

Analiza rada vjetroagregata s obzirom na proizvodnu razinu buke

Stošić, Domagoj

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:289438>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-30**



Repository / Repozitorij:

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 62

**ANALIZA RADA VJETROAGREGATA S OBZIROM NA
PROIZVEDNU RAZINU BUKE**

Domagoj Stošić

Zagreb, veljača 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 62

**ANALIZA RADA VJETROAGREGATA S OBZIROM NA
PROIZVEDNU RAZINU BUKE**

Domagoj Stošić

Zagreb, veljača 2024.

DIPLOMSKI ZADATAK br. 62

Pristupnik: **Domagoj Stošić (0036495472)**
Studij: Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Profil: Elektroenergetika
Mentor: prof. dr. sc. Antonio Petošić

Zadatak: **Analiza rada vjetroagregata s obzirom na proizvodnu razinu buke**

Opis zadatka:

U radu će se analizirati rad vjetroturbina pri odgovarajućim brzinama vjetra s obzirom na razinu generirane zvučne i proizvedene električne snage. Razmotrit će se modovi rada vjetroagregata pri različitim brzinama i smjerovima vjetra radi postizanja postavljenih akustičkih kriterija. Napravit će se proračun razina buke za određenu simuliranu situaciju sa pozicijama vjetroagregata i udaljenostii najbližih ugroženih objekata pri kritičnim smjerovima vjetra te predložiti način rada vjetroagregata s obzirom na dozvoljenu proizvodnu razinu buke i proizvodnju električne energije.

Rok za predaju rada: 9. veljače 2024.

Zahvala prof. dr. sc. Antoniju Petošiću na mentorstvu i uvijek dostupnoj pomoći pri izradi diplomskog rada.

Sadržaj

Uvod	3
1. Osnove vjetroagregata	4
1.1. Dijelovi vjetroagregata	4
1.2. Vrste vjetroagregata	5
1.3. Stanje vjetroelektrana u svijetu	7
1.3.1. Raspoloživi kapacitet	8
1.4. Stanje vjetroelektrana u Hrvatskoj	10
1.5. Varijabilnost proizvodnje električne energije i nepredvidivost energije vjetra	12
1.6. Priključak vjetroelektrane na elektroenergetsku mrežu	13
1.7. Energija vjetra	13
1.8. Turbina vjetroagregata	15
1.8.1. Ovisnost snage turbine o brzini vjetra	15
1.8.2. TSR	16
1.9. Aerodinamički profil lopatice vjetroturbine	17
1.10. Regulacija snage vjetroagregata	18
2. Buka vjetroagregata	19
2.1. Parametri zvučnog polja	20
2.2. Ocjenska razina buke	21
2.3. Veza zvučnog tlaka i zvučne snage	22
2.4. Zvučna snaga	24
2.4.1. Zvučna snaga vjetroagregata	24
2.5. Rezidualna buka vjetroagregata	25
2.6. Načini rada vjetroagregata	26
3. Metode mjerenja i modeliranja rezidualne buke i buke vjetroagregata	29
3.1. Zvukomjer	29

3.2.	Metode modeliranja buke	30
3.2.1.	Predictor-LimA.....	30
4.	Rezultati mjerenja i modeliranja buke vjetroagregata.....	31
4.1.	Model buke vjetroagregata	31
4.2.	Postavke proračuna modela buke vjetroagregata.....	32
4.2.1.	Klasa stabilnosti i paramteri propagacije.....	32
4.2.2.	Utjecaj tla.....	33
4.2.3.	Cilj modeliranja buke vjetroagregata	34
4.3.	Rezultati proračuna buke vjetroagregata	34
4.3.1.	Rezultati proračuna buke za mod 0	34
4.3.2.	Rezultati proračuna buke vjetroagregata za mod 5	39
4.3.3.	Rezultati proračuna buke vjetroagregata za mod 18	40
4.4.	Usporedba rezultata	41
4.5.	Utjecaj buke vjetroagregata na rezidualnu buku.....	43
4.6.	Proizvedena električna energija vjetroagregata s obzirom na način rada	45
	Zaključak	46
	Literatura	47
	Sažetak.....	49

Uvod

Vjetroagregat je elektromehanički sustav koji pretvara kinetičku energiju vjetra u električnu energiju. Pojam vjetroelektrana označava naziv za više vjetroagregata zajedno povezanih na elektroenergetsku mrežu. Osnovni dijelovi vjetroagregata su rotor na kojemu su lopatice, generator, stup i kućište. Lopatice pokreće aerodinamički uzgon vjetra. Buka vjetroagregata je konstantan problem koji se javlja pri radu vjetroagregata, a buku proizvode lopatice kada sijeku vjetar. Buka se opisuje akustičnim parametrima poput snage, tlaka, intenziteta i energije. U diplomskome radu bit će opisani glavni parametri vjetroagregata, stanje vjetroelektrana u svijetu i Hrvatskoj te utjecaju vjetroelektrana na elektroenergetski sustav. Opisana je i buka vjetroagregata te u simulacijskom dijelu diplomskog rada korištenjem programskog alata Predictor-LimA promatran je utjecaj pojedinog načina rada vjetroagregata na buku okoliša na mjernim točkama oko vjetroparka te proizvodnju električne energije.

