

Male vjetroelektrane

Škorić, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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:200:393801>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-28**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEK

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

Sveučilišni studij

Male vjetroelektrane

Završni rad

Ivan Škorić

Osijek, 2023

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

Osijek, 14.09.2023.

Odboru za završne i diplomske ispite

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

Ime i prezime Pristupnika:	Ivan Škorić
Studij, smjer:	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	4890, 30.07.2020.
OIB Pristupnika:	34435326314
Mentor:	prof. dr. sc. Zvonimir Klaić
Sumentor:	Zorislav Kraus, dipl. ing. el.
Sumentor iz tvrtke:	
Naslov završnog rada:	Male vjetroelektrane
Znanstvena grana rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak završnog rad:	Sumentor: Zorislav Kraus Rezervirano: Ivan Škorić
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: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
Datum prijedloga ocjene od strane mentora:	14.09.2023.
Datum potvrde ocjene od strane Odbora:	24.09.2023.
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, 25.09.2023.

Ime i prezime studenta:

Ivan Škorić

Studij:

Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

Mat. br. studenta, godina upisa:

4890, 30.07.2020.

Turnitin podudaranje [%]:

4

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Male vjetroelektrane**

izrađen pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Zvonimir Klaić

i sumentora Zorislav Kraus, dipl. ing. el.

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 i pregled područja teme	1
2. Iskorištavanje vjetra za pogon vjetroelektrane	2
2.1. Energija vjetra	2
2.2. Princip rada vjetroagregata	3
3. Prednosti i nedostaci/izazovi malih vjetroelektrana	5
3.1. Nedostaci malih vjetroelektrana	5
3.2. Prednosti malih vjetroelektrana	7
4. Vrste malih vjetroelektrana	9
4.1. Vjetroagregati s vodoravnom osi vrtnje	9
4.2. Vjetroagregati s okomitom osi vrtnje	11
4.3. Nekonvencionalni tipovi vjetroagregata	13
5. Isplativost izgradnje	15
5.1. Formula izlazne snage	15
5.2. Preduvjeti za isplativost investicije	20
5.3. Lokacije Republike Hrvatske	23
5.4. Situacija u Republici Hrvatskoj	28
6. Zaključak	30
Literatura	31
Sažetak	35
Životopis	36

1. Uvod

1.1. Zadatak završnog rada i pregled područja teme

Ovim će se radom pokušati odgovoriti na pitanja isplativosti izgradnje male vjetroelektrane u Republici Hrvatskoj uz upoznavanje sa potrebnim znanjima potrebnima za zaključak na spomenuto pitanje.

U podnaslovu „Iskorištavanje vjetra za pogon vjetroelektrane” rad će se doticati same srži rada jedne vjetroelektrane. Podnaslov podrazumjeva objašnjenje vjetra kao pojave zajedno sa povijesti vjetroelektrane te njenim mehanizmima i dijelovima koji omogućavaju pretvorbu vjetra u električnu energiju. Idući podnaslov naziva „Prednosti i nedostaci/izazovi male vjetroelektrane” opisuje dobivene prednosti i nedostatke jedne male vjetroelektrane koje se pojavljuju pri pokušaju skaliranja velikih vjetroagregata na manje kako i onih prednosti i nedostataka vezanih uz malu vjetroelektranu gledajući ju kao samostalan uređaj. Podnaslov „Vrste malih vjetroelektrana” govori isključivo o dvijema vrstama vjetroagrata trenutno dostupnima te njihovim različitim tipovima zajedno sa njihovim prednostima. Ovaj podnaslov podrazumijeva i nekonvencionalne tipove koji iako manje dostupni, mogu se pronaći na tržištu. Predzadnji te sadržajem najširi podnaslov „Isplativost izgradnje” zadire u glavni preduvjet za izgradnju male vjetroelektrane – isplativost. Formulom se izlazne snage objašnjavaju različiti čimbenici koji utječu na dobit električne energije koja je ključna za isplativost izgradnje o kojoj se dodatno priča u drugom dijelu istog podnaslova. Nadalje se stečena znanja primjenjuju na različitim lokacijama Republike Hrvatske čime se pobliže pojašnjavaju pojave na tim lokacijama te se uz pomoć dostupnih alata pretpostavlja isplativost izgradnje male vjetroelektrane na istim lokacijama. U posljednjem se dijelu podnaslova pojašnjava trenutna situacija u Republici Hrvatskoj vezanoj za male vjetroelektrane što uključuje učestalost i vrste njihove pojave zajedno sa vezanom argumentacijom.

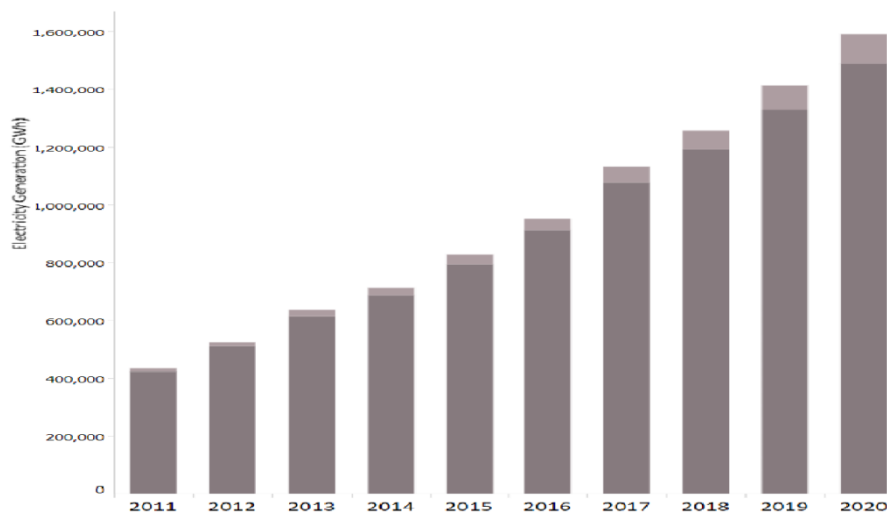
U zaključku se sažimaju sva steknuta znanja u radu čime se u konačnici odgovara na pitanje isplativosti izgradnje male vjetroelektrane u Republici Hrvatskoj te se time zaključuje ovaj rad.

2. Iskorištavanje vjetra za pogon vjetroelektrane

2.1. Energija vjetra

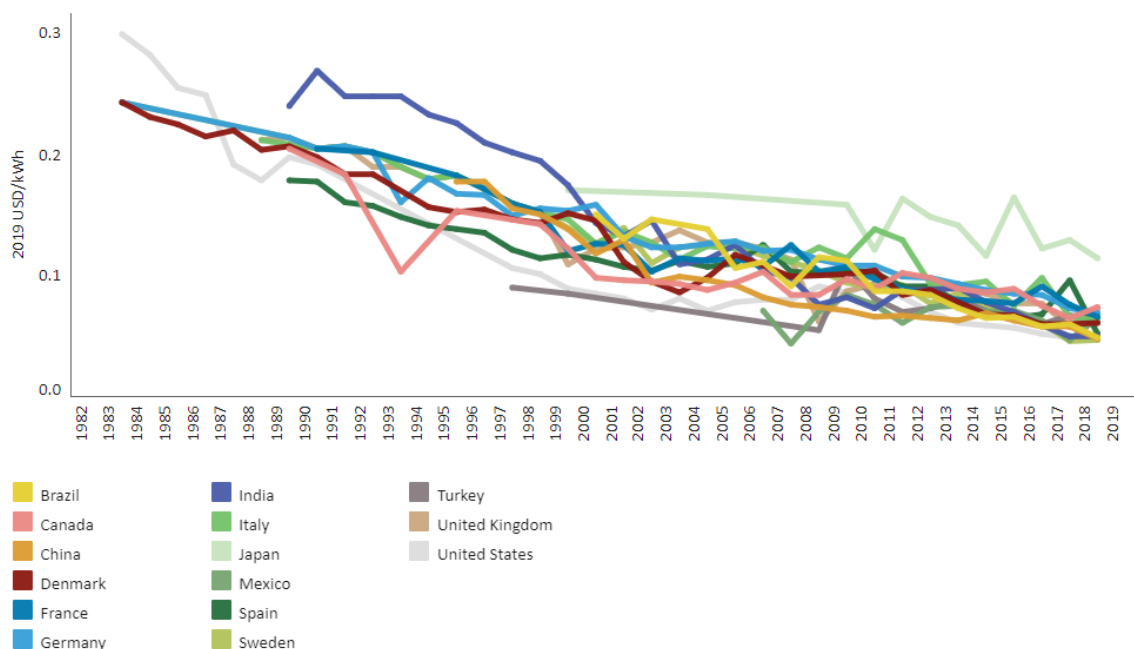
Zrak struji od područja višeg tlaka prema području nižega tlaka što se manifestira različitim temperaturama zraka zbog različitog zagrijavanja atmosfere te tu pojavu nazivamo vjetar. Različitost u zagrijanosti je posljedica Zemljine građe. Različiti materijali zbog njihovog nejednakog specifičnog toplinskog kapaciteta upijaju te zrače toplinu različitim stopom. Postoje i dodatni čimbenici koji utječu na nastanak vjetra kao što su: Zemljine vrtnje, Coriolisove sile, centrifugalne sile te sila trenja s podlogom što čini vjetar vrlo pristupačnim izvorom energije u nekim područjima svijeta. [1]

Vjetar se kao izvor energije koristio još u Perziji u desetom stoljeću kada su se gradile prve vjetrenjače s okomitom osi. Te su se vjetrenjače koristile u svrhu pumpanja vode kao i za pogon mlinova. Danas se energija vjetra koristi kao jedan od načina dobiti električne energije preko raznih modela vjetroelektrana. Energija vjetra raste velikom brzinom od početka 21. Stoljeća što je potaknuto istraživanjima, razvojem, politikom podrške te padovima troškova.[2] Od 1997. godine se u dva desetljeća globalna instalirani kapacitet proizvodnje vjetra (engl. global installed wind generation capacity) povećao za faktor od 98 što je skok sa 7,5 GW na 733 GW prema podacima Međunarodne agencije za obnovljive izvore energije. Uzevši u obzir proizvodnju električne energije, vjetroelektrane su 2018. godine zaslužne za proizvedenih 1588 TWh električne energije, a njihov eksponencijalni rast je omogućio povećanje 2020. godine proizvodnje iste za 170 TWh u odnosu na prethodnu godinu.



Slika 1.1. Porast proizvodnje električne energije u razdoblju od 10 godina [2]

Ako se uzme u obzir povećani trošak električne energije (eng. LCOE), odnosno neto sadašnja vrijednost jediničnog troška električne energije tijekom životnog vijeka proizvodne imovine, moguće je vidjeti pozitivnu promjenu njegovim smanjenjem kroz godine. [3]



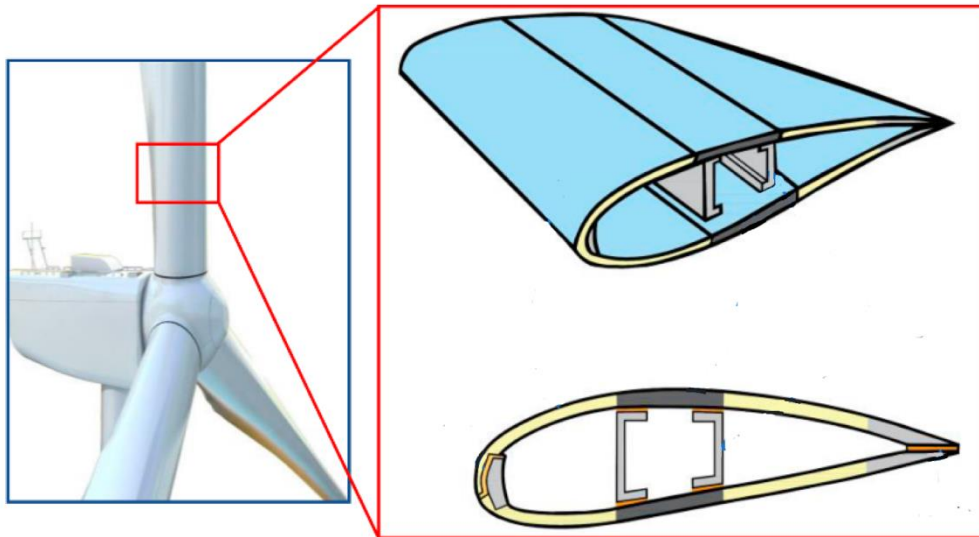
Slika 1.2. Ponderirana aritmetička sredina povećanog troška električne energije vjetroelektrana puštenih u pogon u državama u razdoblju od 1984 – 2019 godine [2]

Sa konzistentnim poboljšanjima u području vjetroenergije, ona konkurira ostalim obnovljivim izvorima energije u svojoj mogućnosti proizvodnji električne energije. Uočavajući ista poboljšanja postavlja se pitanje mogućnosti skaliranja vjetroelektrana na razinu zadovoljanja potreba kućanstva. Za odgovor na pitanje potrebne su određene spoznaje za proizvodnju električne energije vezane uz princip rada vjetroelektrane.

