju (pripadajuće VE elektrane) usporediti investicijske troškove i za taj slučaj usporediti potrebne instalirane snage. Nadalje, potrebno je usporediti potrebne površine zemljišta za pojedina rješenja. Uspoređuju se neki od najznačajnijih ekonomskih i tehničkih aspekata pojedinih elektrana.

2. PREGLED PODRUČJA TEMA

Pokušamo li vjetar promatrati kao energent, sigurno će varijabilnost biti jedna od značajnijih karakteristika, odnosno vjetar je promjenjiv i po brzini i po smjeru. Vjetar kao vrlo varijabilna pojava, se može dijeliti na prostornu (geografske varijacije – nisu na svim geografskim područjima jednake mogućnosti vjetra) i na vremensku podjelu (neke lokacije mijenjaju svoje mogućnosti vjetra ovisno o vremenu)[1]. Izgradnje vjetroelektrana su dugogodišnji zahtjevni projekti, prilikom kojih su obje zainteresirane strane u dodiru s mnogim rizicima pri čemu su neki vrlo značajni toliko da mogu uništiti projekt[2]. Sunčevo zračenje u Hrvatskoj se primarno koristi za proizvodnju električne energije putem fotonaponskih elektrana. Svojim raznolikim i pogodnim geografskim položajem Hrvatska ima vrlo velik potencijal pri iskorištavanju Sunčeve energije. Neki od razloga koji doprinose unapređenju fotonaponskih modela su ti da korisnici imaju dostupnost informacija i bogatstvo regije. Najveći solarni potencijal Hrvatske je na području uz Jadransku obalu, a ondje je trenutno njegova iskorištenost najniža odnosno najviše fotonaponskih sustava je smješteno na sjeverozapadu Hrvatske[3]. Zbog znatnog korištenja mineralnih goriva i velike emisije ugljikovog dioksida (CO_2) u atmosferu i onečišćenja okoliša koje razara prirodu posljednjih se godina svijet okrenuo obnovljivim, ekološki prihvatljivijim izvorima energije. Osnovna ideja korištenja obnovljivih izvora energije je prije svega zaštita okoliša te povećanje lokalnog i regionalnog razvoja koji doprinose većoj zaposlenosti. Uz smanjivanje zagađenja okoliša, smanjenom emisijom stakleničkih plinova pospješuje se kvaliteta života i podiže razina javne sigurnosti. Razvojem i unapređenjem tehnologije svijet će se okrenuti instaliranju sve više novih kapaciteta fotonaponskih i koncentriranih solarnih elektrana, tako da će Sunčeva energija imati sve veći udio od ukupne proizvodnje električne energije[4]. Prve vjetroelektrane za proizvodnju električne energije pojavile su se krajem 19. stoljeća. Visine na kojima su se nalazili vjetroagregati su bile od 10-20 metara. Razvijale su se vrlo male maksimalne snage oko 12 kW. Zbog vrlo niske cijene nafte i ugljena do 1970. godine razvoj je bio ograničen i usporen. Prethodnik modernih vjetroelektrana se pojavio 1941. godine u SSSR-u, vjetroagregat snage 100 kW i visine stupa od 30 metara. Polovicom 20. stoljeća pojavila se i prva vjetroelektrana instalirane snage 1 MW. Najveće vjetroelektrane sadašnjosti su Jaisalmer, Roscoe, Horse Hollow, Alta i druge. Instalirane snage su u rasponu od 500 MW do 1000 MW. Visine stupa variraju od 80-120 metara. Duljine lopatica su od 40-45 metara[5]. Učinkovitost prvih silicijskih solarnih ćelija je bila vrlo mala tek 2%. Daljnjim razvojem se sredinom 20. stoljeća pojavljuju ćelije učinkovitosti do 10%. Krajem 20. stoljeća razvijene su ćelije učinkovitosti od 20%, suvremene ćelije od kristalnog silicija

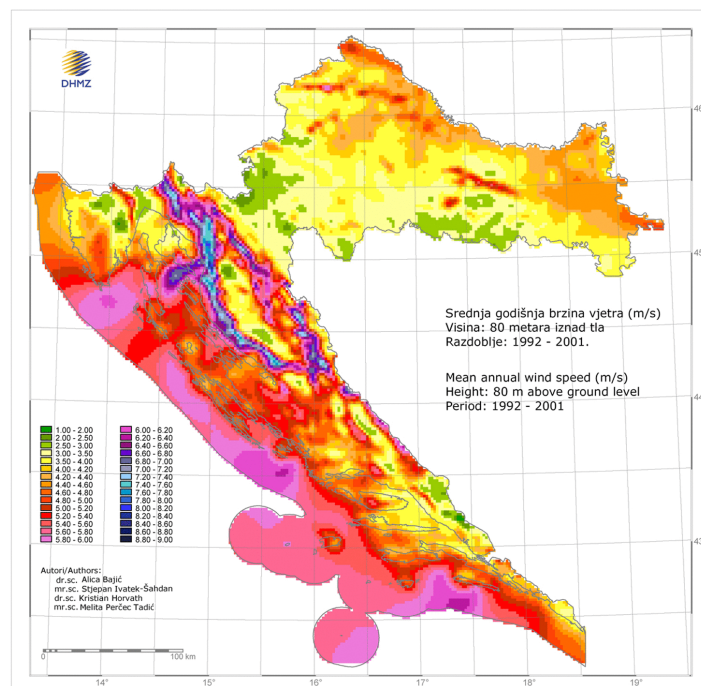
imaju učinkovitost od 25%. Novi koncepti imaju zadatak smanjiti cijenu te povećati efikasnost solarnih ćelija, razvijaju se brojne nove tehnologije izrade solarnih ćelija[6].

3. ENERGETSKE KARATERISTIKE VJETROELEKTRANA

Vjetroelektrane su upotrebljive na mjestima s prosječnom brzinom vjetra većom od 4,5 m/s, sa što konstantnijim gibanjem vjetra bez oscilacija, sa smanjenom mogućnosti naglih udara vjetra. Međutim, neka mjesta s povoljnim vjetrovima nisu prikladna kako bi se instalirala vjetroturbina jer bi narušavala okoliš. Buka stvorena okretanjem lopatica utjecala bi na staništa raznih vrsta ptica, ali štetnih utjecaja na okoliš ima mnogo manje nego kod konvencionalnih elektrana. Instalacije vjetroelektrana na kopnu su relativno nepovoljne, a najčešće se vrše na vrhovima brda ili padina, gdje je akceleracija koju vjetar dobije prelaskom preko uzvisina najbolje iskorištena te se smanji broj zapreka koje se nalaze na putu do turbina. Priobalne lokacije koje se nalaze na obali (maksimalno 3 km od mora) ili na moru (do 10 km od obale) su prikladne zbog vjetrova koji nastaju kada se kopno i more različito zagrijavaju. Lokacije na moru (udaljenosti više od 10 km od obale) imaju prednost povoljnih vjetrova i smanjenog negativnog učinka na krajolik, ali su ekonomski skuplje za izgradnju i održavanje.[7].

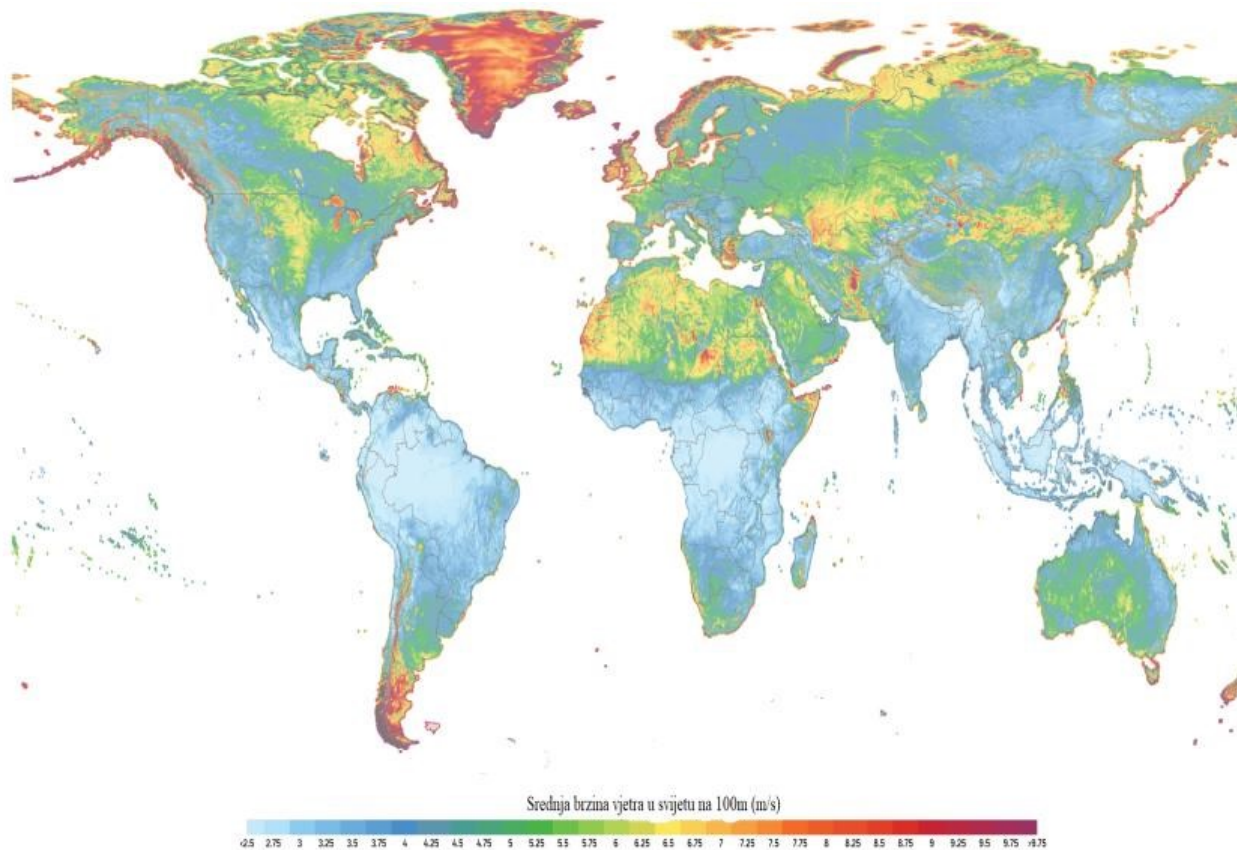
3.1. Prilike u Hrvatskoj i svijetu

Srednje godišnje brzine vjetra u Hrvatskoj su prikazane na slici 3.1.