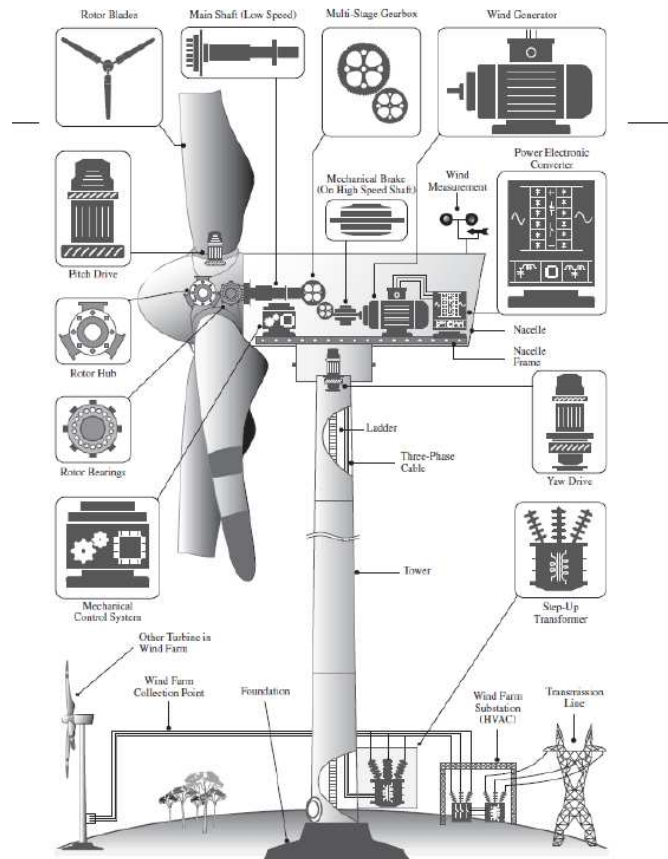


Slika 0 Vjetroagregat[1]

1. Osnove vjetroagregata

1.1. Dijelovi vjetroagregata

Osnovni dijelovi vjetroagregata su turbina, lopatice, upravljački sustav, generator, oprema za zakretanje, kućište, stup, multiplikator i priključak na EES. Turbina je zaslužna za proizvodnju električne energije jer kinetička energija vjetra okreće lopatice turbine te time i pokreće samu turbinu. Upravljački sustav se nalazi u unutrašnjem dijelu vjetroagregata. Generatori koji se koriste u vjetroagregatima su sinkroni i asinkroni generatori. Takvi generatori za vjetroagregate imaju posebnu konstrukciju jer rade s varijabilnim snagama. Vjetroagregati veće snage koriste generatore izmjeničnog napona koji se hlade zrakom. Sinkroni generatori se koriste za vjetroagregate iznad 3 MW, a to su uglavnom sinkroni generatori s permanentnim magnetima i sinkroni generatori s uzbudnim namotom na rotoru. Asinkroni generatori se koriste za vjetroagregate do 3 MW, a postoji i izvedba kaveznog i dvostruko napajanog asinkronog generatora.[2] Kućište služi da zaštiti generator od utjecaja okoliša te smanji buku koju proizvodi generator. Stup je najčešće cjevaste izvedbe, ali može biti i rešetkasti. U unutrašnjosti stupa najčešće se nalaze stube, a kod većih izvedbi ugrađuje se dizalo. Na dnu se nalazi transformator. Rotori turbine i generatora nalaze se na istoj osovini, a uz njih je i frekvencijski pretvarač koji može prilagoditi brzinu vrtnje turbine. Proizvedena električna energija se dovodi na transformator te se dalje šalje na elektroenergetsku mrežu. Dijelovi vjetroagregata su prikazani slikom 1.1.