2.2. Princip rada vjetroagregata

Vjetroagregati pretvaraju kinetičku energiju vjetra u mehaničku energiju pa potom u električnu energiju preko električnih generatora. Kao primjer na kojem će se pojasniti pojednostavljen princip rada vjetroagregata bit će uzet vjetroagregat sa horizontalnom osi. Pretvaranje kinetičke energije vjetra u rotacijsku energiju nije moguće bez rotacijskih tijela što su u ovom slučaju rotirajuće lopatice. Moderne lopatice su zakrivljene na nalik krila zrakoplova. Razlog leži u činjenici da fluidi, odnosno vjetar struji većom brzinom preko

zakrivljene površine što u konačnici znači da vjetroagregat postiže više okretaja lopatica za istu brzinu vjetra. Taj efekt naziva se Bernoulijev efekt te je iznimno ključan u projektiranju vjetroagregata, kako kod njegovih lopatica tako i kod samog postavljanja vjetroagregata. Različita brzina vjetra oko lopatica stvara veću silu uzgona koja potiče kretanju lopatica prema strani gdje je brzina vjetra veća što rezultira rotiranjem lopatica. Efikasnosti radi, lopaticice nisu okomite na smjer vjetra nego su nagnute tako da se poveća Bernoulijev efekt.



Slika 1.3. Poprečni presjek lopatica vjetroagregata [4]

Svako gubljenje na brzini rotiranja lopatica iznimno je bitno. Njihova bit leži u što većoj stopi apsorpcije kinetičke energije vjetra što se postiže efikasnijim „hvatanjem„ snage vjetra. Faktori za efikasnost su razni no ponajviše gustoća snage vjetra ovisi o njegovoj brzini.

Općenito za snagu vrijedi da je ona kvocijent energije i vremena, odnosno:

$$P = \frac{dE}{dt} \quad [W] \quad [2 - 1]$$

Svođenjem na jediničnu površinu dobiva se gustoća snage:

$$p = \frac{P}{A} = \frac{dE}{dt} \frac{1}{A} \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad [2 - 2]$$

Gustoća snage vjetra pritom se opisuje formulom:

$$p = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad [2 - 3]$$

Pri čemu je ρ gustoća vjetra, a v njegova brzina.

Iz čega se zaključuje da gustoća snage vjetra, a tako i rotora ovisi o trećoj potenciji brzine vjetra. Iz tog se razloga vjetroagregati postavljaju na što veće visine pošto se brzina vjetra povećava visinom u atmosferi. Nadalje je za vjetroagregate kao što su u ovom primjeru oni sa horizontalnom osi potrebna i mogućnost praćenja vjetra (engl. yawning) kako bi mogli reagirati na promjene smjera vjetra što povećava njihovu efektivnost odnosno izlaz električne energije. Za takvo zakretanje potrebno je znati točnu brzinu vjetra za sve njegove vektore što nije moguće bez uređaja poznatog kao anemometar.

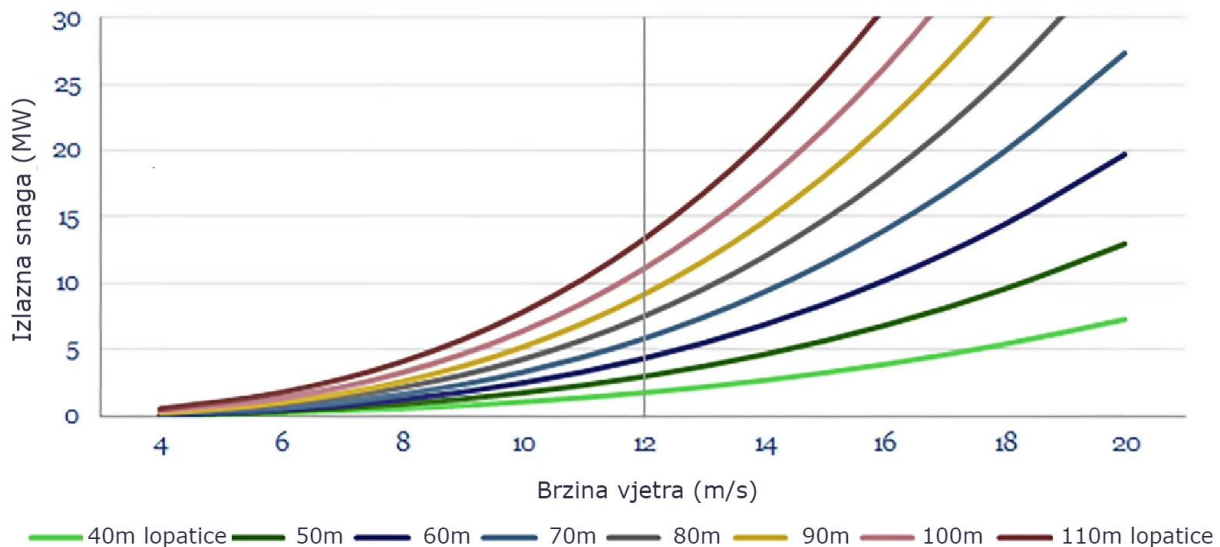
Naravno da sama rotacija rotora ne proizvodi električnu energiju te je za pretvorbu mehaničke energije u električnu potreban generator. Rotori vjetroagregata sa horizontalnom osi u pravilu nikada nisu spojeni direktno na generator iz razloga što je njihov broj okretaja po minuti relativno nizak. Razlog se pronalazi u mehaničkoj snazi rotora te je potom potreban mjenjač koji će na izlazu povećati broj okretaja po minuti za određeni faktor. U slučaju hazardnih uvjeta potrebna je i kočnica koja će obustaviti rad vjetroagregata.

Uz prethodno znanje, sve mehanizme velikog vjetroagregata potrebno je svesti na puno manju skalu što može predstavljati ogromne izazove pri samoj izvedbi. Samo skaliranje na manji model ne dolazi bez svojih nedostataka te je potrebno upoznati se s njima.

3. Prednosti i nedostaci/izazovi malih vjetroelektrana.

3.1. Nedostaci malih vjetroelektrana

Za početak, smanjenjem same konstrukcije smanjuje se i moguće dobivena električna energija. Vremenom je moguće primjetiti i trend povećanja veličine vjetroagregata što nije slučajnost. Već je poznato da za vjetroagregate sa horizontalnom osi veličina radijusa kruga kojeg stvara rotiranje lopatice ima proporcionalnu ovisnost sa dobivenom snagom. Na slici 3.1. to je i prikazano grafički. Uzevši da je brzina vjetra 12 m/s, za lopatice duljine 50 metara izlazna snaga je približno 3 MW dok pri istoj brzini za veličine lopatica od 100 metara se ista snaga poveća za faktor od 4. U suštini to znači da smanjenjem lopatica za dva puta se smanji izlazna snaga za četiri puta.



Slika 3.1. Ovisnost izlazne snage o veličini lopatica [5]

Za male vjetroelektrane je to podosta ključno pošto će njihova mogućnost proizvodnje električne energije već u samom početku biti ograničena njihovom veličinom.

Nadalje, moguće je na grafu primjetiti da izlazna snaga prije određene brzine vjetra iznosi nula. Svaki model vjetroelektrane ima drugačiji prag uključivanja znan kao i „cut-in” brzina vjetra. Za male vjetroagregate, to može biti oko 2,5 m/s no ovisi o vrsti i modelu. Taj pojam objašnjava kako vjetroelektrana nije u sposobnosti generirati električnu energiju za sve brzine vjetra manje od navedene. Takvo ograničenje je pretežito bitno uzeti u obzir pri izboru lokacije i tipa vjetroagregata. Svaka prepreka može prouzrokovati smanjenje brzine vjetra te je iz tog razloga teško pronaći vjetroagregate u urbanim područjima. Za vjetroagregate preporučeno je općenito da prepreke budu udaljene od njih za barem deset puta više nego njihova visina [6] što u urbanim područjima nekada nije moguće realizirati.

Dodatno, u slučajevima kada generator proizvodi istosmjernu struju potreban je izmjenjivač zbog kojeg će se javljati dodatni gubici.

Rad samog vjetroagregata može predstavljati probleme kako za ljude tako i za ostale životne oblike u okolišu. Najčešći stradatelj vjetroenergetskih objekata su ptice pjevice koje migriraju noću što može biti doprineseno njihovom obilju te činjenici da nisu u sposobnosti vidjeti prepreke dobro nakon mraka [7]. Ljudi uglavnom nisu ugroženi radom vjetroagregata no on može biti uzrok nezadovoljstva okoline. Samo njegovo postojanje može pojedincima predstavljati rušenje integriteta okoliša, a sjena koja pri danu nastaje okretanjem lopatica vjetroagregata može smetati pojedincima što rezultira općim nezadovoljstvom. Zbog

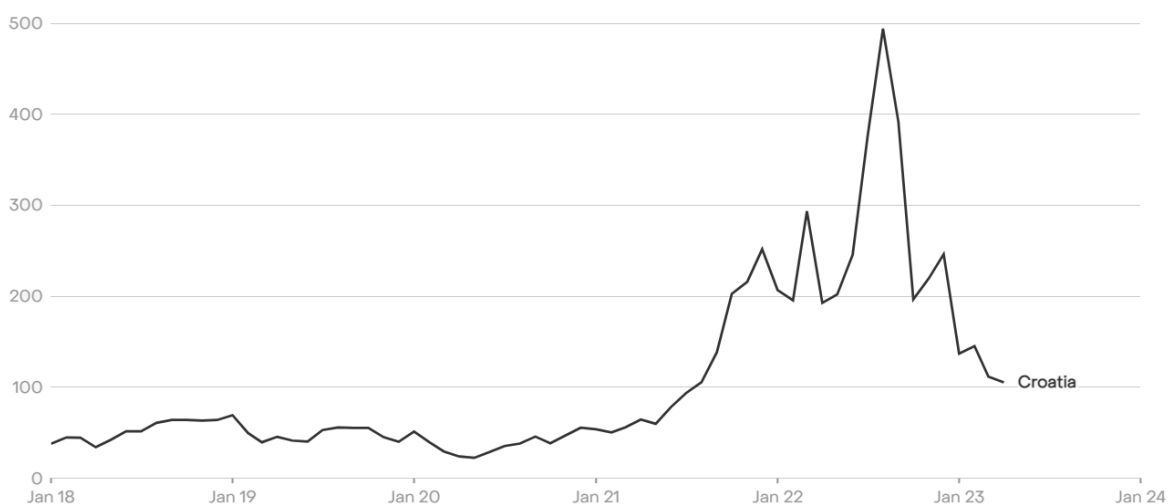
pokretnih dijelova vjetroagregati proizvode zvuk što dodatno može smanjiti sveukupno zadovoljstvo okoline. Navedeni zvukovi mogu imati jakost u razni do 60dB što je ista jačina zvuka kojom se odvija normalan razgovor. Isti pokretni djelovi mogu uzrokovati i vibracije što može dovesti do dodatno proizvedenog zvuka ili do strukturnih problema.

Pokretni djelovi kao i kod ostalih strojeva mogu prouzrokovati razne kvarove. Životni vijek modernih malih vjetroturbina je oko 20 – 25 godina te je uglavnom potrebno promjeniti izmjenjivač nakon 8 – 10 godina što povećava sveukupnu cijenu jedne takve vjetroturbine [8].

3.2. Prednosti malih vjetroelektrana

Iako na prvi izgled male vjetroelektrane imaju velik broj nedostataka, njihovo postojanje ukazuje da u nekim slučajima prednosti nadmašuju nedostatke. Iz tog razloga potrebno je navesti i pozitivne strane kako bi ih bilo lakše usporediti.

Prva prednost izgradnje male vjetroelektrane je naravno samostalna dobit električne energije. Električna energija nije otporna na promjenu u cijeni. Porast cijene električne energije može biti posljedica raznih događaja, a u bližoj prošlosti to su bili događaji kao što su: pandemije, ratovi, inflacija i dr.



Slika 3.2. Grafički prikaz veleprodajne cijene električne energije u RH izražen u €/MWh [9]

Ugradnjom male vjetroelektrane, potrošač si osigurava otpornost na potencijalni portast prodajne cijene električne energije što može uvelike ubrzati vrijeme za koje će se vjetroelektrana optlatiti.

Također, male vjetroelektrane smanjuju ovisnost o dobavljaču električne energije konvencionalnim putem odnosno mreži što može biti korisno u trenucima kada njihova električna energija nije dostupna (primjer nestanak električne energije zbog tehničkih radova). U slučaju proizvodnje više električne energije no potrebno, višak je u nekim slučajevima moguće prodati.

Činjenica da se potrošnja događa na mjestu proizvodnje isto tako pojašnjava kako su gubitci pri prijenosu minimalni što se može smatrati velikom prednošću.