Sl. 3.1. Srednje godišnje brzine vjetra na 80 metara iznad tla u m/s[8]

Vidi se da znatno veću srednju brzinu vjetra Hrvatska ima na otocima i u priobalju u odnosu na kontinentalnu Hrvatsku. Područja na kopnu, koja imaju najveću srednju vrijednost brzine vjetra su planine. Slika je vrlo dobro ukazala područja koja imaju golem energetski potencijal vjetra te je samim time pomogla pri odabiru lokacija prikladnih za gradnju vjetroelektrana u Hrvatskoj[9]. Na svjetskoj razini, istraživanja su pokazala da su područja visokog energetskog potencijala smještana u sjevernoj Europi uz Sjeverno more, na južnom dijelu južnoameričkog kontinenta, na otoku Tasmaniji u Australiji i u regiji Velikih jezera te na sjeveroistočnoj i sjeverozapadnoj obali Sjeverne Amerike. Globalna prosječna brzina vjetra na 80 m iznad tla bila je veća danju (4,96 m/s) nego noću (4,85m/s) [10]. Službeno najjači udar vjetra u Hrvatskoj je bio 1998. godine prilikom udar bure od 248 km/h (69,0 m/s), a najjači vjetar zabilježen u Europi izmjeren je južno od Münchena i bio je 335 km/h (93,1 m/s)[11].



Sl. 3.2. Srednja brzina vjetra u svijetu na 100 metara iznad tla (m/s)[12]

3.2. Projektiranje vjetroelektrana

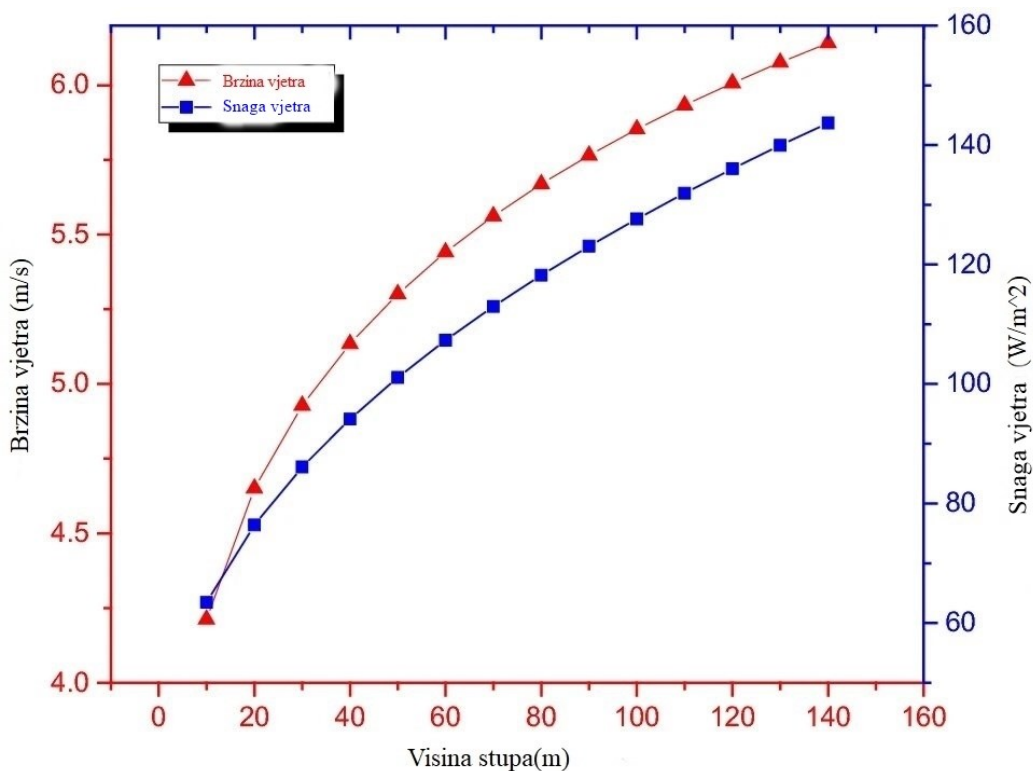
Kako bi se započelo projektiranje vjetroelektrane, prva stvar koju moramo odrediti jest lokacija. Pri izboru lokacije mora se voditi računa da je lokacija izvan zaštićenih područja, izbjegavaju se staništa važna za ptice, izbjegava se utjecanje na ugrožene i strogo zaštićene biljne vrste, procjenjuje se utjecaj na naseljena područja[13]. Izbor lokacije se vrši pomoću karte vjetra (atlasa vjetra), ali tu lokaciju je potrebno dodatno potvrditi praktičnim mjerenjima. Osnovno praktično mjerenje je mjerenje vjetro potencijala na određenoj lokaciji. Bitna je i mogućnost priključka određene lokacije na razdjelnu ili prijenosnu mrežu, koja mora biti tehnički i ekonomski isplativa za izvedbu. U drugom koraku je potrebno odabranu lokaciju dodatno ispitati. Vrše se brojni proračuni (izračun energije, gubici, električni proračuni...), dodatno se provjerava utjecaj buke na blisko područje, vizualni utjecaj, dostupnost pristupnih kolnika. Najviše se pažnje posvećuje mjerenju vjetra kako bi se što točnije procijenila ekonomska isplativost i mogućnost proizvodnje ukupne električne energije. Ukoliko su prvi i drugi korak uspješno zadovoljili tehničke, ekonomske i ekološke zahtjeve pristupa se trećem koraku. U trećem koraku nastupa dizajniranje željenog izgleda te se definira smještaj vjetroagregata. U četvrtom koraku kreće izgradnja nakon što je detaljno ispitana pogodnost odabrane lokacije.



Sl. 3.3. Vjetroelektrana Korlat[14]

3.3. Mjerenje vjetropotencijala

Prema autoru iz [15] mjerenja vjetropotencijala se provode kako bi se odredila mogućnost proizvodnje električne energije vjetroagregata na nekoj lokaciji kako bi se smanjio rizik za investitore. Ako je topografija terena složena, što je najčešći slučaj na hrvatskoj obali, točnost predviđanja vjetropotencijala pomoću proračuna na veće udaljenosti od mjerne točke otpada, pa se mjerenje mora obaviti na mjestu potencijalne lokacije vjetroelektrane. Mjerenja vjetra bi trebala trajati najmanje godinu dana, ponekad i duže. Suvremeni vjetroagregati snage preko 2 MW postavljeni su i na visinama iznad 80 m te iz tog razloga je potrebno izvršiti mjerenja na tim visinama kako bi se maksimizirala točnost predviđene proizvodnje vjetroelektrana. Osim toga, mjerenja se moraju poduzeti na nekoliko različitih visina kako bi se dobila što točnija visinska raspodjela brzina vjetra prikazana na slici 3.4. . Na taj se način smanjuje rizik u procjeni proizvodnje električne energije iz energije vjetra, što zauzvrat smanjuje troškove financiranja odgovarajućih projekata.



Sl. 3.4. Visinska raspodjela brzine vjetra na različitim visinama stupa[16]

Mjerna oprema sadrži anemometre i pokazivače smjera pričvršćene na stupove koji su na visinama na kojima će biti vjetroagregati, te mjerače temperature, tlaka, vlage i Sunčeve svjetlosti instalirane

na određenoj visini ili s uređajem za prikupljanje podataka. Svaki mjerni instrument je odvojenim kabelom povezan s uređajem za prikupljanje podataka koji se nalazi na dnu stupa. Mjerenja moraju biti prilagođena lokaciji i željama investitora odnosno spremnosti za ugradnju potrebnih mjernih uređaja i osoba koje bi izvršile kontrolu prikupljanja podataka nakon ugradnje, kao i uklanjanje eventualnih kvarova. Redovita kontrola stupova je neophodna[15].

3.4. Izračun energije vjetra

„Energija vjetra je kinetička energija ovisna o kvadratu brzine vjetra“[1]. Kinetičku energiju vjetra opisujemo izrazom:

$$E_K = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3-1)$$

Predstavi li se masu umnoškom gustoće i volumena, tada za kinetičku energiju možemo raspisati sljedeći izraz:

$$m = \rho V \quad \rightarrow \quad E_K = \frac{1}{2}\rho V v^2 \quad (3-2)$$

Gdje je:

- ρ – gustoća zraka [kg/m^3]
- V - volumen zraka cilindra u m^3 čija je baza površine A [m^2] i duljine l [m][1].

3.5. Procjena proizvodnje energije

Uz pomoć slike 3.4. može se lako odrediti snaga vjetra. Sve što je potrebno kako bi se odredila snaga vjetra jest brzina vjetra i visina stupa. Pomoću ta dva podatka može se iščitati snaga iz karakteristike vjetroagregata. Ukoliko imamo brzinu vjetra od 5 m/s na visini stupa od 50 metara snaga bi iznosila $100 W/m^2$. Osim snage, za procjenu proizvodnje energije bitna je i učestalost vjetra odnosno koliko vremena puše vjetar određene brzine. Umnoškom iščitane snage te vremena pri kojemu imamo razvijenu određenu brzinu vjetra dolazi se do procjene proizvodnje energije.

3.6. Vjetroelektrane

Vjetroelektrane su elektrane u kojima se kinetička energija vjetra transformira u električnu energiju pomoću jedne ili više vjetroturbina s električnim generatorima. Danas je osnova moderne konstrukcije brzohodna vjetroturbina s horizontalnom osovinom. Strukturu čini rotor s krilima odnosno lopaticama i kućišta s generatorom i ostalom opremom pričvršćenom na vrh nosivog stupa pomoću zakretnog ležaja, rotor se najčešće sastoji od tri lopatice. Lopatice su izrađene od čelika ili kompozitnih materijala i montirane su u glavinu s vratilom u kojoj se nalaze prijenosni mehanizam i generator smješteni u gondoli. Rotacija rotora i gondole u pravcu vjetra ostvaruje se pomoću aerodinamičkog repnog stabilizatora, ali češće uz upotrebu elektromotora. Ukoliko brzina vjetra prekorači dozvoljene vrijednosti, kočni sistem usporava ili zaustavlja rad turbine. Ovaj sustav uključuje mehaničke kočnice na osovini, zračne kočnice na lopaticama, a kočenje se također postiže okretanjem lopatica i pomicanjem rotora sa smjera vjetra[7].