Slika 1.1 Dijelovi vjetroagregata [2]

1.2. Vrste vjetroagregata

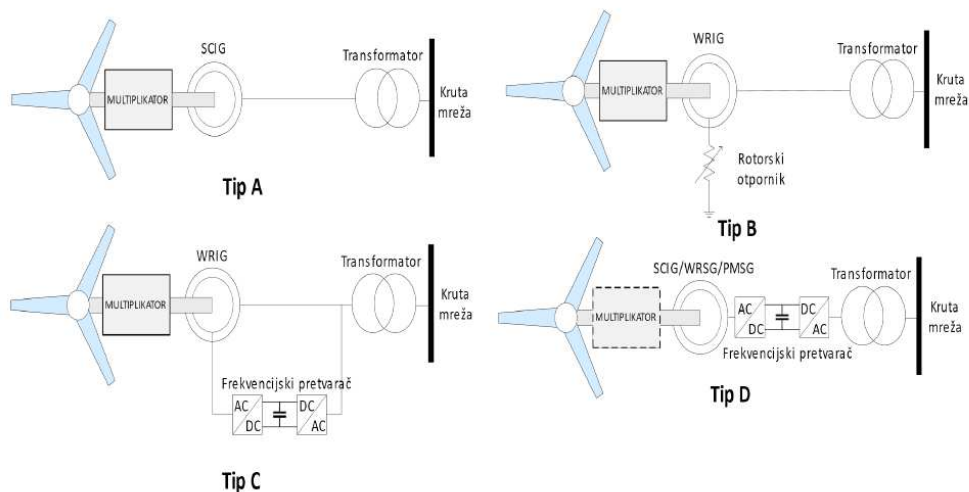
Vjetroagregati se mogu podijeliti s obzirom na:

- Instaliranu snagu
- Mjesto izgradnje
- Regulaciju snage
- Način pretvorbe energije
- Os vrtnje

S obzirom na snagu vjetroagregati se dijele na male, srednje i velike. Mali vjetroagregati su do snage od 30 kW i koriste se kao sustav izvora električne energije i baterije koja se puni kada postoji nagli porast u proizvodnji električne energije vjetroagregata. Snaga srednjih i velikih vjetroagregata iznosi do 1500 kW. Prema mjestu izgradnje razlikujemo „off-shore“ tj. vjetroagregate na moru i „on-shore“ tj. kopnene vjetroagregate. Lokacija se bira tako da se provedu proračuni koji će pronaći mjesto s optimalnom raspodjelom brzine vjetra te ekološkim uvjetima. S obzirom na način pretvorbe energije, vjetroagregati se mogu podijeliti

na vjetroagregate sa sinkronim generatorom (sa i bez multiplikatora) te vjetroagregate s asinkronim generatorom i multiplikatorom. Prema osi vrtnje razlikujemo vjetroagregate s horizontalnom i vertikalnom osi. Uglavnom se koriste vjetroagregati s horizontalnom osi vrtnje. Vjetroagregati s horizontalnom osi vrtnje najčešće imaju tri lopatice te sustav koji ih usmjerava prema vjetru. Duljina lopatica se proteže od 20 do 50 m, dok je visina stupa dva do tri puta veća od duljine lopatica. Standardne brzine vrtnje lopatica iznose od deset do dvadeset okretaja u minuti. S obzirom na regulaciju snage, vjetroagregati se mogu podijeliti na agregate s pasivnom i agregate s aktivnom regulacijom. Dodatno kod regulacije snage, vjetroagregate možemo podijeliti na tip A, B, C i D koji su prikazani na slici 1.2.

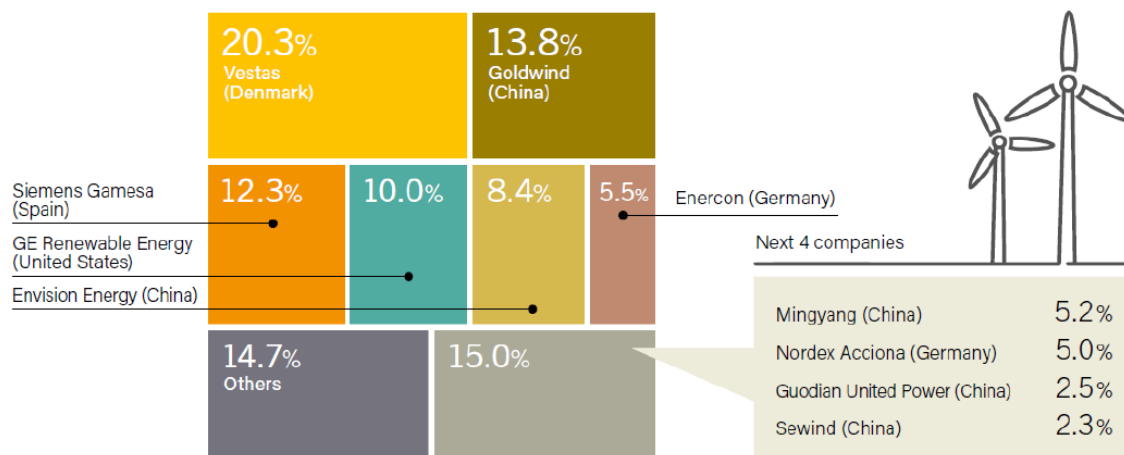
Vjetroagregat A ima fiksnu brzinu i jako malo klizanje te se kod ovog tipa koristi asinkroni generator s kaveznim rotorom koji je preko transformatora priključen na mrežu. Brzina turbine određena je frekvencijom mreže, izvedbom asinkronog generatora te multiplikatorom. Najviše je učinkovit pri jednoj ili dvije brzine vjetra. Snaga se upravlja zakretom lopatica, pasivnim ili aktivnim kočenjem. Vjetroagregat B ima promjenjivo klizanje i kod ovog tipa se koristi asinkroni generator s namotanim rotorom. Spojen je na mrežu preko transformatora, a snaga se upravlja zakretom lopatica. Vjetroagregat C ima promjenjivu brzinu te se kod ovog tipa koristi asinkroni generator čiji je rotor spojen na mrežu preko frekvencijskog pretvarača čime se regulira brzina vrtnje turbine. Snaga se upravlja zakretom lopatica te je ova vrsta vjetroagregata najzastupljenija jer cijena frekvencijskog pretvarača jeftina. Vjetroagregat D ima promjenjivu brzinu te se kod njega koristi sinkroni ili asinkroni generator. Stator je razdvojen od mreže preko potpunog frekvencijskog pretvarača. Potpuni frekvencijski pretvarač omogućuje proizvodnju električne energije na nazivnoj frekvenciji koja ne ovisi o brzini turbine. Snaga se regulira mijenjanjem kuta zakreta lopatica.[9]