Poticaaj za ugradnju male vjetroelektrane u nekim državama nije zanemariv. Mnoge vlade nude poticaje vlasnicima kuća koji instaliraju opremu za obnovljive izvore energije. Tu se može istaknuti američka vlada koja nudi porezni kredit u iznosu od 22% za vlasnike kuća sa intaliranom opremom za obnovljive izvore energije do 1.1.2024. U Europi pak, Ujedinjeno Kraljevstvo nudi poticaj pod nazivom Renewable Heat Incentive (RHI) koja daje mogućnost primanja uplata za svaki kWh proizvedene obnovljive energije. [10]

Uspoređujući učinak na okoliš gledajući emisiju ugljikovog dioksida, vjetroelektrane su u iznimno dobroj poziciji. Vjetroagregati emitiraju između 3 do 22 grama CO₂ po svakom kWh proizvedene električne energije. Za usporedbu; fotonaponski sustavi emitiraju 60 – 150 grama CO₂ po kWh, hidroelektrane 4 grama, nuklearne elektrane 6, plinske elektrane 350, a termoelektrane na ugljen čak 950 grama CO₂ po kWh proizvedene električne energije. [11]

Samo postavljanje malih vjetroelektrana je u većini slučajeva vrlo jednostavno te je njihova proizvodnja po jedinici potrebne površine vrlo efikasna. Jednostavnost postavljanja dokazuje i kanadska tvrtka „Aurea Technologies“ koja je proizvela prenosivu mikro vjetroelektranu „Shine “ snage 40 W i težine svega 1,36 kg sa mogućnosti da stane u većinu modernih ruksaka što je pogodno za planinare i kampere [12]. Razne su i knjige napine na temu samostalne izgradnje i postavljanja vlastite vjetroelektrane što nadalje dokazuje jednostavnost i prednost ovakvih sustava.



Slika 3.3. Fotografija mikro vjetroelektrane Shine [13]

Stalna poboljšanja i inovacije u ovome području će zasigurno u budućnosti donjeti razne dodatne prednosti malim vjetroeletranama. Neki od prijašnje navedenih problema su već kompenzirani određenim modelima koji osiguravaju manju opasnost za ptice kao što su oni proizvodne marke Icewind. Njihovim modelima bučnost je također svedena na maksimalnu razinu 35 dB što je razina ljudskog šaptaja. U budućnosti moguće se nadati raznim poboljšanjima u svim aspektima vjetroelektrana što bi ih trebalo dovesti u još povoljniji položaj na tržištu.

4. Vrste malih vjetroelektrana

4.1. Vjetroagregati s vodoravnom osi vrtnje

Ovakva vrsta vjetroelektrane je najpopularnija te uglavnom prva slika stvorena u glavi mnogih kada se vodi bilo kakva rasprava oko vjetroelektrane. Za ovakvu vrstu vjetroagregata specifično je vratilo koje je postavljeno vodoravno odnosno u paraleli sa smjerom vjetra. Rotori ovakvih vjetroagregata mogu se razlikovati po broju lopatica. Broj lopatica rotora ovisi o raznim parametrima no generalno svaki proizvođač želi najmanji mogući broj lopatica koji bi i dalje zadovoljavao zahtjeve stabilnosti i ravnoteže. Veliki vjetroagregati su uglavnom građeni sa tri lopatice. Glavni razlog leži u činjenici da jedna lopatica uglavnom stvara probleme u ravnoteži, dvije lopatice predstavljaju rizik u stabilnosti pri promjeni smjera vjetra, a sve iznad tri lopatice predstavlja velike troškove na njihovoj proizvodnji, transportu, instalaciji što u dosta slučajeva nije isplativo naspram onoga što povećanje njihovog broja donese. Za male vjetroelektrane moguće je primijetiti trend povećanja broja lopatica. One su

naspram njihovih većih pandana puno lakše i osjetljivije na jače vjetrove. U olujnim uvjetima bitno je osigurati sigurnost vjetroagregata te njihove okoline, a to se može postići većim brojem lopatica. Lopatice malih vjetroagregata su napravljene vrlo laganima pa uglavnom dodavanje na njihovom broju ne predstavlja velike izazove u odjelu ravnoteže.



Slika 4.1. Primjer rotora malih vjetroagregata s petorima (lijevo) i trima lopaticama (desno)
[14] [15]

Vjetroagregati s rotorom postavljenim uz vjetar nemaju mogućnost samostalnog zakretanja u smjer vjetra te im je za takve pothvate potreban ugrađeni mehanizam. Prednost vjetroagregata malih i srednjih snaga čiji promjer ne prelazi 10 m je mogućnost zakretanja u vjetar uz pomoć „repa“ koji se nalazi u produžetku gondole [16]. Takva regulacija kuta lopatica omogućava optimalan kut lopatica prema vjetru što povećava učinkovitost te se iz tog razloga ovakve vjetroelektrane preferiraju iznad onih sa okomitom osi vrtnje. U praksi ovakvi vjetroagregati imaju efikasnost u rangu 40 posto te nove tehnologije ne poboljšavaju efikasnost za veliku razliku. Razlog je i taj što u teoretski savršenom okruženju, maksimalna efikasnost može isnositi svega $16/27$ (59,25%) što je poznato kao i Betzov zakon.

No uz to rečeno, poboljšanja su i dalje primjetna u raznim faktorima. Nizozemska tvrtka Ketech je 2017. godine predstavila tržištu novi izgled lopatica koji svojim izgledom podsjećaja na ružu. Poboljšanje je moguće vidjeti u samoj brzini vjetra pri kojoj sustav kreće generirati električnu energiju. Njihov model promjera lopatica od 1.5 metara s nazivnom snagom od 700 Wh kreće generirati struju za brzine vjetra od 0.9 m/s [17].



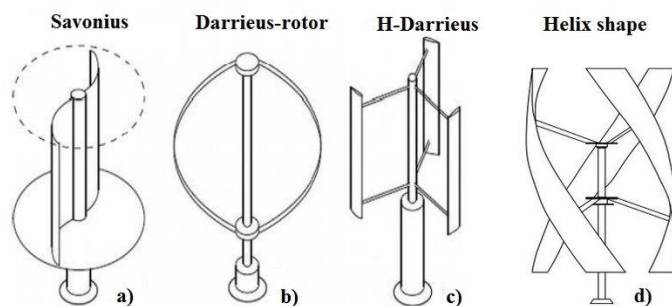
Slika 4.3. Mala vjetroelektrana Liam F1 tvrtke Ketech namjenjen za urbana područja [18]

4.2. Vjetroagregati s okomitom osi vrtnje

Glavna je razlika vjetroagregata s okomitom osi vrtnje naspram prijašnje spomenutih vjetroagregata s horizontalnom osi vrtnje okomito postavljeno vratilo U odnosu na vjetroagregate s vodoravnom osi vrtnje, glavne prednosti vjetroagregata s okomitom osi vrtnje su [19]:

- Manji omjer brzine vrha lopatice i brzine vjetra (koeficijent brzohodnosti) čime je omogućeno lakše kočenje rotora pri velikim brzinama vjetra.
- Nije potreban mehanizam za zakretanje zato jer lopatice iskorištavaju vjetrove iz svih smjerova
- U prosjeku imaju nižu razinu buke što ih čini pogodnijima za urbana područja
- Mogu se postaviti blizu tla što omogućuje lakši pristup

Za ovakve izvedbe vjetroagregata postoje različiti tipovi od kojih su najčešći u primjeni: Savoniusov tip, Darrieusov tip, spiralni tip i H-tip.



Slika 4.4. Neki od tipova vjetroagregata s okomitom osi vrtnje [20]

Iako je Darrieusov tip najistraživaniji, za vjetroagregate malih snaga ga je poprilično teško naći u primjeni. Kada se rotor okreće, aeroprofil se kreću kroz zrak što stvara protok zraka koji se nadodaje vjetru što povećava brzinu okretanja lopatica. Glavni nedostatak ovakve izvedbe je potreba agregata koji će pokrenuti vrtnju lopatica, a uz uzimanje u obzir cijene materijala i samog rasporeda težine lopatica moguće je vidjeti i zašto se ovaj tip puno manje koristi. No i dalje je moguće vidjeti Darrieusov rotor u kombinaciji sa drugim rotorima (npr. Savoniusovim tipom rotora) ili neke varijacije njega kao što su H – tip (engl. giromill).

H – tip rotora je dobio svoj naziv po svom izgledu. Njegovi aeroprofil su ravni te gledanjem iz profila mogu podsjećati na slovo H. Ovakav tip je iz tog razloga najjednostavniji u kontekstu dizajna no donosi svoje vlastite izazove. Zbog svog dizajna postoji mogućnost da kut napada na lopaticu pređe vrijednost kuta zastoja (engl. stall angle) u kojem će se slučaju dogoditi pojava vrtložnog strujanja koja smanjuje silu uzgona, a samo strujanje proizvodi vibracije na lopaticama. Ovakvo često mijenjanje opterećenja (engl. fatigue loading) troši komponente što smanjuje životni vijek vjetroelektrane. Moment koji generator „vidi“ se kod H – tipova mijenja s pozicijom lopaticu zbog različitih sila koje djeluju na njih (engl. torque ripple) što također dodatno šteti cijeloj konstrukciji. Načini smanjivanja takvog variranja momenta mogući su dodavanjem dodatnog broja lopatica ili njihovim savijanjem u kojem slučaju se dobiva spiralni tip.

Spiralni tip se dobije zavijanjem lopatica tako da one pokriju svaku točku po obodu. Moment koji ovakvi tipovi proizvode znatno manje varira no onaj u H – tipu vjetroagregata. Kompleksnost ovakvog tipa lopatica povećava troškove njihove proizvodnje. Iako takvo rješenje nije uvijek optimalno, ovakav tip se često nalazi u primjeni kod malih vjetroelektana.

Savoniusov se tip sastoji od dvije do tri lopaticu koje nalikuju slovu S u presijeku. Glavna razlika naspram svih ostalih navedenih tipova je što ne koristi silu uzgona (engl. lift force) vjetra već silu otpora vjetra (engl. drag force of wind) da proizvede rotacijsko gibanje lopatica

što u konačnici predstavlja izazov zato jer je moguće manje iskorištavanje snage vjetra [21]. Teoretski maksimum iskorištavanja snage vjetra ovakvih vjetroagregata je svega 15% za razliku od prijašnje spomenutih 59,25% vezanih uz vjetroagregate sa horizontalnom osi vrtnje. [22] Iz tog se razloga koriste u situacijama kada su trošak i pouzdanost mnogo važniji od učinkovitosti.

4.3 Nekonvencionalni tipovi vjetroagregata

Sa rastom popularnosti vjetroelektrana, na tržištu je moguće uočiti razne tipove vjetroagregata koji ne spadaju u konvencionalne tipove vjetroagregata, a najviše se inovacija pronalazi kod vjetroelektrana malih snaga. Konkurencija gura proizvođače da razmišljaju izvan okvira, a jedan od načina dobivanja pažnje je i inovacija na već postojeći model. Iako nekonvencionalni tipovi, ove vrste vjetroagregata i dalje spadaju u jednu od dvije već navedene vrste; one sa horizontalnom ili one sa vertikalnom osi vrtnje.

Lebdeći vjetroagregati (engl. airborne wind turbine) u potpunosti iskorištavaju činjenicu da se na većim visinama povećava brzina vjetra. Za razliku od konvencionalnih vjetroagregata, ovi vjetroagregati ne sadrže stup čime im je trošak izgradnje uvelike smanjen. Omogućeno im je i automatsko zakretanje u vjetar čime se eliminira potreba za ugrađivanjem takvog mehanizma koji se može naći u gotovo svim vjetroagregatima s horizontalnom osi vrtnje. Izvedbe ovakvog tipa se dijele u one koje se zasnivaju na aerodinamici te one koje se zasnivaju na aerostatici. Prvospomenuta izvedba iskorištava vjetar kako bi se održavala u zraku. To je omogućeno aerodinamičnom strukturom koja nalikuje na zmaj (letjelica) te radi na istom principu. Druga izvedba koristi koncept balona čija je prednost da nije potreban vjetar kako bi struktura opstala u zraku, no takve je balone potrebno nadopunjavati plinom kao što je helij zbog njegovog konstantnog curenja. Glavni izazovi zračnih vjetroagregata nastaju u nepovoljnim uvjetima kao što su oluje, no nedostaci su i ometanje sa putanjama zrakoplovstva te prijenos proizvedene energije do zemlje.



Slika 4.5. Aerodinamička (lijevo) i aerostatička izvedba (desno) zračnih vjetroagregata [23]
[24]

Nepomični (eng. motionless) vjetroagregati su oni kojima rotor nije izložen, odnosno oni bez vanjskih pokretnih dijelova. Ovakvi vjetroagregati koriste puno manji broj pokretnih dijelova što znači da bi u pravilu trebalo biti manje poteškoća pri održavanju. Moguće ih je postaviti na rubove ravnih krovova što ih čini pogodnim rješenjem za uredske zgrade, skladišta, proizvodne pogone i sl.