3.7. Izgradnja vjetroelektrana

Najveći troškovi izgradnje vjetroelektrane su početne investicije odnosno vjetroagregati, građevinski radovi i ostali radovi, oni zapravo čine najveći udio ulaganja. Kod elektrana koje koriste obnovljive izvore energije troškovi goriva ne postoje, ali postoje troškovi održavanja. Autori u [17] su prikazali razdiobu troškova izgradnje vjetroelektrane pomoću slike 3.5.

3.5.

	Investicija (€1,000/MW)	Postotak od investicije %
Vjetroagregat	928	75.6
Priključak	109	8.9
Temelji	80	6.5
Pravo građenja	48	3.9
Razvod vjetroelektrane	18	1.5
Konzultantske usluge	15	1.2
Troškovi kapitala	15	1.2
Pristupni putevi	11	0.9
Upravljački sustav	4	0.3
Ukupno	1,227	100

Sl.3.5. Tipična struktura troškova izgradnje vjetroelektrane snage 2MW instalirane u Europi [17]

Slika prikazuje da 75,6 % troškova iznosi vjetroagregat, 8,9 % priključak, 6,5 % temelji, 3,9 % pravo građenja, 1,5 % razvod vjetroelektrane, 1,2 % konzultantske usluge, 1,2 % troškovi kapitala, 0,9 % pristupni putevi i 0,3 % upravljački sustav. Troškove rada i održavanja vjetroelektrana na kopnu općenito su procijenili na oko 1.200 do 1.500 €/kWh. Razvojem i sve učestalijim korištenjem vjetroelektrana cijena održavanja i troškova rada se snižava.

3.8. Održavanje vjetroelektrana

Ukoliko se žele imati maksimalne performanse bilo kojeg postrojenja pa tako i vjetroelektrana, održavanje je neophodno. Održavanje pospješuje veću raspoloživost sustava, a troškovi ostaju isti. Održavanje vjetroelektrana se može podijeliti u tri glavne skupine: korekcijsko održavanje (rad do kvara), preventivno održavanje (na temelju vremena) i prediktivno održavanje (temeljeno na statusu sustava). Kod održavanja vjetroelektrana najčešće se koriste korekcijsko (popravak u slučaju kvara) i preventivno održavanje (servisni priručnik proizvođača). Prediktivno održavanje još nije pronašlo širu primjenu jer zahtjeva visokotehnološke tehnike praćenja. U budućnosti će se sve više pažnje posvetiti prediktivnom održavanju, odnosno predviđanju kvarova koje će nam omogućiti manju cijenu održavanja. Element koji je oštećen će biti odstranjen i zamijenjen prije nego li uzrokuje oštećenje ostalog sustava, benefit toga će biti manja cijena održavanja jer ćemo promijeniti samo jedan element koji je blizu otkazivanja, a ne veću cjelinu sustava [18].

3.9. Snage vjetroelektrana u Hrvatskoj

Hrvatska trenutno broji 24 vjetroelektrane, 22 vjetroelektrane koje su u normalnom pogonu i 2 vjetroelektrane u probnom radu. Vjetroelektrane imaju ukupnu instaliranu snagu od 790 MW, a u pogonu je i 325 vjetroagregata koji isporučuju godišnje 1788 GWh električne energije (što je 12,17 % od ukupne proizvedene energije Hrvatske u 2021. godini koja je iznosila 14686 GWh). U 2021. godini u rad su puštene tri elektrane od toga su dvije u probnom, a jedna je u normalnom pogonu. Vjetroelektrane koje su u probnom radu su: VE Senj (156 MW instalirane snage) i VE Krš-Pađene (142 MW instalirane snage). Primjer vjetroelektrane u normalnom radu je VE Korlat koja je smještena na istoimenoj lokaciji i prva je vjetroelektrana u portfelju HEP-a. Instalirana snaga joj iznosi 58 MW, a očekuje se godišnja proizvodnja električne energije oko 170 GWh, a to je približno jednako 1 % Hrvatske godišnje potrošnje električne energije. Vjetroelektrana ima 18 vjetroagregata. Stupovi su na visini od 114 metara, a imaju rotore promjera 131 metar. Vrijednost investicije je oko 500 milijuna kuna [19]. Republika Hrvatska je u 2008. godini izdala strategiju energetskeg razvoja RH. Ciljevi strategije su bili da Hrvatska do 2020. godine treba instalirati

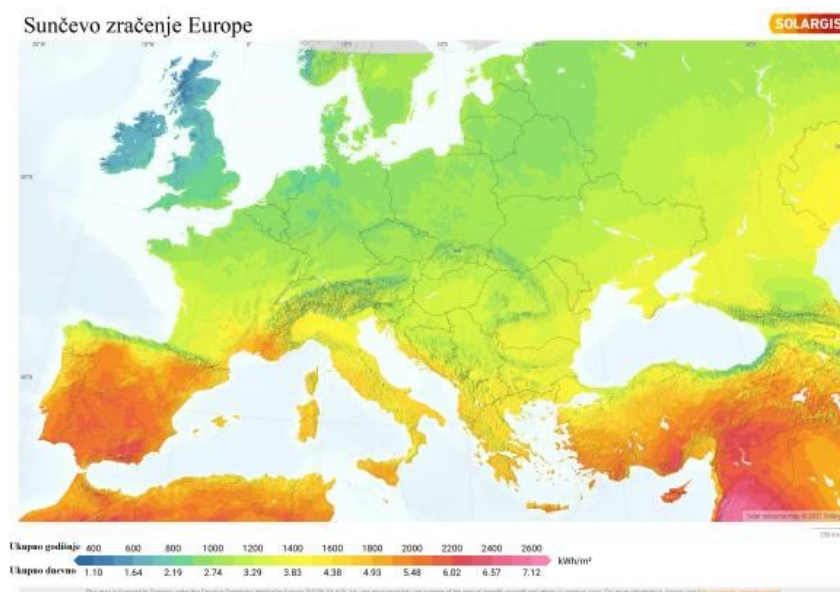
1200 MW vjetroelektrana. Uzme li se u obzir i 2021. godinu, uspjelo se ostvariti samo 65,8 % instalirane snage od ukupnog postavljenog cilja iz 2008. godine.

4. ENERGETSKE KARATERISTIKE FOTONAPONSKIH ELEKTRANA

Zračenje Sunčeve energije se u fotonaponskim postrojenjima odnosno solarnim elektranama koristi za proizvodnju električne energije. Sunčevo zračenje odnosno Sunčeva energija proizlazi iz procesa nuklearne fuzije koja se odvija u jezgri Sunca. Za pretvorbu Sunčeve energije u električnu energiju su zaslužni fotonaponski (solarni) paneli kod kojih je glavna karakteristika proizvodnja istosmjerne energije pa se moraju spojiti (integrirati) sa sustavom fotonaponske elektrane. Naravno, istosmjerna energija više povezanih panela se pretvara i šalje u izmjenični elektroenergetski sustav. Solarne elektrane po pitanju veličine doista znatno variraju od veličine krova neke zgrade te do nekih većih površina u prostoru [20]. Premda je koncentracija Sunčevog zračenja koja stiže do Zemlje ogromna još uvijek nema velikog iskorištavanja te energije u svrhu pokrivanja svjetskih energetske potreba. Najveći čimbenici toga su nedovoljna razvijenost trenutnih tehnologija za iskorištavanje energije Sunca kao i visoka cijena takvih sustava. Naime problemi koji se još mogu uočiti su: mala gustoća energetske toka, oscilacija intenziteta, nemogućnost skladištenja, ovisnost zračenja o klimatskim uvjetima [1].

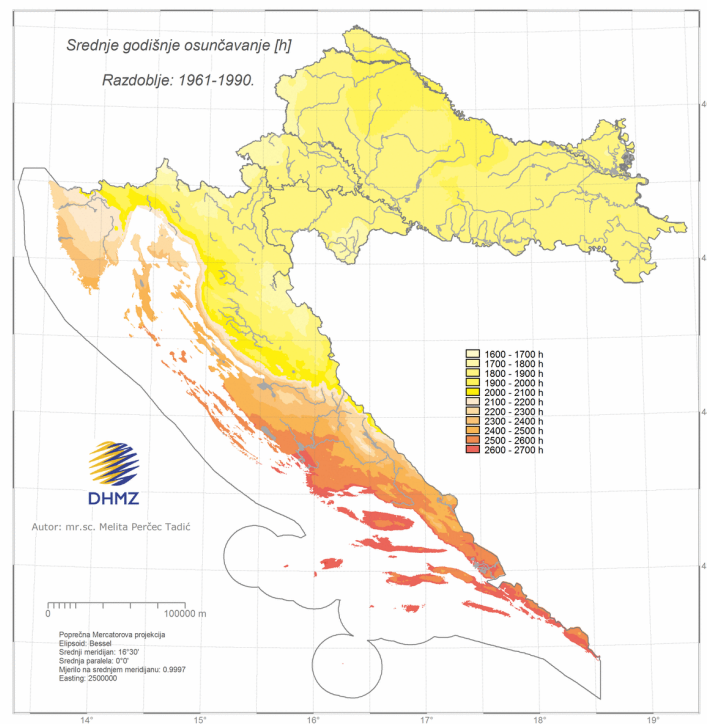
4.1. Prilike u Hrvatskoj i svijetu

Hrvatska osunčanost (1200 - 1600 kWh/m²) je kvalitativno govoreći dvostruko veća u usporedbi sa sjevernijim dijelovima Europe (600 - 1200 kWh/m²) [21]. Upravo to prikazuje slika 4.1.



Sl. 4.1. Osunčanost Europe[22]

Insolacija je trajanje obasjavanja Sunca, tj. vrijeme u kojem je neko mjesto na Zemlji izravno ozračeno Sunčevim zrakama. Na slici 4.2. jasno je vidljivo da je prosječno trajanje insolacije u Hrvatskoj veće na području zapada nego na području istoka, odnosno na jugu u usporedbi sa sjeverom. Najveću insolaciju ima područje južne Hrvatske i dalmatinskih otoka, a najmanja insolacija je na području vrhova planina i sjeveroistočne Hrvatske. Potencijal Hrvatske i po insolaciji i po osunčanosti je vrlo velik.



Sl. 4.2. Insolacija Hrvatske [h] [23]

Sjeverna Europa ima najniže prosječne vrijednosti Sunčeve insolacije. Sati insolacije na jugu su znatno veći od sati insolacije na sjeveru. Europa, a posebno Njemačka prednjači u svijetu po pitanju primjene i razvoja solarne energije. Karta insolacije ima primjenu za procjenu broja solarnih modula, baterija, a posebno po pitanju isplativosti investiranja u izgradnju solarne odnosno fotonaponske elektrane na potencijalnoj lokaciji [24].