Slika 1.2 Pojedine vrste vjetroagregata [9]

1.3. Stanje vjetroelektrana u svijetu

Glavni proizvođači vjetroagregata (slika 1.3) u svijetu su redom Danska, Kina, Španjolska, SAD i Njemačka, dok godišnje najviše u instalaciju vjetroagregata ulažu redom Kina, SAD, Njemačka, Indija i Brazil. Kina je jedna od vodećih zemalja u svijetu po instaliranom kapacitetu vjetroelektrana. Kao zemlja s brzim ekonomskim rastom i potrebom za čistom energijom, Kina je postavila ogroman broj vjetroelektrana diljem zemlje. SAD je također među vodećim zemljama po instaliranim kapacitetima vjetroelektrana. Države poput Teksasa, Kalifornije i Iowe se ističu po velikom broju vjetroelektrana. U 2022. godini instalirano je više od 90.000 vjetroagregata diljem SAD-a te je investirano više od 84 milijuna USD u nove projekte izgradnje vjetroelektrana, dok je 2.7 milijardi USD uloženo u „off-shore“ industriju vjetroelektrana te u kreiranje odgovarajuće infrastrukture. Njemačka se u zadnjih nekoliko godina kompletno usredotočila na obnovljive izvore energije, a Indija s obzirom na svoje energetske potrebe i rastuću ekonomiju se sve više oslanja na obnovljive izvore energije poput energije vjetra. Osim navedenih zemalja, svake godine broj instaliranog kapaciteta vjetroagregata raste s obzirom na to da je potreba za čistom energijom i smanjenje emisija glavni trend u energetici.



Slika 1.3 Glavni proizvođači vjetroagregata u svijetu[3]

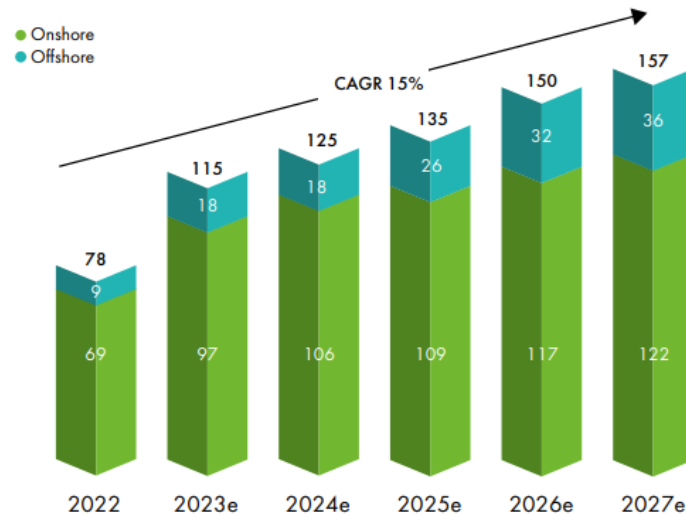
	1	2	3	4	5
Investment in renewable power and fuels (not including hydropower over 50 MW)	China	United States	Japan	India	Australia
Investment in renewable power and fuels per unit GDP ¹	Palau	Djibouti	Morocco	Iceland/Serbia	
Geothermal power capacity	Turkey	Indonesia	United States	Iceland	New Zealand
Hydropower capacity	China	Brazil	Pakistan	Turkey	Angola
Solar PV capacity	China	India ² /United States		Japan	Australia
Concentrating solar thermal power (CSP) capacity	China/Morocco		South Africa	Saudi Arabia	-
Wind power capacity	China	United States	Germany	India	Brazil
Solar water heating capacity	China	Turkey	India	Brazil	United States
Biodiesel production	United States	Brazil	Indonesia	Germany	Argentina
Ethanol production	United States	Brazil	China	Canada	Thailand