Ovakve modele je popularizirala američka tvrtka Aeromine koja tvrdi da njihovi vjetrogeneratori, u kombinaciji sa solarnim panelima i pohranom energije u predviđene baterije, može zadovoljiti 100% potreba zgrade. [25] Princip rada je takav da su postavljena dva šuplja vertikalno montirana krila jedna nasuprot drugima s razmakom između njih. Tim razmakom je stvoren prostor niskog tlaka, a vjetar koji struji kroz taj prostor se povlači kroz perforacije na samim krilima i dovodi do potpuno zatvorene turbine smještene na razini tla.



Slika 4.6. Nepomični vjetroagregat tvrtke Aeromine [26]

Dok se nepomični vjetroagregati ugrađuju isključivo na ravnim krovovima, postoje i vjetroagregati koji se postavljaju na kosim krovovima, odnosno na njihovim sljemenima (eng. ridge-mounted wind turbine). Kako na hrbatima planina, tako je i na krovovima moguće uočiti pojavu takozvanog „aeolian wind focus” efekta. Vjetar je prisiljen prolaziti preko površine krova, a zbog nagiba krova, na njegovom se sljemenu znatno povećava brzina vjetra do tri puta početne brzine vjetra. Maksimalno se povećanje postiže za nagibe od 45° pri kojemu vjetrogenerator može proizvesti do 220% više električne energije za iste brzine vjetra [27]. Rotor ovakvih vjetroagregata ima okomitu os vrtnje za razliku od nepomičnih agregata koji koriste horizontalnu os vrtnje rotora. Prednost ovakvih vjetroagregata je i njihova otpornost. Pri olujnim uvjetima nije potrebno zaustavljati pogon navedenih vjetroagregata zbog njihove samostalne regularizacije uzrokovane razmakom između lopatica rotora koji pri vrlo visokim brzinama vjetra razdvajaju tok vjetra čime se smanjuje moment. Vodeća tvrtka na tržištu za ovakve modele naziva se Danu Energy, a njihova je usluga globalno dostupna.



Slika 4.7. Vjetroagregat tvrtke RidgeBlade [27]

5. Isplativost izgradnje

5.1. Formula izlazne snage

Najvažniji bi čimbenik u donošenju odluke izgradnje bilo kakve elektrane trebala biti njena isplativost izgradnje. Isplativost se opisuje kao omjer uloženoga i dobivenoga te se kao takva

može i gledati kao mjera uspješnosti ili učinkovitosti. Za energiju vjetra, daleko najvažnija formula je:

$$P = \frac{1}{2} k C_p \rho A v^3 \quad [5 - 1]$$

gdje je:

P = Izlazna snaga izražena u kW

C_p = Maksimalan koeficijent snage, varira između 0,25 do 0,45

ρ = Gustoća zraka izražena u kg/m³

A = Površina dobivena okretanjem lopatica izražena u m² (eng. swept area)

v = Brzina vjetra izražena u m/s

k = 0.000133; konstanta koja daje snagu u kilovatima

Iz formule je moguće uočiti kako su promjenjivi faktori koji utječu na izlaznu snagu: gustoća zraka, površina lopatica i brzina vjetra.

Svaka tvar ima svoju vlastitu gustoću – za zrak je to 1,225 kg/m³ pri uvjetima od 15 °C na morskoj razini. Iz izraza 5-1 je vidljivo da se povećanjem gustoće zraka povećava izlazna snaga. Veća gustoća zraka znači i da su molekule zraka gušće stisnute, a time nanose više sile kada prolaze kroz rotor. Sa svim ostalim faktorima konstantnim, gustoću zraka je veća na manjim nadmorskim visinama. Za svakih 1000 metara nadmorske visinu, smanjena je mogućnost prikupljanja energije za 3%. [28] Nadmorska visina nije jedini utjecatelj na gustoću zraka. Ona ovisi i o temperaturi zraka tako da su u obrnuto proporcionalnom odnosu što znači da je u hladnijim uvjetima gustoća zraka veća. Za kućanstva sa malim vjetroelektranama je to pogodno zato jer će se više energije stvarati za zimu kada su ljudi češće u kućanstvima i koriste proizvedenu energiju.

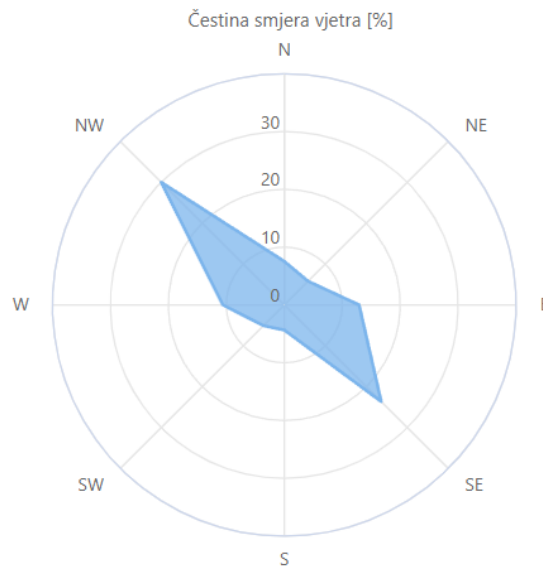
Površina dobivena okretanjem lopatica je jedini faktor za koji priroda i njene pojave nemaju utjecaj. Ona ovisi isključivo o veličini lopatica (slika 3.1.) i računa se prema standardnoj formuli za površinu kruga; $A = r^2 \pi$ [5-2]

U konačnici, najvažniji faktor u cijeloj formuli je sama brzina vjetra. Odnos izlazne snage za razliku od drugih faktora, ovisi kubno o brzini vjetra što znači da se za dva puta veću brzinu vjetra, potencijalna energija poveća osam puta. Iako su velike brzine poželjne za maksimalnu iskoristivost, vjetroagregati nisu uvijek u mogućnosti podnijeti takve uvjete. Poboljšanja u ovom području su u velikoj količini vremena više novčano zahtjevna u odnosu na dobivene rezultate. Zbog kuba uz brzinu vjetra, nije dovoljno poznavati srednju brzinu vjetra za precizan izračun dobivene električne energije kroz godinu. Teoretski bi srednja brzina vjetra koji pola vremena pogađa rotor brzinom 3 m/s, a drugu polovicu 5 m/s bila 4 m/s. Ukoliko se rezultat dobivene snage uspoređi sa vjetrom koji za cijelo svoje vrijeme drži konstantnu brzinu od 4 m/s, izlaz će biti drugačiji. Stavljanjem u odnos dvije gustoće snage vjetra koristeći izraz (2-3) uz pretpostavljenu istu gustoću zraka dobiva se:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{\frac{1}{2}\rho \times 3^3 + \frac{1}{2}\rho \times 5^3}{\frac{1}{2}\rho \times 4^3} = \frac{17}{8} = 2.125$$

Što znači da će za prvi slučaj gustoća snage vjetra biti 2.125 puta veća od slučaja u kojemu se brzina vjetra nije mjenjala. Ekvivalentno, izlazna će snaga također biti veća za isti koeficijent pa se zaključuje kako snaga ovisi ne samo o brzini vjetra nego i o njegovoj učestalosti. Iz tog su razloga proračuni koji koriste srednju gustoću snage vjetra točniji i precizniji od onih koji koriste srednju brzinu vjetra. Za određeno područje je i moguće parametre vjetra kao što su smjer, učestalost, srednja brzina i kub srednje brzine prikazati takozvanim dijagramom ruže vjetrova.

Za svaki od dijagrama vrijedi da je podjeljen na smjerove vjetra koji variraju od 8, 12 ili 16 smjerova, a razine za svaki smjer prikazuju udio vremena koliki vjetar puše iz navedenog smjera. Mora vrijediti da kumulativni broj udjela za sve smjerove iznosi 100%. Nadalje, udjeli mogu biti pomnoženi sa drugim faktorima kao što su prosječna brzina vjetra iz odabranog smjera ili gustoća snage vjetra kako bi nosili više informacija. Ruža vjetrova može znatno pomoći pri donošenju odluke izgradnje vjetroelektrane. Ukoliko velik udio energije vjetra dolazi iz određenog smjera, tada je potrebno odabrati lokaciju sa što manje prepreka i izobličenja terena koje mogu uzrokovati smanjenje brzine vjetra ili turbulenciju.[29] Na ruži vjetrova grada Zadra (slika 5.1.) moguće je zaključiti da prepreke koje leže u smjeru sjeverozapad-jugoistok imaju veći utjecaj na vjetar no one u drugim smjerovima.



Slika 5.1. Ruža vjetrova grada Zadar u mjesecu srpanj 2023. godine [30]

Velik broj prepreka ipak nije moguće promijeniti. Glavni izvori vjetrovne smjene (eng. wind shear) proizlaze iz velikih strujanja zraka na visokim nadmorskim visinama, geološkim obilježjima te meteorološkim promjenama kao što su El Niño i La Niña za koje ljudski utjecaj nije moguć.[31] Ovisnost geološkog obilježja terena o brzini vjetra na nekoj visini opisuje se formulom:

$$v / v_0 = (h / h_0)^\alpha \quad [5-3]$$

gdje je:

v – tražena brzina vjetra na željenoj visini h

v_0 – poznata brzina vjetra na znanoj visini h_0

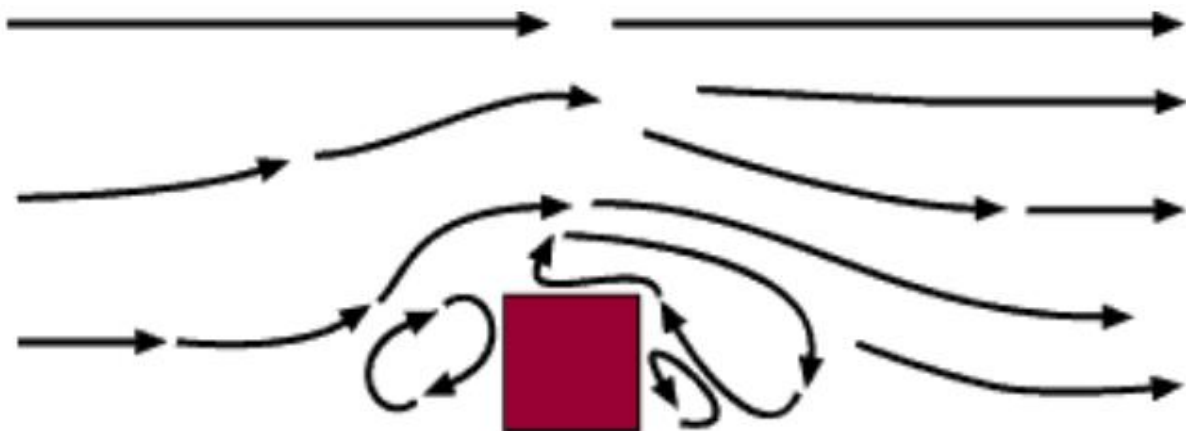
α – eksponent vjetrovne smjene

EkspONENT vjetrovne smjene ovisi isključivo o karakteristikama terena. Njime se objašnjava činjenica da će vjetar imati različite brzine ovisno o terenu uz koji se kreće u prostoru. Time je moguće objasniti kako bi za iste parametre zraka, brzina vjetra mogla varirati ovisno o tome kreće li se vjetar iznad neke vodene površine mora kao što je ocean ili ipak iznad neke brdovite planinske podloge.

Tablica 1. Neke od čestih eksponenata vjetrovne smjene na referentnoj visini 10 m [32]

Podloga	Eksponent vjetrovne smjene
Led	0.07
Mirno more	0.09
Otvoren teren sa glatkom podlogom (pokošena trava, beton)	0.14
Razbacana stabla i živica	0.24
Veliki gradovi sa visokim zgradama	0.39
Šumsko područje	0.43

Razlog u skoku moguće je objasniti turbulencijom koju stvaraju određene prepreke. Promjene u brzini vjetra zbog turbulencije mogu se izmjeriti i na visinama tri puta od one visine prepreke. Na ilustraciji (slika 5.2.) je moguće vidjeti kako je turbulencija manje prisutna ispred prepreke no iza nje što znači da će i brzina vjetra biti više usporena iza prepreke. Koliki utjecaj na usporavanje vjetra ima neka prepreka ovisi i o njenoj poroznosti. Moguće je da za isto drvo budu drugačiji utjecaji na usporavanje vjetra ovisno o razdoblju godine. Drvo sa gustom krošnjom može se ponašati kao i neporozna prepreka preko ljeta dok po zimi kada njeni listovi opadnu će utjecaj turbulencije biti smanjen. U konačnici, najbolji slučaj za vjetroagregate je nepostojanje takvih prepreka pa je regulacija prostora oko njega poželjna. Sječa drveća i košnja trave smanjuju turbulenciju i potom poboljšavaju danu brzinu vjetra što povećava gustoću snage vjetra, a time i izlaznu snagu male vjetroelektrane. Takva turbulencija nameće prijetnju samoj vjetroelektrani kao konstrukciji tako da dolazi do njenog habanja što može dovesti do oštećenja cijelog sustava. Prema tome, preporuča se da prepreke budu što niže i udaljenije od vjetroagregata koliko je moguće.