4.2. Projektiranje fotonaponskih elektrana

U ovom poglavlju će biti prikazana metoda dimenzioniranja fotonaponskih elektrana na temelju instalirane snage P_i . Dimenzioniranje započinje odabirom broja modula koji će omogućiti ostvarivanje željene instalirane snage. Preliminarni broj modula n' se bira tako da se vršna instalirana snaga fotonaponske elektrane P_i dijeli s vršnom snagom fotonaponskog modula P_{MPP} . Izraz za preliminarni broj modula je dan sljedećim izrazom [1]:

$$n' = \frac{P_i}{P_{MPP}} \quad (4-1)$$

U tehničkim karakteristikama može se pronaći vršna snaga fotonaponskog modula, naravno kao i ostale tehničke karakteristike. Uz uspješno određen preliminarni broj modula sljedeći korak je odrediti površinu koju zauzimaju moduli A_{FN} . Preliminarni broj modula n' množi se sa površinom jednog modula A_{mod} koja se također nalazi u tehničkim karakteristikama modula.

$$A_{FN} = A_{mod} \cdot n' \quad (4-2)$$

Površinu koju zauzimaju moduli A_{FN} je zatim potrebno usporediti s dostupnom površinom A_{dost} za instalaciju elektrane. Ako je površina koju zauzimaju moduli veća od dostupne površine, fotonaponsku elektranu nije moguće instalirati na željenu dostupnu površinu. Tada se mora smanjiti instaliranu snagu. Ako je uvjet $A_{FN} < A_{dost}$ zadovoljen, prelazi se na određivanje karakteristika fotonaponskoga niza [1]. Zapčinje se određivanjem napona praznog hoda i napona vršne snage za minimalne te maksimalne temperature fotonaponskog modula koje se pretpostavljaju $T_{min} = -10^\circ C$ kao minimalna i $T_{max} = 75^\circ C$ kao maksimalna. Referentna temperatura se uzima kao $T_{STC} = 25^\circ C$ po standardnim testnim uvjetima. Najveći napon praznog hoda se pojavljuje pri minimalnoj temperaturi i odgovara izrazu [1]:

$$U_{PH,maxs} = U_{PH} + \beta(T_{STC} - T_{min}) \quad (4-3)$$

Minimalni napon $U_{MPP,min}$ prvi vršnoj snazi odgovara:

$$U_{MPP,min} = U_{MPP} + \alpha(T_{STC} - T_{maks}) \quad (4-4)$$

dok je maksimalni napon:

$$U_{MPP,max} = U_{MPP} + \alpha(T_{STC} - T_{min}) \quad (4-5)$$

Zbog sigurnosti maksimalni napon se postavlja na vrijednost $1,2 \cdot U_{PH}$. Odnosno krajnja maksimalna vrijednost napona modula $U_{m,maks}$ bira se po načelu izbora veće vrijednosti između $U_{PH,maks}$ i vrijednosti $1,2 \cdot U_{PH}$ [1]. Broj modula u fotonaponskom nizu m se odredi tako da se preliminarni broj modula n' dijeli brojem fotonaponskih nizova j , a to prikazuje izraz [1] :

$$m = \frac{n'}{j} \quad (4-6)$$

Pri praznom hodu maksimalni napon fotonaponskog niza $U_{PH,m,max}$ se odredi tako se da broj modula u nizu m množi sa većom vrijednosti između $U_{PH,maks}$ i $1,2 \cdot U_{PH}$ odnosno $U_{m,max}$.

$$U_{PH,m,max} = m \cdot U_{m,max} \quad (4-7)$$

Pri vršnoj snazi fotonaponskog niza napon $U_{MPP,n}$ se odredi na način da se broj modula u nizu m množi s naponom vršne snage modula U_{MPP} .

$$U_{MPP,n} = m \cdot U_{MPP} \quad (4-8)$$

Pri vršnoj snazi fotonaponskog niza struja $I_{MPP,niz}$ je jednaka struji vršne snage modula I_{MPP} što proizlazi iz serijskog spoja modula u nizu. Maksimalna struja kratkog spoja $I_{KS,max}$ je $1,25 \cdot I_{KS}$, zbog serijskog spoja modula jednaka je i za niz. $U_{MPP,n,maks}$ odnosno maksimalni napon pri vršnoj snazi fotonaponskog niza jednak je umnošku broja modula u nizu m i maksimalnog napona vršne snage modula $U_{MPP,max}$ prema sljedećem izrazu:

$$U_{MPP,n,maks} = m \cdot U_{MPP,max} \quad (4-9)$$

Dok je minimalni napon vršne snage fotonaponskog niza jednak [1] :

$$U_{MPP,n,min} = m \cdot U_{MPP,min} \quad (4-10)$$

Dolazi se do izbora izmjenjivača kod kojih se na tvorničkoj pločici pronalaze sljedeći tehnički podatci: ulazna nazivna snaga P_{DC} (W), područje rada na DC strani $U_{izmj,min} - U_{izmj,max}$ (V), maksimalni ulazni napon na DC strani $U_{DC,maks}$ (V), maksimalna ulazna struja na DC strani $I_{DC,maks}$ (A), izlazna nazivna snaga P_{AC} (W), nazivni napon na DC strani U_{DC} (V), nazivna frekvencija f (Hz), faktor snage $\cos\varphi$, maksimalna učinkovitost η_{maks} (%) i europska učinkovitost η_{eu} (%). Za pravilan izbor izmjenjivača mora se utvrditi odgovaraju li karakteristike

fotonaponskoga niza i karakteristike izmjenjivača. Prvo se provjerava da li je maksimalni napon praznog hoda fotonaponskog niza $U_{PH,n,max}$ manji od ulaznog napona na DC strani izmjenjivača $U_{DC,maks}$. Ako je uvjet zadovoljen provjerava se da li je minimalni napon vršne snage fotonaponskog niza $U_{MPP,n,min}$ veći od minimalnog napona vršne snage izmjenjivača $U_{izmj,min}$, ukoliko je, provjerava se da je li maksimalni napon vršne snage fotonaponskog niza $U_{MPP,n,max}$ manji od minimalnog napona vršne snage izmjenjivača $U_{izmj,maks}$. Utvrđi li se da su svi uvjeti zadovoljeni, fotonaponski niz zadovoljava naponsko područje rada izmjenjivača. Na kraju se provjerava da li je maksimalna struja fotonaponskog niza $I_{ks,maks}$ manja od maksimalne dozvoljene ulazne struje na DC strani izmjenjivača $I_{DC,maks}$.

Ispunjenjem svih zadanih uvjeta fotonaponski niz je moguće priključiti na odabrani izmjenjivač, a ukoliko nešto nije zadovoljeno mora se tražiti izmjenjivač koji odgovara zadanim uvjetima odnosno zahtjevima [1]. Odabir kabela se izvodi tako da kabel na DC strani mora ispuniti sljedeći uvjet:

$$I_{z,DC} > 1,25 \cdot I_{KS} \quad (4-11)$$

$I_{z,dc}$ predstavlja maksimalnu struju koju kabel podnosi uz uračunati utjecaj temperature i načina instalacije na smanjenje nazivne struje.

$$I_{z,DC} = k_1 \cdot k_2 \cdot I_n \quad (4-12)$$

Gdje k_1 predstavlja korekcijski faktor nazivne struje pri temperaturi $T_{maks}=70$ °C, a k_2 je korekcijski faktor nazivne struje zbog postavljanja kabela u cijevi ili kanalice[1].

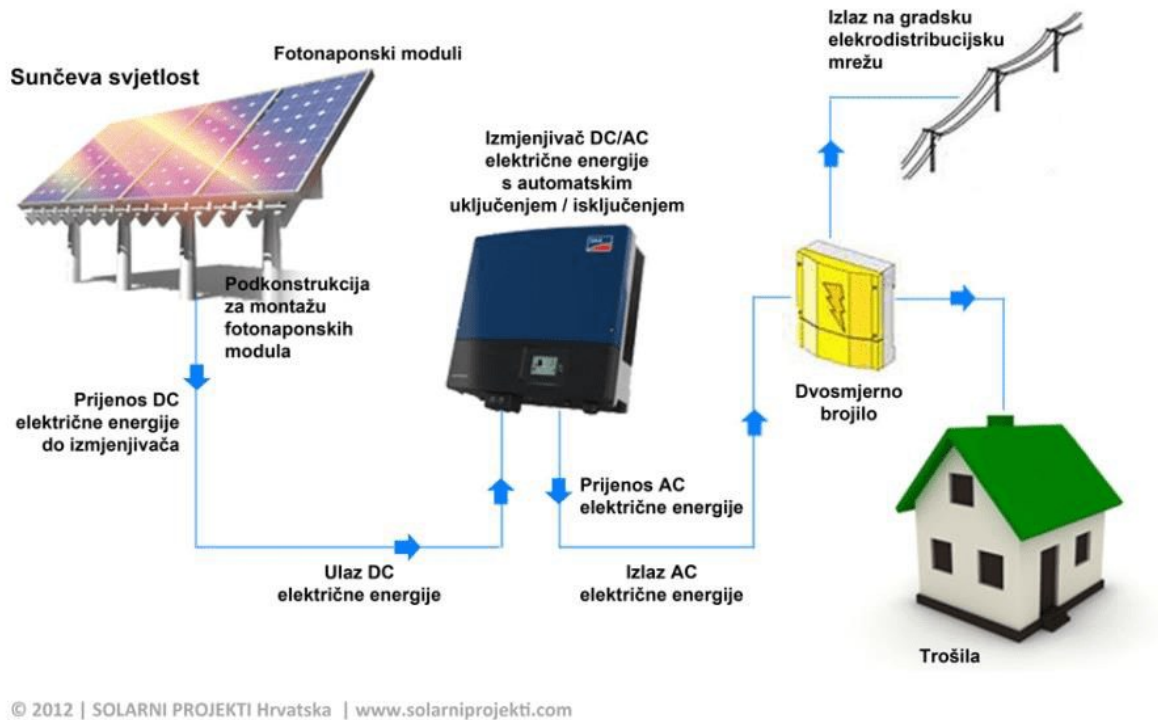
Na AC strani kabel mora zadovoljiti izraz odnosno uvjet [1] :

$$I_{z,AC} > \frac{P_i}{U_{AC} \cdot \cos\varphi} \quad (4-13)$$

Zadnja stavka je verifikacija pada napona, pad napona na kabelima koji očekujemo na DC strani se računa kao:

$$\Delta U_{\%} = \frac{P_i \cdot (\rho_1 L_1 + 2\rho_2 L_2 + 2\rho_3 L_3)}{S \cdot U_{MPP,n}} \quad (4-14)$$

L_1 predstavlja duljinu kabela koji služi za povezivanje modula fotonaponskoga niza, L_2 prikazuje duljinu kabela između fotonaponskog niza i glavne razvodne ploče, a L_3 je duljina kabela između glavne razvodne ploče i izmjenjivača [1].