Slika 1.4 Glavni ulagači u instalaciji vjetroagregata [3]

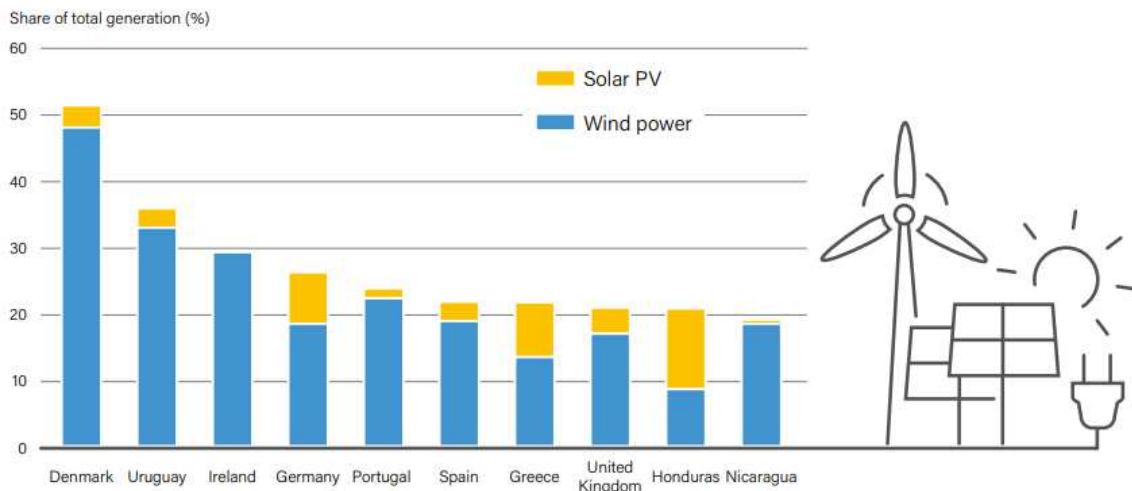
1.3.1. Raspoloživi kapacitet

Prema podacima krajem 2023. godine, ukupni instalirani kapacitet vjetroelektrana u svijetu iznosi oko 906 GW. Naravno, instalirani kapacitet je broj koji se stalno mijenja s novim instalacijama, zamjenom starih vjetroagregata novijim te razvojem tehnologije u energetici. Prema izvještaju Global Wind Energy Councila o energiji vjetera i vjetroagregatima, 2022. godina je bila treća najbolja godina za industriju vjetroelektrana te je u toj godini instalirano 78 GW, od kojih je 16.7 GW instalirano u Europi. GWEC pretpostavlja (slika 1.5) da će u periodu od 2023. do 2027. godine biti instalirano 680 GW kapaciteta vjetroagregata. Zemlja kojoj vjetroelektrane zauzimaju najveći udio u ukupnoj proizvodnji električne energije je Danska što je vidljivo na slici 1.6. U rujnu 2022. godine Danska, IRENA („International Renewable Energy Agency“) i GWEC su osnovali

udruženje za „off-shore“ vjetroelektrane zvano GOWA („Global Offshore Wind Alliance“) s ciljem povećanja broja „off-shore“ vjetroelektrana. Do 2030. godine planiraju instalirati 380 GW, a 2000 GW do 2050. godine. GOWA vjeruje da će instaliranje „off-shore“ vjetroelektrana imati velik utjecaj na energetska tranziciju. Za uspjeh GOWA-e i utjecaja vjetroelektrana na energetska tranziciju, ključno je da se ostvari suradnja između vlada, međunarodnih organizacija i privatnog sektora. GOWA trenutno ima 14 članova, a neke od njih su SAD, Japan, Australija, UK, Njemačka.