Slika 5.2. Pojava turbulencije uzrokovane preprekom [33]

5.2. Preuvjeti za isplativost investicije

Kako bi se bilo kakav projekt uspio novčano isplatiti, mora vrijediti da se on samostalno novčano otplati. Ista stvar vrijedi i za vjetroelektrane. Cijene stuje nisu fiksne te je nemoguće predvidjeti promjenu cijena kako zbog inflacije tako i zbog ostalih faktora izvan ljudske kontrole. U osam se mjeseci veleprodajna cijena električne energije razlikovala sedmerostruko. Dok je 29.8.2022. ona iznosila 745,99 €/MWh, 29.3.2023 je ista iznosila 99,25 €/MWh [34]. Za izračune u ovom radu će prema navedenim podacima (tablica 2) biti pretpostavljeno da je kućanstvo na tarifnom modelu „Plavi” sa jedinstvenom dnevnom tarifom pa će cijena električne energije iznositi 0,079412 €/kWh sa uključenim PDV-om.

Tablica 2. Tarifne stavke za opskrbu kupaca kategorije kućanstvo u sustavu javne usluge, u primjeni od 01.04.2023. godine [35]

Kategorija		Tarifni model	Tarifni element							
			Radna energija [kWh]						Naknada za opskrbu [Mjesec]	
			JT		VT		NT			
			Tarifne stavke							
		EUR	HRK	EUR	HRK	EUR	HRK	EUR	HRK	
Kućanstvo	Niski napon	Plavi	0,070276 (0,079412)	0,529495 (0,598329)	-	-	-	-	0,982 (1,110)	7,399 (8,361)
		Bijeli	-	-	0,074789 (0,084512)	0,563498 (0,636753)	0,036697 (0,041468)	0,276494 (0,312438)	0,982 (1,110)	7,399 (8,361)
		Crveni	-	-	0,074789 (0,084512)	0,563498 (0,636753)	0,036697 (0,041468)	0,276494 (0,312438)	0,982 (1,110)	7,399 (8,361)
		Crni	0,029000 (0,032770)	0,218501 (0,246906)	-	-	-	-	0,053 (0,060)	0,399 (0,451)

* Iznosi u zagradama prikazuju jedinične cijene uvećane za PDV (stopa 13%, u primjeni od 1. 1. 2017.)

Točka isplativosti (eng. break-even point) je točka u kojoj su ukupni troškovi i prihodi jednaki. U kontekstu izgradnje vjetroelektrane, to bi bio trenutak u kojemu će vrijediti da je vjetroelektrana otplatila svoj novčani iznos. Sa prosječnom životnom dobi malih vjetroelektrana od 20 godina [36] zahtjeva se da bude sposobna postići točku isplativosti u tom vremenskom periodu (uz pretpostavku da se sva proizvedena električna energija preprodaje distributeru). Formula za izračun točke isplativosti glasi [37]:

$$BEP = C_{turbine}/P_a \quad [5 - 4]$$

Gdje je:

BEP - točka isplativosti, odnosno vrijeme za koje je investicija otplaćena

$C_{turbine}$ – Sveukupan trošak vjetroelektrane

P_a – godišnji novčani prihodi vjetroelektrane

Ovi parametri naravno ovise o modelu i proizvođaču vjetroelektrane. Za hrvatsko je tržište dostupna mala vjetroelektrana ARTAS 1500 proizvođača Hyenergy. Njeni parametri su opisani tablicom:

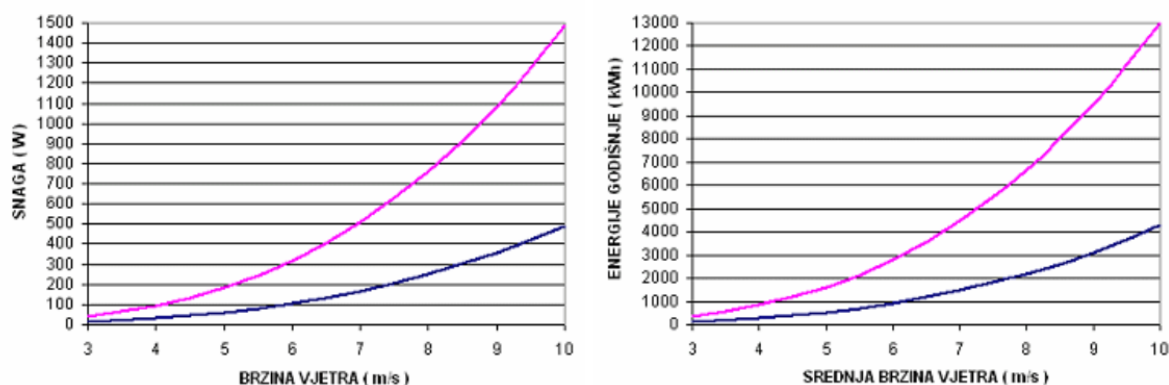
Tablica 3. Parametri vjetrenjače ARTAS 1500 [38]

Proizvođač	HYenergy
Tip generatora	trofazni bez četkica / NdFeB
Nazivni napon	48V
Nazivna snaga	1500W / 2500W _{maks.}
Promjer elise	300cm
Broj lopatica	3
Zaštita od jakog vjetra	kočenje generatorom
Maks. brzina vjetra	60m/s
Kabel	3 x 10mm ² do 50m dužine
Noseći stup	cijev promjera 114mm
Masa	53kg
Jamstvo	5 godina
Cijena	2.090,38 EUR s PDV-om

Iako njena cijena u tablici iznosi 2.090,38 €, u nju nije uključen očekivani iznos koji pokriva njeno održavanje. Za održavanje takve vjetroelektane se uglavnom uzima podatak da godišnja cijena održavanja iznosi 1,5% njene cijene [39] što bi u njenom životnom vijeku od 20 godina povećalo njene troškove za 30% originalne cijene. Prema tome bi sveukupan trošak ovog modela iznosio:

$$C_{turbine} = 2,090,38 + 2,090,38 \times 1,5\% \times 20 = 2717,494 \text{ €}$$

Godišnji novčani prihodi vjetroelektrane ovise o količini proizvedene električne energije. Kako izlazna snaga vjetroelektrane ovisi o brzini vjetra prema formuli [5-1], od proizvođača se zahtjeva grafički prikaz ovisnosti brzine vjetra i proizvedene energije. Za model ARTAS 1500, grafički prikaz dan od proizvođača je opisan slikom 5.3.



Slika 5.3. Ovisnost proizvedene snage vjetrenjače ARTAS 1500 (roza boja) i ARTAS 500 (plava boja) o brzini vjetra [38]

Ovi grafovi potvrđuju da ovisnost proizvedene snage i brzine vjetra nije linearna no kubna. Sa desnog grafa je moguće isčitati da očekivana proizvodnja energije za srednju brzinu vjetra od 5 m/s iznosi oko 1700 kWh u razdoblju od jedne godine. Sa poznatom cijenom električne energije (tablica 2.) moguće je izračunati godišnje novčane prihode;

$$P_a = \text{količina EE} \times \text{cijena EE} = 1700 \text{ kWh} \times 0,079412 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 135,0004 \text{ €}$$

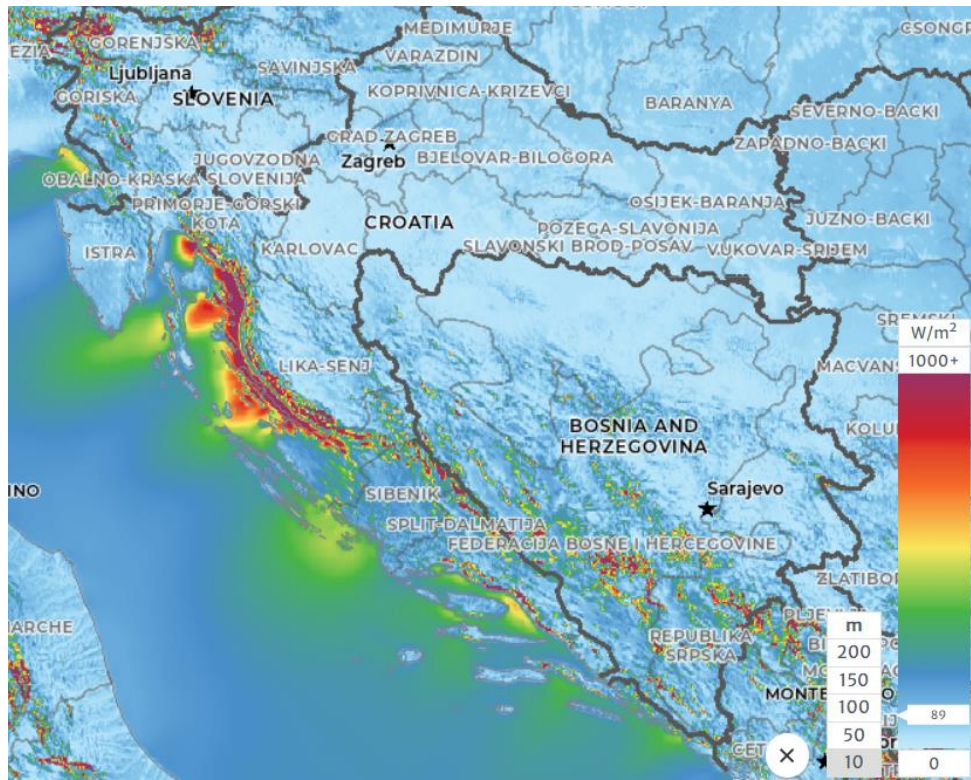
Time su dobiveni svi potrebni podatci za izračun točke isplativosti. Uvrštavanjem u formulaciju [5-4] dobiva se:

$$BEP = \frac{C_{turbine}}{P_a} = \frac{2717,494 \text{ €}}{135,0004 \text{ €}} = 20,129 \text{ godina}$$

Iz točke se isplativosti zaključuje kako je za ovaj model potrebna brzina vjetra od barem 5 m/s kako bi se vjetroelektrana otplatila u razumnom vremenu. Kupci ipak u konačnici očekuju veću dobit od samog uloga pa je potrebno promatrati područja za koje su brzine vjetra u prosjeku veće od navedene brzine.

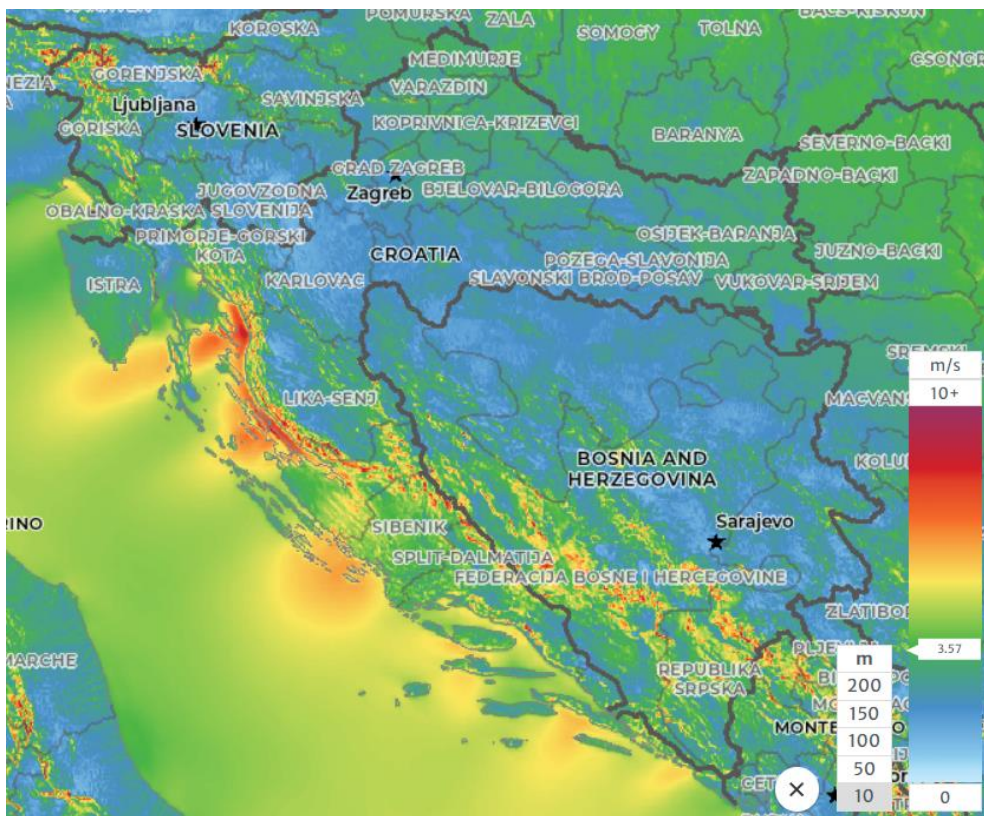
5.3. Lokacije Republike Hrvatske

Republika Hrvatska je raznolika po svom zavičaju i regijama što utječe i na svojstva vjetra. Njezin izlaz na Jadransko more stvara pogodne preduvjete za stvaranje vjetrovitog područja. Lako je primjetiti razliku između kopnenog i obalnog djela Hrvatske, zbog različitog reljefa se brzine vjetra jasno razlikuju. Mora se hlade i zagrijavaju potpuno drugačijim koeficijentom od kopna pa razlika potencijala odnosno tlaka zraka iznad tla gotovo uvijek prisutna.