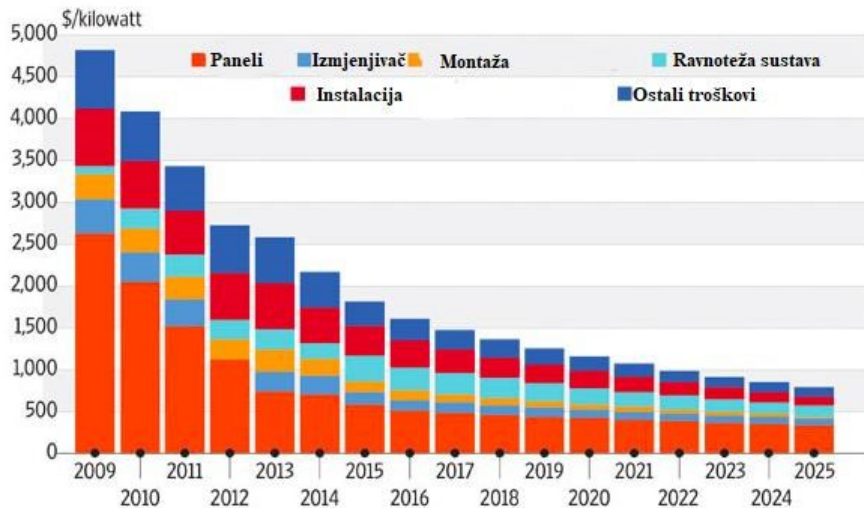


Sl. 4.3. Primjer mrežnog fotonaponskog sustava[25]

4.3. Izgradnja fotonaponskih elektrana

Kod fotonaponskih elektrana investicijski troškovi su najveći. Razvojem materijala i sve češćom uporabom fotonaponske tehnologije, pad investicijskih troškova je sve značajniji. Najveći udio investicijskog troška zauzimaju fotonaponski moduli. Ostale troškove čine: izmjenjivači, montaža, instalacija, dizajn te površina na kojoj se gradi fotonaponska elektrana. Na slici 4.4. je prikazan pad cijena solarnih elektrana po jedinici snage kroz godine. Troškovi rada i održavanja po jedinici snage fotonaponske elektrane iznose od 890 €/kWh do 1.100 €/kWh [26].

Troškovi fotonaponskih elektrana se smanjuju



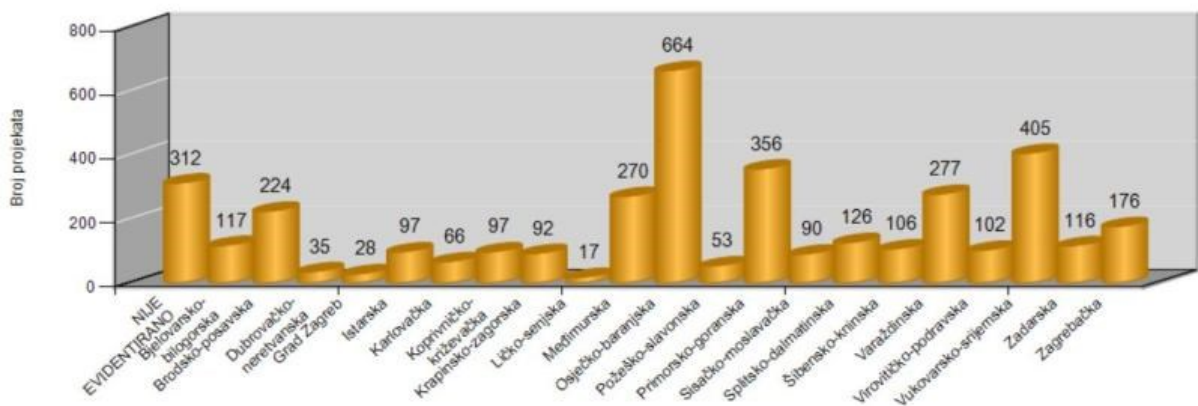
Sl. 4.4. Pad cijena fotonaponskih elektrana posljednjih godina[27]

4.4. Održavanje fotonaponskih elektrana

Želi li se imati što veća učinkovitost fotonaponske elektrane održavanje je neizostavno. Održavanje fotonaponskih elektrana je vrlo jeftino i minimalno zahtjevno. S vremenom dolazi do nakupljanja čestica (prašina, lišće ili druge prljavštine) koje mogu uzrokovati smanjenje učinkovitosti odnosno smanjenje proizvodnje električne energije do 20 %. Prirodne pojave kao kiša, vjetar i snijeg pridonose čišćenju modula. Snijeg u zimskom razdoblju nije potrebno čistiti s panela zbog kuta pod kojim su paneli postavljeni pa snijeg lako s njih sklizne. Detaljnije održavanje i kontrolna mjerenja provodi stručna osoba koja se mora držati uputa koje su dane od proizvođača. Redovitim održavanjem, ispitivanjem i zamjenom istrošenih i oštećenih dijelova pospješujemo životni vijek opreme koji je od 25 do 30 godina[28].

4.5. Fotonaponske elektrane u Hrvatskoj

Neintegrirane fotonaponske elektrane su one elektrane koje se ne postavljaju na krov zgrada ili ostalih objekata. Za njihovu izgradnju na nekoj od odabranih lokacija je potrebna posebna dozvola. Na stranici ministarstva gospodarstva i održivog razvoja pomoću registra OIEKPP-a nalaze se projekti koji su upisani u registar. Prema registru, zajedno sa integriranim fotonaponskim elektranama ukupna instalirana snaga je 49,29 MW, razdiobu projekata po županijama može se vidjeti na slici 4.5. te zaključiti da je u Osječko-baranjskoj županiji najviše projekata [29]. Fokusom na neintegrirane fotonaponske elektrane zbog veće površine i razmjerno tome veće snage pronalazimo sljedeće projekte. Na stranici HEP-a [30] mogu se pronaći neke od naših najvećih neintegriranih fotonaponskih elektrana, a to su: Kaštelir (1 MW), Kaštelir 2 (2 MW) izgrađen na istoj lokaciji kao Kaštelir, Vis (3,5 MW), Marići (1 MW), Kosore Jug (2,1 MW), Stankovci (2,5 MW) [30]. Usprkos značajnom potencijalu, tržište Sunčevom energijom u Hrvatskoj još nije razvijeno do maksimalne razine.



Sl. 4.5. Broj projekata u Hrvatskoj prema OIEKPP-u[29]

5. PRORAČUN

U proračunskom djelu završnog rada usporediti će se iznosi instaliranih snaga i investicije, te proizvedene energije i investicije vjetroelektrane i fotonaponske elektrane te zatim odrediti vremena T_v (vršno). Za jednake instalirane snage elektrana usporediti će se investicijski troškovi, opisati će se i prikazati razdioba troškova za pojedini tip elektrane. Pri jednako proizvedenoj energiji usporediti će se investicijski troškovi i za taj slučaj opisati i usporediti potrebne instalirane snage, na posljetku će se usporediti površine zemljišta potrebne za pojedino rješenje. Tečaj eura koji će se koristiti u proračunu je 7,52 kn.

5.1. Usporedba vršnog vremena vjetroelektrane i fotonaponske elektrane

Vršna vremena vjetroelektrana i fotonaponskih elektrana se računaju kao kvocijent proizvedene električne energije u godini dana i instalirane snage pojedine elektrane. Pri izradi tablice 5.1. koristi se [31] te je odabrano par različitih vjetroelektrana kako bi se dobila srednja vrijednost vršnog vremena.

Tablica 5.1. Vršno vrijeme rada vjetroelektrana

Naziv VE	Instalirana snaga	Proizvedena el. energija	Vršno vrijeme
VE Korlat	58 MW	170 GWh	2931,03 h
VE Lukovac	48 MW	110 GWh	2291,67 h
VE Zelengrad	42 MW	110 GWh	2619,05 h
VE Jelinak	30 MW	81 GWh	2700,00 h
VE Crno brdo	10,5 MW	27 GWh	2571,43 h

$$T_{v1} = \frac{\text{proizvedena el. energija}}{\text{instalirana snaga}} = \frac{170 \cdot 10^9 \text{ Wh}}{58 \cdot 10^6 \text{ W}} = 2931,03 \text{ h}$$

.....

$$T_{v5} = \frac{\text{proizvedena el. energija}}{\text{instalirana snaga}} = \frac{27 \cdot 10^9 \text{ Wh}}{10,5 \cdot 10^6 \text{ W}} = 2571,43 \text{ h}$$

$$T_{v\Sigma} = \frac{\sum \text{proizvedena el. energija}}{\sum \text{instalirana snaga}} = \frac{498 \cdot 10^9 \text{ Wh}}{188,5 \cdot 10^6 \text{ W}} = 2641,9 \text{ h}$$

Kao srednje vršno vrijeme $T_{v\Sigma}$ vjetroelektrane dobije se 2641,90 h.

Pomoću [30] izrađena je tablica 5.2., izabrano je nekoliko fotonaponskih elektrana kako bi se dobilo srednje vršno vrijeme fotonaponskih elektrana .

Tablica 5.2. Vršno vrijeme rada fotonaponskih elektrana

Naziv VE	Instalirana snaga	Proizvedena el. energija	Vršno vrijeme
FNE Kaštelir	1 MW	1,4 GWh	1400,00 h
FNE Kaštelir 2	2 MW	2,9 GWh	1450,00 h
FNE Vis	3,5 MW	5 GWh	1428,57 h
FNE Kosore Jug	2,1 MW	2,9 GWh	1380,95 h
FNE Obrovac	8,7 MW	11,3 GWh	1298,85 h

$$T_{v1} = \frac{\text{proizvedena el. energija}}{\text{instalirana snaga}} = \frac{1,4 \cdot 10^9 \text{ Wh}}{1 \cdot 10^6 \text{ W}} = 1400,00 \text{ h}$$

.....

$$T_{v5} = \frac{\text{proizvedena el. energija}}{\text{instalirana snaga}} = \frac{11,3 \cdot 10^9 \text{ Wh}}{8,7 \cdot 10^6 \text{ W}} = 1298,85 \text{ h}$$

$$T_{v\Sigma} = \frac{\Sigma \text{proizvedena el. energija}}{\Sigma \text{instalirana snaga}} = \frac{23,5 \cdot 10^9 \text{ Wh}}{17,3 \cdot 10^6 \text{ W}} = 1358,38 \text{ h}$$

Kao srednje vršno vrijeme $T_{v\Sigma}$ fotonaponskih elektrana dobije se 1358,38 h.