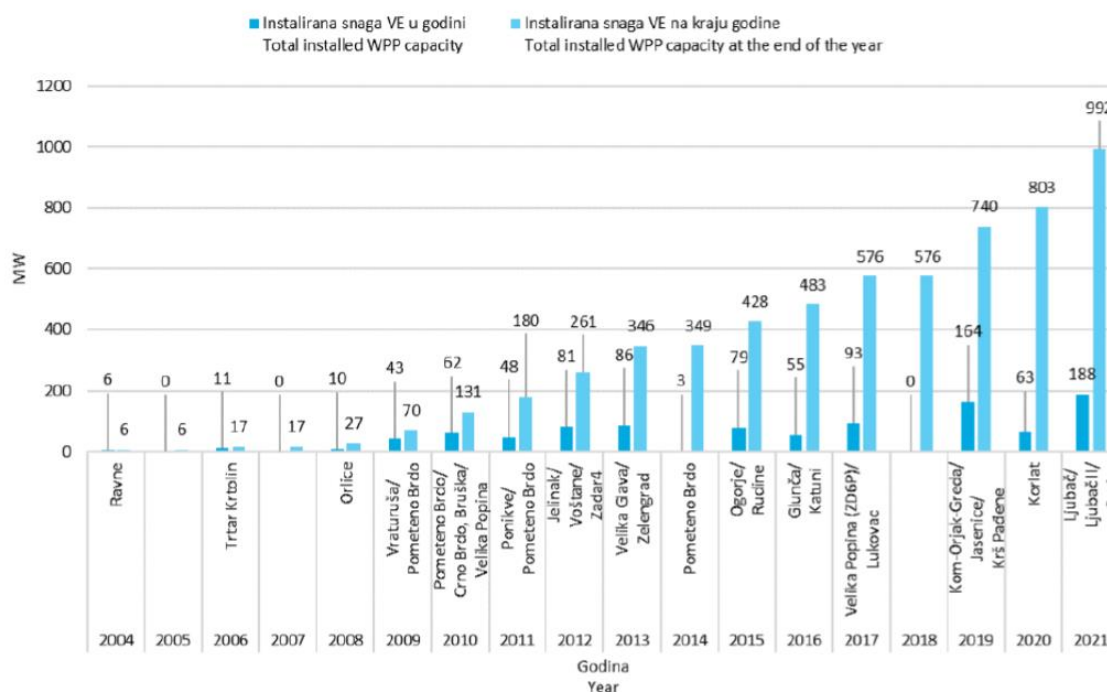
Slika 1.5 Predviđanja instalacije kapaciteta vjetroagregata [4]



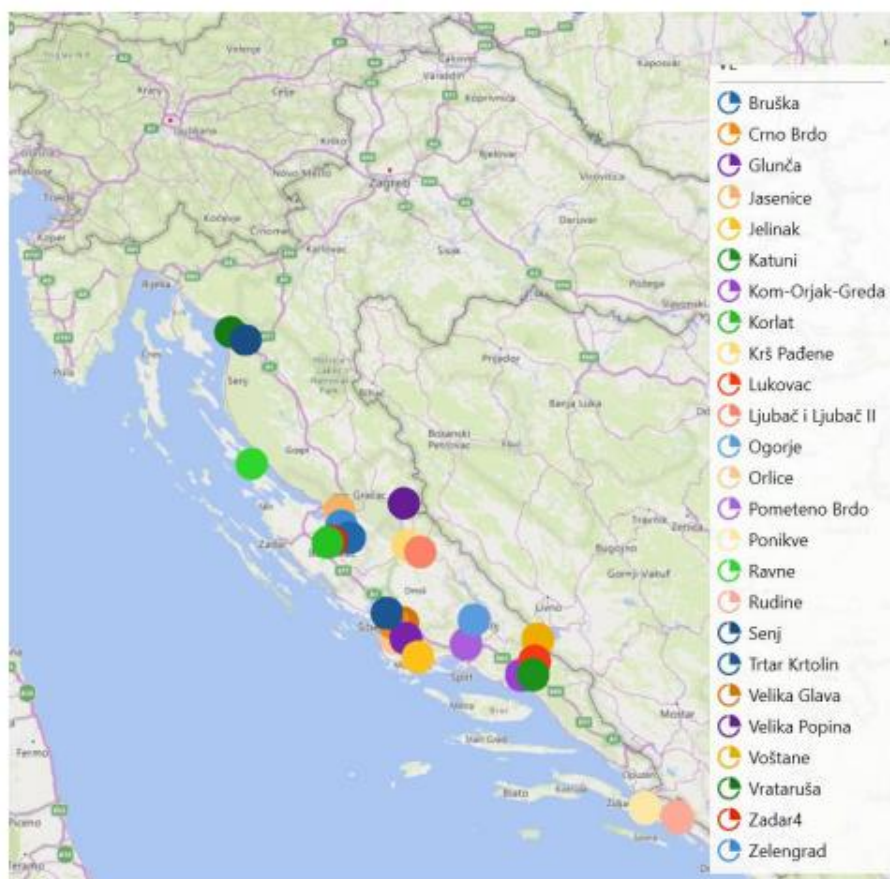
Slika 1.6 Udio vjetroelektrana u ukupnoj proizvodnji električne energije u svijetu [4]