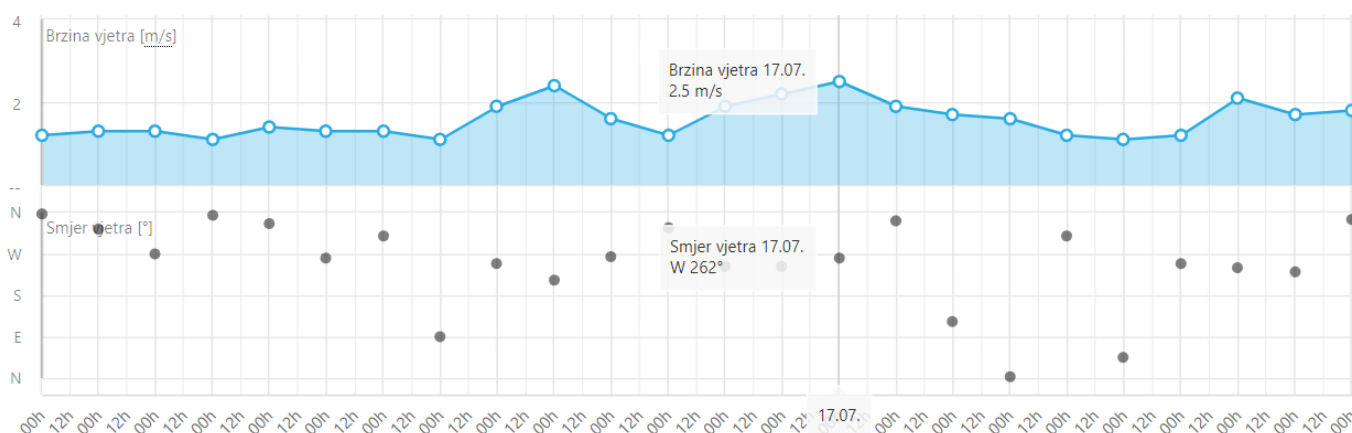
Slika 5.4. Atlas prosječne gustoće snage vjetra 29.srpnja 2023 na razini 10m iznad tla [40]

Prosječna gustoća zraka je najbolji pokazatelj potrebnih svojstava vjetra za dobru pretpostavku snage koju će neka vjetroelektrana proizvesti. Na slici 5.4. moguće je primjetiti kako su iznosi gustoće snage najveći na obali Like. Na tom području bi teoretski trebala biti najveća izlazna snaga za vjetroagregat. Proizvođači vjetroelektrana u svojim grafovima u većini slučajeva koriste srednju brzinu vjetra za razliku od njegove gustoće. Iako je prijašnje objašnjeno kako prosječna brzina vjetra ne objašnjava u potpunosti dobivenu snagu, za većinu slučajeva je prosječna brzina vjetra dovoljna za procjenu isplativosti izgradnje. Prema tome, na slici 5.5. se vizualno primjećuje proporcionalnost gustoće vjetra i njegove brzine. Kao što je i moguće pretpostaviti, brzine vjetra su najveće u iznosu na obalama Like, pa zatim na otocima uz obalu.



Slika 5.5. Atlas prosječne brzine vjetra 29. srpnja 2023. na razini 10m iznad tla [40]

Primjećuje se velik pad u prosječnoj brzini vjetra označen plavom bojom. Glavni razlog je u što kontinentalni dio Hrvatske je odvojen od obalnog djela pomoću planina od kojih su najznačajnije Risnjak, Velebit, Dinara i Kapela koji štite unutrašnju Hrvatsku od raznih vjetrova. No to ne znači da kopnena Hrvatska nema vjetrove, dok na Jadranu puše bura, u kopnenoj Hrvatskoj za to vrijeme puše sjeverac, hladni sjeverni vjetar. Sa sjevernih obronaka Alpa se spušta i vjetar fen. On je po svojim karakteristikama topao, suh, maglovit i dolazi sa Zapada. Njegova je pojava česta u gradu Ogulinu



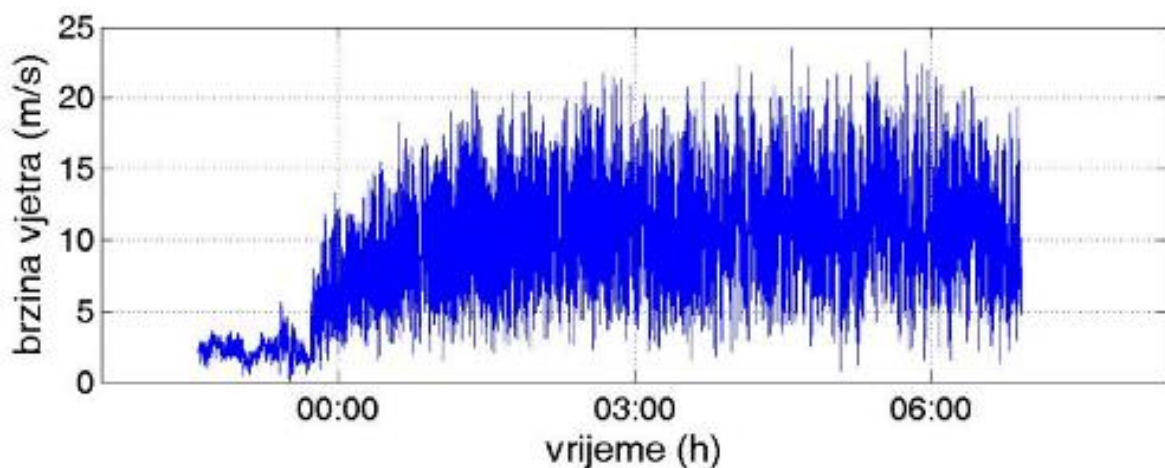
Slika 5.6. Prosječna brzina i smjer vjetra grada Ogulina u razdoblju 3.7.2023 – 26.7.2023

[41]

Sa grafičkog prikaza, može se i vidjeti kako većina vjetra dolazi sa Zapada što je već spomenuta karakteristika fena. Najveća brzina vjetra na grafu je tek 2.5 m/s. Koristeći prethodna znanja, zaključuje se da bi za isplatu vjetroagregata od 1.5 kW bilo potrebno gotovo 40 godina pa je njegovu ugradnju vrlo teško opravdati.

Sa atlasa vjetrova Republike Hrvatske vidi se da se situacija ne razlikuje u velikim količinama ni za ostale djelove kopnene Hrvatske. U istočnim djelovima poput što je okolica grada Osijeka, brzine vjetrova su oko 4 m/s, nešto veće nego u Ogulinu no ne za toliki stupanj da se ugradnja male vjetroelektrane isplati.

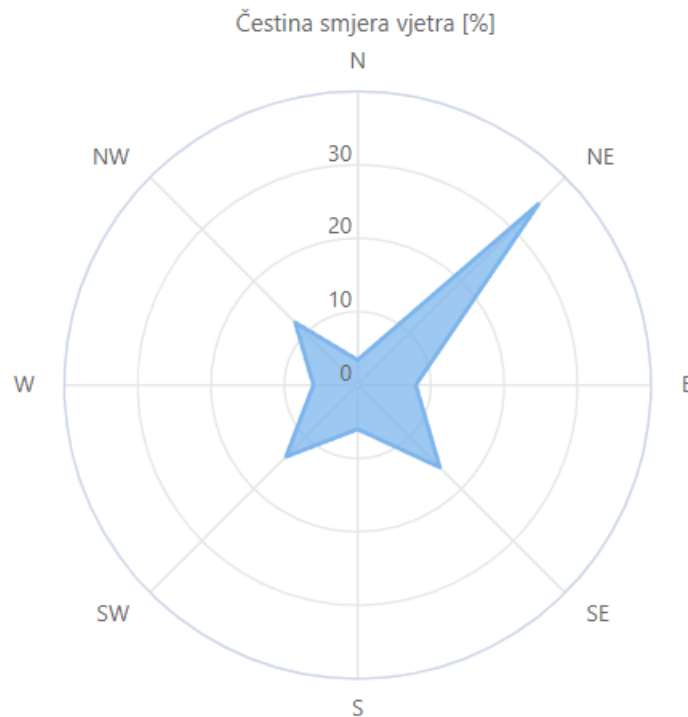
Sa druge strane Dinarida, na strani Jadranskog primorja vidi se utjecaj bure. Ona se opisuje kao hladan, jak i suh vjetar sjeveroistočni vjetar kojega karakteriziraju snažni udari. Iako je njena učestalost različita za pojedine djelove godine, ona i se dalje javlja kroz gotovo cijelu godinu [42]. Grad gdje se ona izrazito očitava je grad Senj u kojemu je stoga bila i izgrađena vjetroelektrana Vrataruša, prva vjetroelektrana u Hrvatskoj priključena na mrežu. [43]



Slika 5.7. Zapis bure u Senju zabilježen ultrasoničnim anemometrom s intervalom uzorkovanja 0.25 s [44]

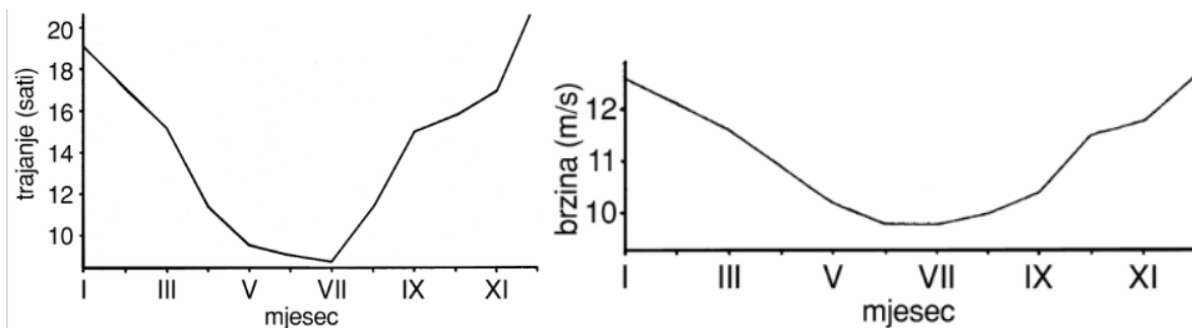
Uz pomoć slike 5.7. uočava se mahovitost bure. U kratkom razdoblju od šest sati su zabilježene brzine vjetra od 0 do gotovo 25 m/s. U nekim slučajevima, brzina vjetra može doseći brzine i od 50 m/s pri čemu se pojavljuje opasnost za sigurnost ne samo vjetroagregata nego i čovjeka. Buru kao takvu njezin srednjak koji je na zapisu po iznosu nešto veći od 10 m/s potom ne opisuje dovoljno dobro zato jer se njezina opasnost odvažava udarima. Utjecaj bure naravno nije isti u svim dijelovima Jadrana. Kao što je vidljivo na atlasu vjetrova, utjecaj bure se smanjuje od Sjevera Jadrana prema Jugoistoku. U kontekstu postavljanja male

vjetroelektrane, treba istaknuti gradove Kraljevicu i već spomenuti Senj za koje će biti priložene njihove izmjerene prosječne brzine vjetra kako bi se lakše procjenila isplativost ugradnje male vjetroelektrane na tim lokacijama.