Usporedi li se srednje vršno vrijeme vjetroelektrana (2641,90 h) i fotonaponskih elektrana (1358,38 h) može se zaključiti da vjetroelektrane imaju znatno veće vršno vrijeme.

5.2. Usporedba investicijskih troškova po instaliranoj snazi

Usporedbu investicijskih troškova je potrebno vršiti za jednake instalirane snage. Vjetroelektrane u pravilu imaju znatno veću instaliranu snagu u usporedbi sa fotonaponskim elektranama. Kako bi se prikazala usporedba troškova za jednaku instaliranu snagu, izabrana je jedna manja vjetroelektrana, odnosno vjetroelektrana Velika Popina instalirane snage 9,2 MW. Približno jednaku instaliranu snagu ima fotonaponska elektrana Obrovac (8,7 MW).

Investicija izgradnje vjetroelektrane Velika Popina (9,2 MW) iznosila je 16 milijuna eura, što je približno 120.320.000,00 kn [32]. Tablica 5.3. razdiobe troškova napravljena je prema slici 3.5. koja prikazuje postotke razdiobe troškova.

Tablica 5.3. Razdioba investicijskih troškova vjetroelektrane (VE Velika Popina)

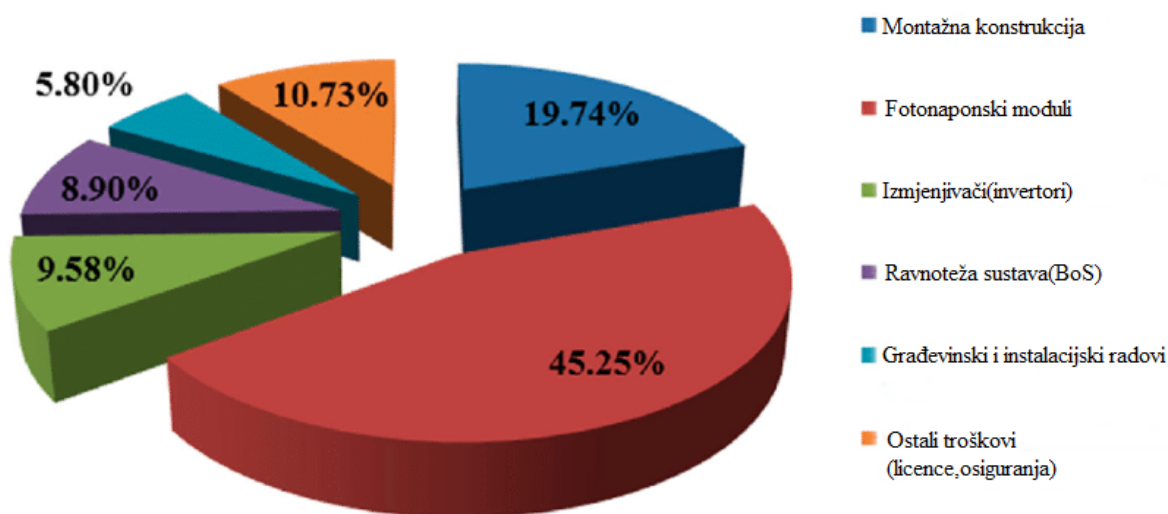
Vrsta troška	Postotak investicijskog troška	Trošak u kunama
Vjetroagregati	75,6 %	90.961.920,00 kn
Priključak	8,9 %	10.708.480,00 kn
Temelji	6,5 %	7.820.800,00 kn
Pravo gradnje	3,9 %	4.692.480,00 kn
Razvod vjetroelektrane	1,5 %	1.804.800,00 kn
Konzultantske usluge	1,2 %	1.443.840,00 kn
Troškovi kapitala	1,2 %	1.443.840,00 kn
Pristupni putevi	0,9 %	1.082.880,00 kn
Upravljački sustav	0,3 %	360.960,00 kn
UKUPNO	100 %	120.320.000,00 kn

Podjeli li se ukupan trošak sa snagom u kilowatima dobije se cijena investicijskog troška po jedinici snage.

$$\begin{aligned}
 \text{cijena po jedinici snage} &= \frac{\text{ukupan trošak}}{\text{instalirana snaga u kW}} = \frac{120.320.000 \text{ kn}}{9200 \text{ kW}} \\
 &= 13.078,26 \text{ kn/kW}
 \end{aligned}$$

Cijena investicijskog troška po jedinici snage iznosi 13.078,26 kn/kW, odnosno 1.739,13 €/kW.

Fotonaponska elektrana Obrovac instalirane snage 8,7 MW investicija je vrijedna 52 milijuna kuna. Slika 5.1 prikazuje razdiobu investicijskih troškova fotonaponske elektrane. Fotonaponski moduli zauzimaju udio od 45,25 %, montažna konstrukcija 19,74 %, ostali troškovi (licence, osiguranja) 10,73 %, invertori 9,58 %, BoS (ravnoteža sustava) 8,90 % te građevinski i instalacijski radovi 5,80 %.



Sl. 5.1. Razdioba investicijskih troškova fotonaponske elektrane [33]

Tablica 5.4. predstavlja razdiobu investicijskih troškova izgradnje fotonaponske elektrane Obrovac.

Tablica 5.4. Razdioba investicijskih troškova fotonaponske elektrane Obrovac

Vrsta troška	Postotak investicijskog troška	Trošak u kunama
Fotonaponski moduli	45,25 %	23.530.000,00 kn
Montažna konstrukcija	19,74 %	10.264.800,00 kn
Ostali troškovi	10,73 %	5.579.600,00 kn
Invertori	9,58 %	4.981.600,00 kn
BoS	8,90 %	4.628.000,00 kn
Građevinski i instalacijski radovi	5,80 %	3.016.000,00 kn
UKUPNO	100 %	52.000.000,00 kn

Podijeli se ukupan trošak sa snagom u kilowatima dobije se cijena investicijskog troška po jedinici snage.

$$\text{cijena po jedinici snage} = \frac{\text{ukupan trošak}}{\text{instalirana snaga u kW}} = \frac{52.000.000 \text{ kn}}{8700 \text{ kW}} = 5.977,00 \text{ kn/kW}$$

Cijena investicijskog troška po jedinici snage iznosi 5.977,00 kn/kW, odnosno 794,81 €/kW. Usporedi li se investicijske troškove vjetroelektrane i fotonaponske elektrane jasno je vidljivo da je cijena investicijskog troška po jedinici snage znatno manja kod fotonaponskih elektrana (794,81 €/kW) u odnosu na vjetroelektrane (1.739,13 €/kW).

5.3. Usporedba investicijskih troškova pri jednako proizvedenoj energiji te opis potrebnih instaliranih snaga

Vjetroelektrana Velika Popina instalirane snage 9,2 MW godišnje proizvede 26 GWh električne energije [32]. Fotonaponska elektrana Obrovac instalirane snage 8,7 MW godišnje proizvede 11,3 GWh električne energije [30]. Usporede li se te dvije elektrane, zaključuje se da vjetroelektrane proizvode znatno veću godišnju količinu električne energije. Kako bi se usporedili investicijski troškovi pri jednako proizvedenoj električnoj energiji fotonaponsku elektranu je potrebno skalirati, odnosno proračunom će se prikazati koliko bi instalirana snaga trebala biti veća kako bi se dobila jednaka količina proizvedene električne energije za životnog vijeka. Dijeljenjem godišnje proizvedene električne energije vjetroelektrane i fotonaponske elektrane, zaključuje se da vjetroelektrane proizvode 2,3 puta veću električnu energiju. Iz čega se može zaključiti da bi se nova instalirana snaga fotonaponske elektrane trebala povećati za 2,3 puta.

$$\text{Nova instalirana snaga} = 8,7 \text{ MW} \cdot 2,3 = 20,01 \text{ MW}$$

Vidimo da bi nova instalirana snaga fotonaponske elektrane trebala iznositi 20,01 MW te bi tada godišnja proizvodnja električne energije iznosila 25,99 GWh.

$$\begin{aligned} \text{nova god. proizvodnja FNE} &= \frac{\text{trenutna god. proizvodnja}}{\text{instalirana snaga}} \cdot \text{nova instalirana snaga} \\ &= \frac{11,3 \text{ GWh}}{8,7 \text{ MW}} \cdot 20,01 \text{ MW} = 25,99 \text{ GWh} \end{aligned}$$

Ukoliko se povećala instalirana snaga za 2,3 puta, razmjerno tome bi se povećali i investicijski troškovi fotonaponske elektrane za 2,3 puta.

$$\begin{aligned} \text{novi investicijski trošak FNE} &= 2,3 \cdot \text{inv. trošak} = 2,3 \cdot 6.914.893,60 \text{ €} \\ &= 15.904.255,28 \text{ €} \end{aligned}$$

Novi investicijski trošak fotonaponske elektrane sada iznosi 15.904.255,28 € što je jednako 119.599.999,70 kn. Investicijski trošak vjetroelektrane Velika Popina ostao je nepromijenjen i iznosi 16 milijuna eura, što je približno 120.320.000,00 kn.

Uzme li se u obzir životni vijek fotonaponskih elektrana koji je oko 25 godina [34]. Ukupna proizvodnja energije fotonaponske elektrane za njenoga životnoga vijeka iznosila bi:

$$\begin{aligned} \text{proizvodnja za životnog vijeka FNE} &= 25 \cdot \text{nova god. proizvodnja FNE} \\ &= 25 \cdot 25,99 \text{ GWh} = 649,75 \text{ GWh} \end{aligned}$$

Proizvodnja fotonaponske elektrane za životnog vijeka bi bila 649,75 GWh.