1.4. Stanje vjetroelektrana u Hrvatskoj

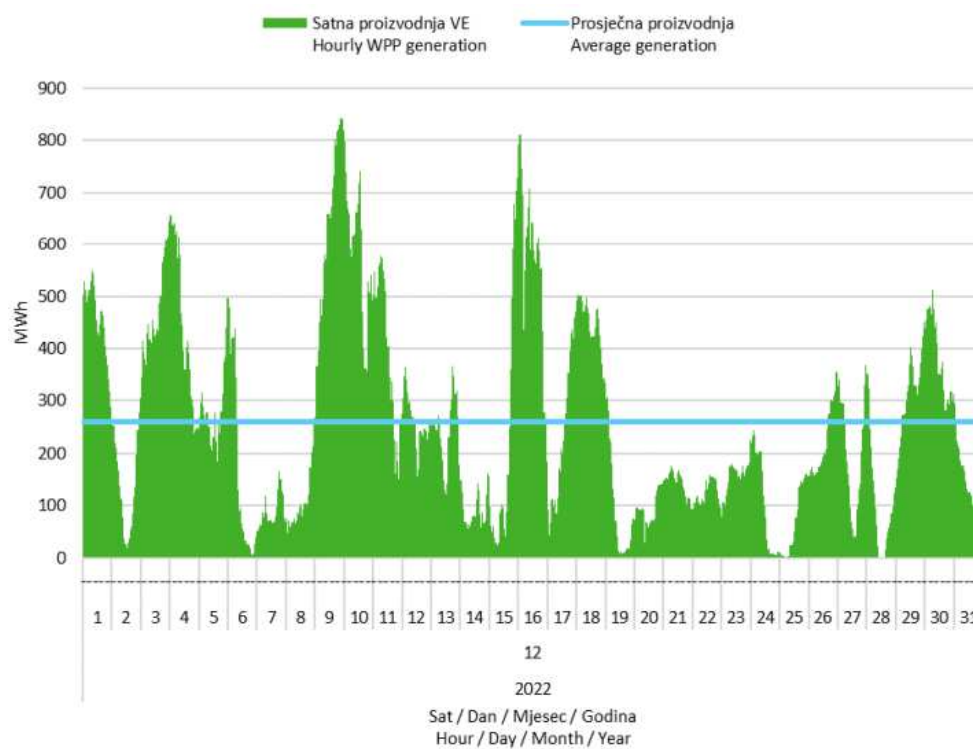
Vjetroelektrane zadovoljavaju oko 10% ukupne proizvodnje električne energije u Republici Hrvatskoj, a slikom 1.7 su prikazani instalirani kapaciteti vjetroelektrana po godinama. Ukupni instalirani kapacitet redovnog pogona vjetroelektrana u prosincu 2022. godine u Hrvatskoj je iznosio 834.15 MW i s odobrenom snagom priključenja od 824.85 MW. U probnom pogonu tj. izgradnji je bila jedna vjetroelektrana u iznosu od 156 MW. Vjetroelektrane u Hrvatskoj su većinom smještene na obalnim područjima, otocima i brdovitim područjima unutrašnjosti gdje su vjetrovi poput bure i juga češći i snažniji. Najviše ih je smješteno u Šibensko-kninskoj županiji, Zadarskoj županiji, Splitsko-dalmatinskoj županiji, Dubrovačko-neretvanskoj županiji i Ličko-senjskoj županiji (slika 1.8). Vjetroelektrane su uglavnom priključene na prijenosnu mrežu 220 kV i 110 kV. Ukupna mjesečna proizvodnja svih vjetroelektrana iznosila je 193209.74 MW, a satna proizvodnja u prosincu prikazana je slikom 1.9. U Hrvatskoj postoji veliki interes za razvoj vjetroenergije kao dio svoje strategije smanjenja emisija stakleničkih plinova i diversifikacije energetskeg portfelja. Planovi uključuju povećanje udjela obnovljivih izvora energije, uključujući i vjetroelektrane.



Slika 1.7 HOPS-ov izvještaj o instaliranom kapacitetu vjetroelektrana u RH [5]