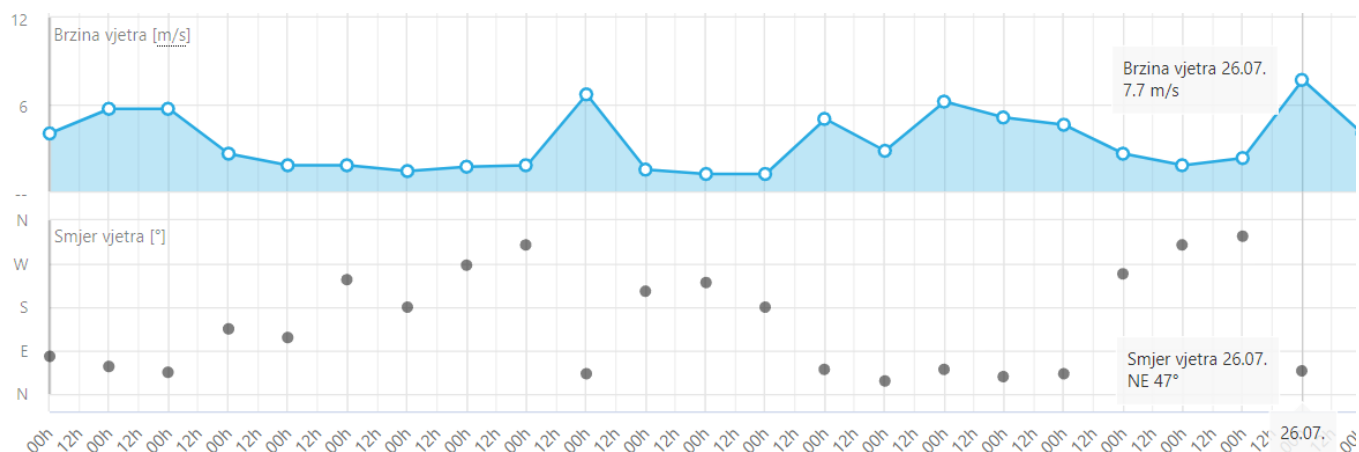
Slika 5.8. Ruža vjetrova grada Senj u srpnju 2023. godine [45]

Iz priloženoga, uočava se jasno utjecaj bure na grad Senj. Sa svojih 34.9% čestine smjera vjetra, bura nadmašuje ostale vjetrove za primjetnu i nedvojbenu razliku. Ovakva distribucija čini planiranje postavljanja vjetroelektrane puno jednostavnijim no samo će postavljanje biti nesmisleno ukoliko nije moguće zadovoljiti određene brzine vjetra. Već je napomenuto prijašnje kako je učestalost bure različita tijekom godine.



Slika 5.9. Promjenjivost srednje brzine i srednjeg trajanja bure u ovisnosti o dobu godine [44]

Trend pokazuje da su u srpnju i brzine i trajanje bure minimalne. Ljetne bure općenito traju kraće od zimskih. Važi i da su jačeg karaktera preko noći nego preko dana.

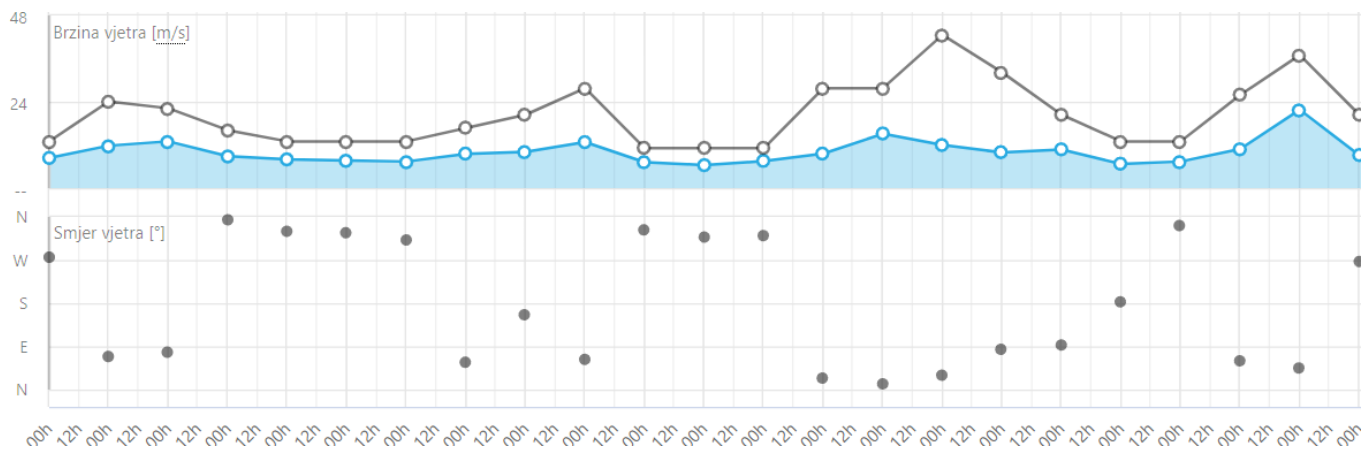


Slika 5.10. Srednja brzina i smjer vjetra grada Senja u razdoblju 5.7.2023 – 26.7.2023. [45]

Sa grafa je vidljivo da svaki skok u brzini vjetra je usko povezan sa činjenicom da je taj dan smjer vjetra bio sjeveroistočan, odnosno vidi se utjecaj bure. Za ovaj graf je potrebno još jednom napomenuti kako objašnjava brzine vjetra u srpnju kada su brzine vjetra po prirodi minimalne. U suštini, ovaj graf predstavlja razdoblje kada bi vjetroelektrana teoretski proizvela najmanju količinu električne energije. Iako bi se zaključilo da srednja vrijednost brzine vjetra od 3,36 m/s nije u mogućnosti opravdati izgradnju vjetroelektrane, uzevši u obzir da će za ostale mjesece srednja brzina znatno rasti zbog već spomenutog produljenja trajanja bure ali i zbog povećanja njene brzine, konačan zaključak bi mogao biti drugačiji. Ako se uzme i u obzir činjenica da se pri svakom udaru energija proizvedena povećava za kub brzine vjetra, tada se zaključuje da će i za mjesec srpanj biti proizvedeno više električne energije nego očekivano. Sve navedeno čini u konačnici Senj gradom koji može biti pogodan za izgradnju male vjetroelektrane.

Već je prethodno na atlasu vjetrova bilo moguće primjetiti da se jedan dio Jadrana posebno ističe po svojoj brzini vjetra. Na ulazu u Bakarski zaljev, dvadesetak kilometara južno od Rijeke brzine vjetra su primjetno veće nego u ostatku Jadrana pa tako i Hrvatske. Grad koji se može istaknuti iz tog područja je Kraljevica. Razlog za isticanje proizlazi iz udara vjetra kojeg je moguće pronaći u njemu.

Svaki vjetroagregat ima svoju uključnu i isključnu brzinu. Uključne podrazumjevaju brzinu vjetra pri kojoj njegovo okretanje proizvodi električnu energiju. U ovom slučaju je isključna brzina bitnija zato jer ona objašnjava pri kojoj brzini se turbina može okretati prije nego što dođe do rizika oštećenja [46]. Za male vjetroelektrane ona uglavnom iznosi oko 25 m/s.



Slika 5.11. Srednja brzina i smjer vjetra grada Kraljevice u razdoblju 5.7.2023.–26.7.2023.

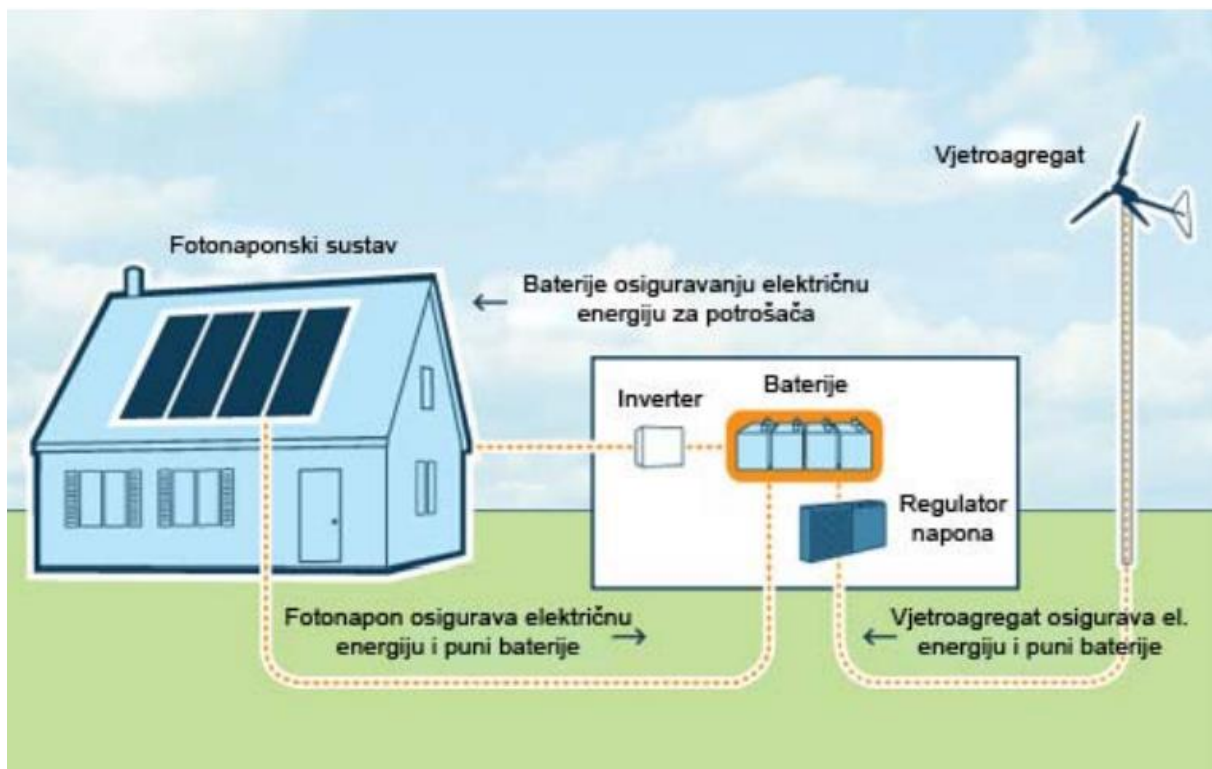
[47]

Za Kraljevicu su izmjerene prosječne brzine vjetra i do 22 m/s što je za neke vjetroagregate približno jednako njihovoj isključnoj brzini. Za razliku od prijašnjih grafova, na grafu prikazanim pod slikom 5.11. postoji i dodatna crna linija koja prikazuje udare vjetra. Njene vrijednosti se dopinju do izmjerenih 42,6 m/s. Trend pokazuje skokove u brzinama vjetra kada on dolazi sa Sjeveroistoka što je već bilo viđeno i kod grada Senja no razlika u brzini vjetra je gotovo četverostruka. Za vjetroelektranu ovakvi udari vjetra predstavljaju velik rizik te se one samostalno isključuju zbog vlastite sigurnosti. Time će za razliku od prijašnjeg primjera, dobivena snaga biti manja nego očekivana zbog količine vremena za koje vjetroelektrana neće biti u pogonu.

5.4. Situacija u Republici Hrvatskoj

U Republici Hrvatskoj mali vjetroagregati nisu česta pojava te se njihova ugradnja u pravilu ne potiče za razliku od razlikih solarnih rješenja. Mali fotonaponski sustavi zbog manjka pomičnih dijelova traju dulje i manje se kvare. Moguće je reći da su i razvijeniji, a u svoju korist imaju i određeni novčani poticaj. Iako fotonaponski sustavi imaju svoje prednosti, mali vjetroagregati imaju veću mogućnost instalirane snage po jedinici površine, ali najbitnije je da mogu proizvoditi energiju u trenucima kada to fotonaponski sustavi nisu u mogućnosti. Prema tome, mali vjetroagregati se uparuju zajedno sa malim fotonaponskim sustavima kao odlično energetska rješenje gdje se sustavi nadopunjuju čime se osigurava kontinuiran rad sustava. Dok solarne ćelije mogu iskorištavati energiju Sunca preko dana, situacija preko noći ili tmurnih dana je u potpunosti drugačija te u tom slučaju nastupaju mali vjetroagregati koji omogućavaju opskrbu električnom energijom neovisno o količini svjetlosti. Isto vrijedi i

obratno zato jer fotonaponski sustavi mogu omogućiti opskrbu električnom neovisno o dostupnosti snage vjetra. Ovakvi sustavi mogu biti idealni za napajanje izoliranih kuća ili pak nekih sustava kao što su to odašiljači i mobilne stanice koji se pronalaze na vrhovima brda. Takvi sustavi sadrže: bateriju za pohranu energije, fotonaponski sustav snage do nekoliko kW te mali vjetroagregat iste snage. U takvim se izvedbama najčešće pronalaze relativno jeftini i efikasni mali vjetroagregati s tri lopatice i horizontalnom osi vrtnje [48].



Slika 5.12. Shematski prikaz autonomnog hibridnog sustava [49]

Izvan takvih hibridnih sustava, mali vjetroagregati nisu u širokoj primjeni u Hrvatskoj. Dio takvoga stanja može se dodijeliti činjenici da je dokumentacija potrebna za ugradnju malih sustava gotovo izjednačena sa onom potrebnom za velike sustave. Pri spominjanju legalnosti, važno je i napomenuti kako se uredba o zaštićenom obalnom području odnosi i na male vjetroagregate. U suštini to znači da se oni kao takvi ne bi smjeli instalirati na otocima ili na obalama ukoliko nisu odaljeni kilometar od obale [50]. Prema tome, najbolje lokacije za ugradnju malih vjetroagregata nisu iskoristive. Uz već spomenut manjak novčanog poticaja za male vjetroagregate, jasno je da postoje mnoge prepreke koje usporavaju razvoj te industrije u Republici Hrvatskoj.