Investicijski trošak po jedinici proizvedene energije za životnog vijeka fotonaponske elektrane se dobije kao omjer novog investicijskog troška i proizvodnje za životnog vijeka te iznosi 24.477,50 €/GWh odnosno 184.070,80 kn/GWh

$$\begin{aligned} \text{investicijski trošak po GWh FNE} &= \frac{\text{novi investicijski trošak}}{\text{proizvodnja za životnog vijeka}} = \frac{15.904.255,28 \text{ €}}{649,75 \text{ GWh}} \\ &= 24.477,50 \text{ €/GWh} \end{aligned}$$

Životni vijek vjetroelektrana je nešto manji i iznosi 20 godina [35].

$$\begin{aligned} \text{proizvodnja za životnog vijeka VE} &= 20 \cdot \text{god. proizvodnja VE} = 20 \cdot 26 \text{ GWh} \\ &= 520 \text{ GWh} \end{aligned}$$

Životna proizvodnja vjetroelektrane iznosi 520 GWh. Investicijski trošak po jedinici proizvedene energije za životnog vijeka vjetroelektrane iznosi 30.769,23 €/GWh što je 231.384,60 kn/GWh.

$$\begin{aligned} \text{investicijski trošak po GWh VE} &= \frac{\text{investicijski trošak}}{\text{proizvodnja za životnog vijeka VE}} = \frac{16.000.000 \text{ €}}{520 \text{ GWh}} \\ &= 30.769,23 \text{ €/GWh} \end{aligned}$$

Usporede li se investicijski troškovi za životnih vijekova elektrana može se uočiti da investicijski trošak po GWh fotonaponske elektrane je manji (184.070,80 kn/GWh) u odnosu na investicijski trošak po GWh vjetroelektrane (231.384,60 kn/GWh).

5.4. Usporedba vjetroelektrana i fotonaponskih elektrana prema površini

Površine vjetroelektrana u Hrvatskoj su širokog raspona. Vjetroelektrana Korlat instalirane snage 58 MW i godišnje proizvodnje električne energije od 170 GWh smještena je na površini od 10 km^2 [36]. Vjetroelektrana Senj koja je još uvijek u probnom radu i koja ima instaliranu snagu od 156 MW te procijenjenu godišnja proizvodnja od 530 GWh postavljena je na površini od 65 km^2 [37]. Vjetroelektrana Danilo sa instaliranom snagom od 43,7 MW i godišnjom proizvodnjom od 100 GWh raspoređene se na površini od 210 hektara odnosno na $2,1 \text{ km}^2$ [38]. Tablica 5.5. prikazuje razdiobu snage i godišnje proizvedene električne energije vjetroelektrana ovisno o površinama na kojima se nalaze.

Tablica 5.5. Razdioba snage i proizvedene električne energije vjetroelektrane ovisno o površini

Naziv VE	Instalirana snaga	Godišnja proizvodnja el. energije	Površina	Razdioba snage	Razdioba energije
VE Korlat	58 MW	170 GWh	10 km^2	$5,80 \text{ MW/km}^2$	17,00 GWh/ km^2
VE Senj	156 MW	530 GWh	65 km^2	$2,40 \text{ MW/km}^2$	8,15 GWh/ km^2
VE Danilo	43,7 MW	100 GWh	$2,1 \text{ km}^2$	$20,81 \text{ MW/km}^2$	47,62 GWh/ km^2

Fotonaponske elektrane su znatno manjih površina. FNE Kaštelir 2 snage 2 MW i godišnje proizvodnje električne energije od 2,9 GWh prostire se na $0,04 \text{ km}^2$, pritom FNE Marići instalirane snage 1 MW i proizvodnje električne energije od 1,2 GWh raspoređene se na površini od $0,018 \text{ km}^2$. Jedna od najvećih fotonaponskih elektrana FNE Obrovac ima instaliranu snagu od 8,7 MW, godišnju proizvodnju od oko 11,3 GWh te se nalazi na površini od $0,117 \text{ km}^2$ [30].

Tablica 5.6. prikazuje razdiobu snage i godišnje proizvedene električne energije fotonaponski elektrana ovisno o površini na kojoj se nalaze.

Tablica 5.6. Razdioba snage i proizvedene električne energije fotonaponske elektrane ovisno o površini

Naziv FNE	Instalirana snaga	Godišnja proizvodnja el. energije	Površina	Razdioba snage	Razdioba energije
FNE Kaštelir 2	2 MW	2,9 GWh	0,04 km ²	50,00 MW/km ²	72,50 GWh/km ²
FNE Marići	1 MW	1,2 GWh	0,018 km ²	55,55 MW/km ²	66,66 GWh/km ²
FNE Obrovac	8,7 MW	11,3 GWh	0,117 km ²	74,36 MW/km ²	96,58 GWh/km ²

Usporedbom razdiobe snage i energije, može se zaključiti da su snaga i energija po jedinici površine znatno veće kod fotonaponskih elektrana u odnosu na vjetroelektrane. Velika prednost vjetroelektrana je u tome što se njihova površina može dodatno iskoristiti za obradu zemlje ukoliko je zemlja obradiva te uzgajanje raznih životinjskih vrsta. Nedostupna je samo površina cestovnih prilaza i površina samog platoa pojedinih agregata. Kod fiksnih fotonaponskih elektrana površina odnosno zemlja nema mogućnost iskorištenja.

Tablica 5.7. predstavlja preglednu rekapitulaciju svih proračuna.

Tablica 5.7. Pregledna rekapitulacija svih proračuna

Tip elektrane	Vršno vrijeme T_v	Investicijski trošak prema instaliranoj snazi	Investicijski trošak prema jednako proizvedenoj energiji	Površina
Fotonaponska elektrana	1358,38 h	794,81 €/kW	24.477,50 €/GWh	Fotonaponske elektrane zahtijevaju manju površinu
Vjetroelektrana	2641,90 h	1.739,13 €/kW	30.769,23 €/GWh	

6. ZAKLJUČAK

Tema ovog završnog rada je usporedba energetske karakteristike vjetroelektrana i fotonaponskih elektrana. Minimalna iskoristivost vjetroelektrana postiže se na lokacijama gdje je brzina vjetra veća od 4,5 m/s. Mjerenje vjetropotencijala je ključno za izbor povoljne lokacije za izgradnju vjetroelektrana, naravno uz brojne proračune. Procjena proizvodnje energije vjetroelektrane može se izvršiti uz dva poznata parametra, a to su brzina vjetra (zapravo ruža vjetrova) i karakteristika vjetroturbine koja je definirana snagom turbine, te njihov umnožak daje procijenjenu vrijednost. Najveći udio troškova u izgradnji vjetroelektrane zauzimaju investicijski troškovi.

Hrvatska ima velik potencijal iskorištavanja Sunčeve energije, koji još uvijek nije iskorišten u potpunosti. Dizajniranje fotonaponskih elektrana je vrlo kompleksan projekt u kojem svaka sitnica igra veliku ulogu. Fotonaponski moduli koji pretvaraju energiju Sunca u električnu energiju čine najveći postotak investicijskih troškova. Broj solarnih elektrana u Hrvatskoj se svakom godinom znatno povećava.

Godišnje vršno vrijeme T_v , koje predstavlja omjer proizvedene električne energije u godinu dana i instalirane snage, bilo je znatno veće kod vjetroelektrana. Investicijski troškovi po instaliranoj snazi dobiju se kao kvocijent ukupnog investicijskog troška i instalirane snage pojedine elektrane. Fotonaponske elektrane imaju manje investicijske troškove po instaliranoj snazi u odnosu na vjetroelektrane. Pri proračunu investicijskog troška po proizvedenoj energiji bilo je potrebno skalirati snagu fotonaponskih elektrana zbog toga što vjetroelektrane imaju veće instalirane snage. Nakon skaliranja izračunati su investicijski troškovi po proizvedenoj energiji za životnog vijeka pojedine elektrane i zaključuje se da fotonaponske elektrane imaju manji investicijski trošak. Po pitanju površine uveliko manji prostor zahtijevaju fotonaponske elektrane iako površine VE mogu ostati obradive za poljoprivredu i stočarstvo.

Svaka od pojedinih elektrana ima svoje prednosti i nedostatke, ali je sigurno da će se svijet u budućnosti zbog ekoloških i ekonomskih razloga sve više morati posvetiti obnovljivim izvorima energije.

7. SAŽETAK

Tematika ovog završnog rada su vjetroelektrane i fotonaponske elektrane. U teorijskom dijelu se upoznaje sa potencijalom Hrvatske u usporedbi s ostatkom svijeta te sa osnovnim karakteristikama vjetroelektrana i fotonaponskih elektrana. Dobiva se uvid u projektiranje, izgradnju i održavanje oba tipa elektrana.

U proračunskom dijelu uspoređuju se energetske karakteristike vjetroelektrana i fotonaponskih elektrana. Izborom nekoliko vjetroelektrana te fotonaponskih elektrana dobivaju se srednja vršna vremena, uspoređuju se te dovode do zaključka da vjetroelektrane imaju veće vršno vrijeme. Usporedba investicijskih troškova iste instalirane snage vjetroelektrane i fotonaponske elektrane provodila se na način da se pomoću prikupljenih podataka o postotku investicijskog troška po komponenti elektrane došlo do cijene u kuni po kilovatu odnosno euru po kilovatu. Utvrđuje se manja cijena kod fotonaponskih elektrana po jedinici snage. Kako bi se usporedili investicijski troškovi po jednako proizvedenoj električnoj energiji fotonaponsku elektranu je bilo potrebno skalirati odnosno povećati joj instaliranu snagu kako bi se dobila približno jednaka proizvedena električna energija za životnog vijeka, samim time se povećala i vrijednost investicije. Fotonaponske elektrane imaju manji investicijski trošak pri jednako proizvedenoj energiji, unatoč tome što se povećao investicijski trošak, najviše tome pridonosi duži životni vijek fotonaponskih elektrana. Pomoću prikupljenih podataka utvrđeno je da znatno veću razdiobu snage i energije imaju fotonaponske elektrane po jedinici površine, zbog toga što se vjetroelektrane rasprostiru na znatno većoj površini.

KLJUČNE RIJEČI:

Električna energija, obnovljivi izvor energije, vjetar, sunce, brzina, energija, vjetroelektrane, fotonaponske elektrane, projektiranje, izgradnja, održavanje, atlas vjetra, vjetropotencijal, insolacija, fotonaponski modul, vjetroturbina, vršno vrijeme, instalirana snaga, proizvedena energija, površina.

8. ABSTRACT

The main topics in this paper are wind power plants and photovoltaic power plants. In theoretical part of the paper, wind power potential in Croatia is compared to that in the rest of the world. Also, main characteristics of wind power plants and photovoltaic plants are introduced. Goal is to get the insight into design, construction and maintenance of both types of power plants.

In the calculation part of the paper, power characteristics of wind power plants and photovoltaic power plants are compared. By choosing several wind power plants and photovoltaic plants, the average peak times are obtained, they are then compared which leads to conclusion that wind power plants have greater average peak time. The comparison of the investment costs of the equal installed power of a wind power plant and a photovoltaic power plant was carried out in such a way that the collected data on the percentage of the investment cost per power plant component lead to the price in kuna per kilowatt, or euro per kilowatt. A lower price is determined for photovoltaic power plants per unit of power. In order to compare the investment costs for the same amount of electrical energy produced, it was necessary to scale the photovoltaic power plant, i.e. increase its installed power in order to obtain approximately the same amount of electricity produced for its lifetime, which caused the value of investment to rise. Photovoltaic power plants have a lower investment cost for the same amount of energy produced, despite the fact that the investment cost has increased, the main contributing factor is the longer lifespan of photovoltaic power plants. Using the collected data, it was determined that photovoltaic power plants have a significantly higher distribution of power and energy per unit area, due to the fact that wind farms are spread over a significantly larger area.

KEY WORDS

Electrical energy, renewable energy, wind, sun, velocity, energy, wind farms, photovoltaic plants, design, construction, maintenance, wind atlas, wind potential, insolation, photovoltaic module, wind turbine, peak time, installed power, generated energy, area.

9. LITERATURA

- [1] D. Šljivac i D. Topić, *OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE*. Osijek: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 2018.
- [2] F. Mužinić i D. Škrlec, „MODELIRANJE PROJEKTNIH RIZIKA U RAZVOJU PROJEKTA VJETROELEKTRANE“, *J. Energy Energ.*, sv. 56, izd. 4, str. 490–517, kol. 2007.
- [3] M. Primorac, „EKONOMSKA ANALIZA PRIMJENE FOTONAPONSKOG SUSTAVA“, *Obraz. Za Poduzet. - E4E Znan. Stručni Časopis O Obraz. Za Poduzet.*, sv. 6, izd. 2, str. 125–132, pros. 2016.
- [4] I. Gašparović, M. Gašparović, D. Medak, i M. Zrinjski, „Analiza prostornih podataka o solarnom potencijalu za Hrvatsku“, *Geod. List*, sv. 73 (96), izd. 1, str. 25–44, ožu. 2019.
- [5] „Efficiency of solar PV, then, now and future – Solar photovoltaic“. <https://sites.lafayette.edu/egrs352-sp14-pv/technology/history-of-pv-technology/> (pristupljeno 29. kolovoz 2022.).
- [6] „The World’s Biggest Wind Farms“. <https://www.nesfircroft.com/blog/2021/11/the-worlds-biggest-wind-farms> (pristupljeno 29. kolovoz 2022.).
- [7] „vjetroelektrana | Hrvatska enciklopedija“. <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=64999> (pristupljeno 06. lipanj 2022.).
- [8] „DHMZ - Državni hidrometeorološki zavod.“ https://meteo.hr/klima.php?section=klima_hrvatska¶m=k1_8 (pristupljeno 15. lipanj 2022.).
- [9] A. Bajić, S. Ivatek-Šahdan, and K. Horvath, “PROSTORNA RAZDIOBA BRZINE VJETRA NA PODRUČJU HRVATSKE DOBIVENA NUMERIČKIM MODELOM ATMOSFERE ALADIN Spatial distribution of wind speed in Croatia obtained using the ALADIN model,” 2007.
- [10] “Global wind power at 80 m.” https://web.stanford.edu/group/efmh/winds/global_winds.html (pristupljeno 07. lipanj 2022.).
- [11] “Koje su najveće brzine vjetra izmjerene u Hrvatskoj? | Crometeo.” <https://www.crometeo.hr/koje-su-najvece-brzine-vjetra-izmjerene-u-hrvatskoj/> (pristupljeno 07. lipanj 2022.).
- [12] “File:Global Map of Wind Speed.png - Wikimedia Commons.” https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Global_Map_of_Wind_Speed.png (pristupljeno 28. lipanj 2022.).
- [13] “Vjetroenergetika Energetski institut Hrvoje Požar-Odjel za OIE i EE ENergy Efficiency and Renewables-SUPporting Policies in Local level for Energy Energetska efikasnost i obnovljivi izvori energije-potporna kreiranje energetske politike na lokalnoj razini.”
- [14] “HEP grupa - Vjetroelektrana Korlat.” <https://www.hep.hr/projekti/obnovljivi-izvori-energije/vjetroelektrana-korlat/3468> (pristupljeno 28. lipanj 2022.).
- [15] “(PDF) MJERENJA VJETROPOTENCIJALA NA VEĆIM VISINAMA WIND MEASUREMENTS IN BIGGER HEIGHTS | Hidajet Salkic - Academia.edu.” https://www.academia.edu/7483787/MJERENJA_VJETROPOTENCIJALA_NA_VE%C4%86I_M_VISINAMA_WIND_MEASUREMENTS_IN_BIGGER_HEIGHTS (pristupljeno 13. lipanj 2022.).
- [16] “Figure 2 | A new approximate capacity factor method for matching wind turbines to a site: case study of Humber region, UK | SpringerLink.”

<https://link.springer.com/article/10.1007/s40095-019-00320-5/figures/2> (pristupljeno 28. lipanj 2022).

[17] S. Krohn, P.-E. Morthorst, and S. Awerbuch, “The Economics of Wind Energy A report by the European Wind Energy Association.” [Online]. Available: www.inextremis.be

[18] D. Topić and L. Jozsa, “Održavanje vjetroelektrane na temelju promatranja stanja sustava”, doi: 10.13140/RG.2.1.3634.7923.

[19] “HEP grupa - Vjetroelektrana Korlat.” <https://www.hep.hr/projekti/obnovljivi-izvori-energije/vjetroelektrana-korlat/3468> (pristupljeno 15. lipanj 2022).

[20] “HEP Proizvodnja d.o.o. - Sunčane elektrane.” <https://www.hep.hr/proizvodnja/obnovljivi-izvori-energije/suncane-elektrane/1726> (pristupljeno 15. lipanj 2022).

[21] M. Kalea, *OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE*. Zagreb: KIKLOS - KRUG KNJIGE d.o.o, 2014.

[22] “Solar resource maps and GIS data for 200+ countries | Solargis.” <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/europe> (pristupljeno 15. lipanj 2022).

[23] “DHMZ - Državni hidrometeorološki zavod.” https://meteo.hr/klima.php?section=klima_hrvatska¶m=k1_6 (pristupljeno 15. lipanj 2022).

[24] “Solar Sun Hours | Average Daily Solar Insolation | Europe.” <https://www.hotspotenergy.com/DC-air-conditioner/europe-solar-hours.php> (pristupljeno 15. lipanj 2022).

[25] “Fotonaponski sustavi - Eko-sustav d.o.o.” <https://eko-sustav.hr/strucni-clanci/fotonaponski-sustavi/> (pristupljeno 17. lipanj 2022).

[26] “What Is a Solar Farm? Costs, Land Needs & More.” <https://www.solarreviews.com/blog/what-is-a-solar-farm-do-i-need-one> (pristupljeno 20. lipanj 2022).

[27] “Solar Energy: How much has the price of a solar cell changed over the years? And how cheap can it be in 2025? - Quora.” <https://www.quora.com/Solar-Energy-How-much-has-the-price-of-a-solar-cell-changed-over-the-years-And-how-cheap-can-it-be-in-2025> (pristupljeno 20. lipanj 2022).

[28] “Solarna energija - Solekt.” <https://solekt.hr/solarna-energija/> (pristupljeno 20. lipanj 2022).

[29] “Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja Republike Hrvatske - Registar OIEKPP.” <https://mingor.gov.hr/o-ministarstvu-1065/djelokrug/uprava-za-energetiku-1999/registar-oiekpp/5332> (pristupljeno 20. lipanj 2022).

[30] “HEP grupa - Neintegrirane sunčane elektrane.” <https://www.hep.hr/projekti/obnovljivi-izvori-energije/neintegrirane-suncane-elektrane/3422> (pristupljeno 20. lipanj 2022).

[31] “Vjetroelektrane u Hrvatskoj – Wikipedija.” https://hr.wikipedia.org/wiki/Vjetroelektrane_u_Hrvatskoj (pristupljeno 21. lipanj 2022).

[32] “Vjetroelektrana Velika Popina.” <https://www.vjetroelektrane.com/vjetroelektrane-u-regiji/218-vjetroelektrana-velika-popina> (pristupljeno 22. lipanj 2022).

- [33] “Breakup cost of Solar PV plant per MW basis. | Download Scientific Diagram.” https://www.researchgate.net/figure/Breakup-cost-of-Solar-PV-plant-per-MW-basis_fig7_321337480 (pristupljeno 22. lipanj 2022).
- [34] “How Long Do Solar Panels Really Last? | Sunrun.” <https://www.sunrun.com/go-solar-center/solar-articles/how-long-do-solar-panels-really-last> (pristupljeno 29. lipanj 2022).
- [35] “How Long do Wind Turbines Last? Can their Lifetime be Extended? - TWI.” <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/how-long-do-wind-turbines-last> (pristupljeno 29. lipanj 2022).
- [36] “STUDIJA O UTJECAJU NA OKOLIŠ VJETROELEKTRANA KORLAT - netehnički sažetak.” [Online]. Available: www.vitaprojekt.hr
- [37] “Vlada Republike Hrvatske - Projektom Vjetroelektrane Senj približavamo se ostvarivanju ciljeva u proizvodnji energije iz obnovljivih izvora.” <https://vlada.gov.hr/vijesti/projektom-vjetroelektrane-senj-priblizavamo-se-ostvarivanju-ciljeva-u-proizvodnji-energije-iz-obnovljivih-izvora/33503> (pristupljeno 27. lipanj 2022).
- [38] “CroatiaDaniloWind.” [Online]. Available: <https://library.pppknowledgelab.org/documents/3543/download> (pristupljeno 27. lipanj 2022).

10. ŽIVOTOPIS

Josip Šimunović rođen je 03.02.2001. u Osijeku. Osnovnu školu je pohađao u Petlovcu, mjesto u kojemu i sada živi. Završio je Prvu srednju školu u Belom Manastiru smjer elektrotehnike te je zbog odličnog uspjeha imao izravan upis na Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, koji započinje studirati 2019. godine. Nakon završetka prve godine studija odabrao je smjer elektroenergetike. Tijekom trogodišnjeg studiranja stekao je znanja rada na računalu u programima kao što su: Word, C++, Excel, AutoCAD i razni drugi programi.

2022. godine upisuje diplomski studij na istoimenome fakultetu.

Potpis autora