Čak i uz navedene nedostatke, mali vjetroagregati ponekad predstavljaju idealno rješenje za opskrbu električne energije. Oni mogu puniti baterije i rasvjetu što ih zna činiti idealnima za:

- Jedrilice te vozila za odmor
- Sezonsku primjenu u što su uključene ribarske i lovačke kolibe zajedno sa kampovima i kućama za odmor
- Radarske / telekomunikacijske postaje

U budućnosti gdje se efikasnost malih vjetroagregata dodatno poveća zajedno sa poticajem, a procedura za ugradnju pojednostavi, isplativost će biti lakše postignuta, a time je moguće očekivati još i širu primjenu takvih sustava.

6. Zaključak

Iako su za budućnost neizbježni zeleni izvori energije, njihova dostupnost treba biti predispozicija ugradnje sustava koji ih imaju mogućnost iskorištavati. Za vjetroektrane, bile one velikih ili malih snaga, osnovno je polazište brzina vjetra na određenoj lokaciji. U ovom se radu oslanjalo na upoznavanje sa principom i radom malih vjetroelektrana, njihovom isplativosti izgradnje i tipovima. Skaliranjem velikih vjetroelektrana na manje modele pojavljuju se određeni nedostaci no ovisno o potrebama, dobivene prednosti znaju biti dovoljna argumentacija za njihovu ugradnju. Republika Hrvatska i njene određene potencijalne lokacije vjetroagregata su raznolike koliko je raznolik i sam reljef Hrvatske. Iako se na područjima Slavonije, Srijema, Baranje i Zagorja izgradnja male vjetroelektrane često ne može opravdati te se kao takva ne potiče, takav slučaj nije i za druge dijelove Hrvatske kao što su dijelovi Like te Jadran zajedno sa njegovim otocima. Ukoliko se ugradnja na potencijalnim lokacijama bude podržavala istom razinom kao što se podržava i ugradnja solarnih rješenja raznim inicijativama, budućnost gdje kućanstva povećavaju svoju energetska efikasnost iskorištavanjem snage vjetra bi mogla pogodovati raznim kućanstvima i objektima, državi Hrvatskoj u njenom razvoju ali i okolišu u njegovom očuvanju.

Literatura

- [1] Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. Pristupljeno 13. 8. 2023., poveznica: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=64995>
- [2] IRENA ORG; Wind Energy, poveznica: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Wind-energy>
- [3] DS Nova energija; LCOE, Levelized Trošak Električne Energije Također Znam Kao LEC, Levelized Trošak Energije, poveznica: <https://hr.dsnsolar.com/info/lcoe-levelized-cost-of-electricity-also-know-33963863.html>
- [4] Carbon Fiber Composites for Large-Scale Wind Turbine Blades: Applicability Study and Comprehensive Evaluation in China, poveznica: <https://www.mdpi.com/2077-1312/11/3/624>
- [5] Thunder Said Energies; Windy physics: how is power of a wind turbine calculated?, poveznica: <https://thundersaidenergy.com/downloads/wind-power-impacts-of-larger-turbines/>
- [6] GRADSKI URED ZA GOSPODARSTVO, EKOLOŠKU ODRŽIVOST I STRATEGIJSKO PLANIRANJE; Energija vjetra, poveznica: <https://eko.zagreb.hr/energija-vjetra/84>
- [7] Kevin Shea, Brian C. Howard; Build your own small wind power system (2012), stranica 63
- [8] My Eco Home Essentials; The Disadvantages of Wind Power with Wind Turbines, poveznica: <https://www.eco-home-essentials.co.uk/disadvantages-of-wind-power.html>
- [9] Ember; European power price tracker, poveznica: <https://ember-climate.org/data/data-tools/europe-power-prices/>
- [10] Attainable Home; Pros And Cons Of Small Wind Turbines (Do You Buy?), poveznica: <https://www.attainablehome.com/pros-and-cons-of-small-wind-turbines/>
- [11] Planète Energies; Electricity Generation and Related CO2 Emissions, poveznica: <https://www.planete-energies.com/en/media/article/electricity-generation-and-related-co2-emissions>
- [12] Shine Turbine by Aurea Technologies Inc. , poveznica: <https://shineturbine.com/>
- [13] Kickstarter Design & Tech; Harness the Power of the Wind with a Sleek Turbine That Fits in a Backpack, poveznica: <https://www.core77.com/posts/109076/Harness-the-Power-of-the-Wind-with-a-Sleek-Turbine-That-Fits-in-a-Backpack>

- [14] Leigh Matthews; The 5 Best Home Wind Turbines for Clean Energy Generation, poveznica: <https://www.leafscore.com/eco-friendly-garden-products/the-best-home-wind-turbines/>
- [15] Jenn Ryan; 8 Important Things to Know About Home Wind Turbines, poveznica: <https://www.bobvila.com/articles/wind-turbine-for-home/>
- [16] Damir Šljivac, Danijel Topić: Obnovljivi izvori električne energije, Osijek 2018.
- [17] The Archimedes windmill, poveznica: <https://thearchimedes.com/products>
- [18] Herox.com ; Matt Williams - Noiseless Wind Turbines Unveiled, poveznica: <https://www.herox.com/blog/501-noiseless-wind-turbines-unveiled>
- [19] Damir Šljivac, Danijel Topić: Obnovljivi izvori električne energije, stranica 82
- [20] Research Gate: Experimental Vibration Analysis of a Small Scale Vertical Wind Energy System for Residential Use, poveznica: https://www.researchgate.net/figure/Different-kinds-of-vertical-axis-wind-turbines-VAWT-a-Savonius-b-Darrieus-with_fig1_333316757
- [21] Research Gate, poveznica: https://www.researchgate.net/figure/a-Lift-type-vertical-axis-wind-turbines-VAWTs-and-b-Drag-type-VAWT_fig3_358421051
- [22] Jim Trepka; Wind energy – Ch 5 – HAWT vs VAWT, poveznica: <https://kirkwood.pressbooks.pub/windenergy/chapter/chapter-3-hawt-vs-vawt/>
- [23] RECHARGE; Nordics' first airborne wind energy farm on track 'for 2021' after takeover, poveznica: https://www.rechargenews.com/wind/nordics-first-airborne-wind-energy-farm-on-track-for-2021-after-takeover/2-1-764097?zephro_sso_ott=15tx0Z
- [24] Massachusetts Institute of Technology, Rob Matheson; High-flying turbine produces more power, poveznica: <https://news.mit.edu/2014/high-flying-turbine-produces-more-power-0515>
- [25] Aeromine Technologies; World Economic Forum: Aeromine 1 of 4 smart renewable energy innovations, poveznica: <https://www.aeromine.com/news/world-economic-forum-aeromine-1-of-4-smart-renewable-energy-innovations>
- [26] Aeromine Technologies – Home; poveznica: <https://www.aeromine.com/>
- [27] Danu Energy, RidgeBlade, poveznica: <https://ridgeblade.com/>
- [28] Kevin Shea, Brian C Howard, Build your own small wind power system (2012), stranica 124
- [29] Danish wind industry association; Wind rose, poveznica: <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/tour/wres/rose.htm>

- [30] Neverin; Meteorološka postaja Zadar, poveznica: <https://www.neverin.hr/postaja/zadar/> - posjećeno 29.7.2023.
- [31] Kevin Shea, Brian C Howard, Build your own small wind power system (2012), stranica 137
- [32] Wind Turbine Technology (ASME Press, 2009) edited by David A. Spera; Windenergie: Theorie, Anwendung Messung by Jens-Peter Molly; Paul Gipe's Wind Energy Basics (Chelsea Green Publishing, 2009); and European Commission's "Urban Wind Resource Assessment in the UK."
- [33] Danish wind industry association; Wind obstacles, poveznica: <http://xn--drmsttre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/tour/wres/obst.htm>
- [34] Ember; European power price tracker, poveznica: <https://ember-climate.org/data/data-tools/europe-power-prices/>
- [35]_HEP ELEKTRA; Tarifne stavke (cijene), poveznica: <https://www.hep.hr/elektra/kucanstvo/tarifne-stavke-cijene/1547> - stranica posjećena 30.7.2023.
- [36] Attainable Home; How Long Do Small Wind Turbines Last? (With Warranty Info), poveznica: <https://www.attainablehome.com/how-long-do-small-wind-turbines-last/>
- [37] Taylor Johnson; How much does a wind turbine earn? When will it pay for itself? Let's calculate profit and break-even points, poveznica: <https://www.windpowerengineering.com/windpower-profitability-and-break-even-point-calculations/>
- [38] ARTAS – Vjetrenjače, poveznica: <https://www.artas.hr/energija/vjetrenjace.htm>
- [39] Matt Ferrell; The Challenges of a Wind Turbine on Your Home, poveznica: <https://undecidedmf.com/episodes/the-challenges-of-a-wind-turbine-on-your-home>
- [40] Energy Data Info; Global wind atlas, poveznica: <https://globalwindatlas.info/en/>
- [41] Neverin; Meteorološka postaja Ogulin, poveznica: <https://www.neverin.hr/postaja/ogulin/> - posjećeno 2.8.2023
- [42] Vrijeme i klima hrvatskog Jadrana; Bura, poveznica: <http://jadran.gfz.hr/bura.html>
- [43] Vjetroelektrane.com – Edo Jerkić; Vjetroelektrana Vrataruša, poveznica: <http://www.vjetroelektrane.com/vjetroelektrane-u-regiji/433-vjetroelektrana-vratarusa>
- [44]_Vrijeme i klima hrvatskog Jadrana; Bura - objašnjenje, poveznica: http://jadran.gfz.hr/bura_objasnjenje.html

[45]_Neverin; Meteorološka postaja Senj, poveznica : <https://www.neverin.hr/postaja/senj/> - posjećeno 3.8. 2023

[46] Build.com; Wind speed, cut-in and cut-out, poveznica: <https://build.com.au/wind-speedcut-and-cut-out>

[47]_Neverin; Meteorološka postaja Kraljevica - Oštro, poveznica: <https://www.neverin.hr/postaja/kraljevica-ostro/> - posjećeno 4.8. 2023.

[48] Vjetroelektrane.com – Edo Jerkić; Mali vjetroagregati –VE za početnike, poveznica <http://www.vjetroelektrane.com/vjetroelektrane-za-pocetnike/749-mali-vjetroagregati-prednosti-i-zasto-ih-nema-vise>

[49] Nikola Karadža , Andro Bačan, László Horváth, Siniša Knežević; MALI VJETROAGREGATI I FOTONAPONSKI MODULI ZA AUTONOMNE APLIKACIJE NA OTOCIMA PRIMORSKO-GORANSKE ŽUPANIJE

[50] Vjetroelektrane.com – Edo Jerkić; Mali vjetroagregati – Mali vjetroagregati - situacija u Hrvatskoj, poveznica: <http://www.vjetroelektrane.com/vjetroelektrane-za-pocetnike/775-mali-vjetroagregati-situacija-u-hrvatskoj>

Sažetak

Ovaj se rad bavi malim vjetroelektranama, njihovim agregatima te potencijalnim lokacijama za njihovu ugradnju. Nakon što su pojašnjeni mehanizmi na kojima se zasnivaju vjetroelektrane zajedno sa njihovom povijesti, objašnjene su potom prednosti i nedostaci malih vjetroelektrana. Zatim su analizirane različite lokacije Republike Hrvatske kao potencijalne lokacije za ugradnju malih vjetroelektrana te su na temelju stečutih znanja donešene procjene isplativosti. Na kraju se rad dotiče trenutne situacije pitanja malih vjetroelektrana u Republici Hrvatskoj te je potom donesen i zaključak ovog rada.

Ključne riječi: potencijalne lokacije, mali vjetroagregati

Abstract

Small wind turbines

This paper addresses small wind turbines, their units, and potential installation locations. After explaining the mechanisms on which wind turbines are based, along with their history, the advantages and disadvantages of small wind turbines are then discussed. Subsequently, various locations in the Republic of Croatia are analyzed as potential sites for the installation of small wind turbines, and profitability estimates are made based on the acquired knowledge. Finally, the paper addresses the current situation regarding small wind turbines in the Republic of Croatia, followed by the conclusion of this paper.

Keywords: potential locations, small wind turbines

Životopis

Ivan Škorić, rođen 5. veljače 2002. godine u Osijeku započinje osnovnoškolsko obrazovanje u osnovnoj područnoj školi „Vladimir Nazor“ u Đakovačkom Pisku 2008. godine. Osnovnu školu „Vladimir Nazor“ u Đakovu završava 2016. godine te iste upisuje srednju školu „Gimnazija Antuna Gustava Matoša“ u Đakovu, prirodoslovno-matematički smjer. Srednju školu završava u srpnju 2020. godine kada iste godine upisuje preddiplomski studij elektroenergetike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku.

Ivan Škorić