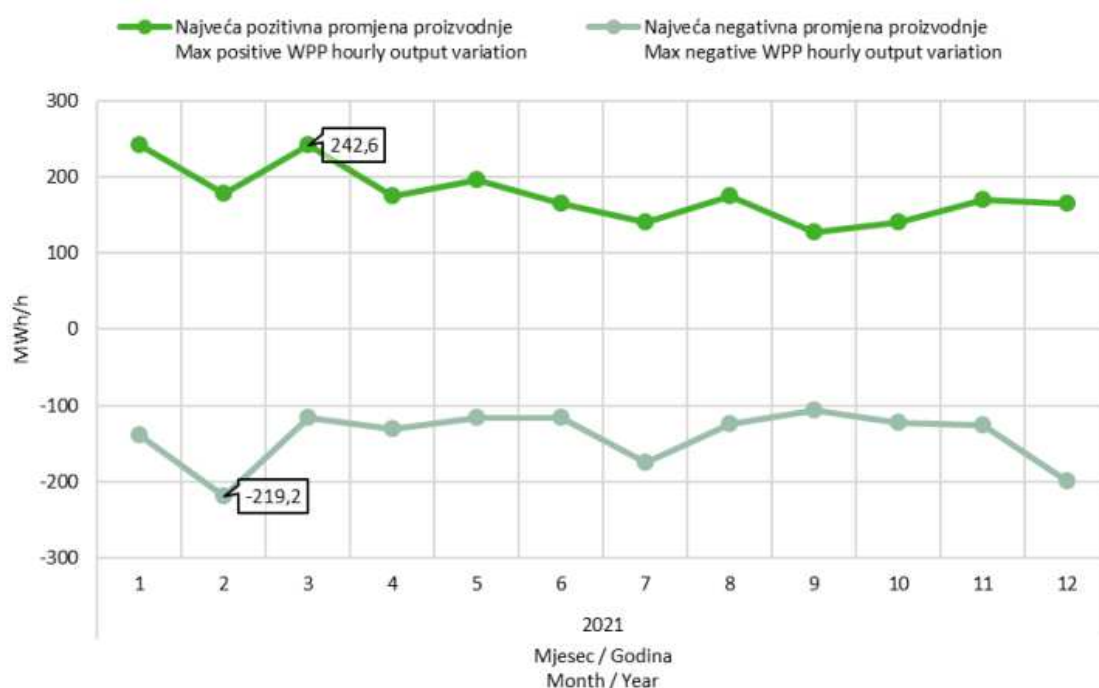
Slika 1.8 Lokacije vjetroelektrana u RH [5]



Slika 1.9 Satna proizvodnja vjetroelektrana u RH u prosincu 2022. [5]

1.5. Varijabilnost proizvodnje električne energije i nepredvidivost energije vjetra

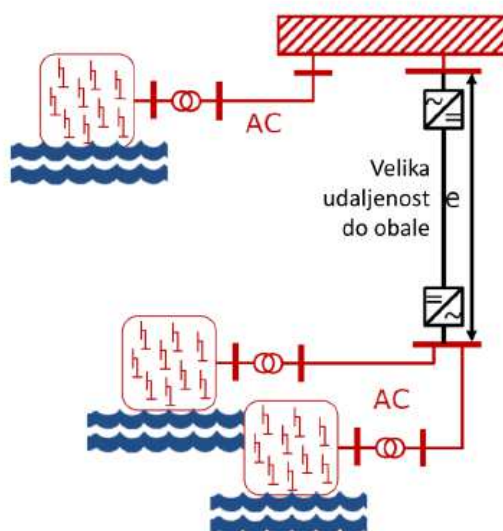
Dvije najvažnije karakteristike koje opisuju proizvodnju električne energije obnovljivih izvora u elektroenergetskom sustavu su varijabilnost i nepredvidivost. Varijabilnost označava varijabilnu proizvodnju vjetroelektrana koja zahtijeva angažman drugih upravljivih jedinica, a nepredvidivost označava nepredvidiv karakter vjetra čija se energija može iskoristiti za proizvodnju električne energije te njegov nepredvidiv karakter koji onda utječe na izlaznu snagu vjetroagregata. Nepredvidivost traži povećanu rezervu u sustavu. U vođenju EES-a zbog varijabilnosti i nepredvidivosti vjetroelektrana zato je izrazito važna promjenjivost proizvodnje električne energije. Slikom 1.10 je prikazana razlika prosječne proizvodnje u dva uzastopna sata. Ovaj podatak je posebice važan operatoru prijenosnog sustava koji zbog regulacije frekvencije mora reagirati na nagle promijene u proizvodnji vjetroelektrana u sustavu.



Slika 1.10 Promjena satne proizvodnje vjetroelektrana u mjesecu [5]

1.6. Priključak vjetroelektrane na elektroenergetsku mrežu

Velike priobalne vjetroelektrane spojene su na visokonaponsku mrežu dok se vjetroelektrane na kopnu spajaju na srednji ili visoki napon. Vjetroelektrane manje od 10 MW se spajaju na srednji napon (10, 20 i 35 kV), vjetroelektrane veće od 10 MW se spajaju na visoki napon (110 kV, 220 kV, 400 kV) dok se manje vjetroelektrane spajaju na niski napon (0,4 kV) ili se spajaju izvan mreže. Pojedine vjetroelektrane koje su na većoj udaljenosti od obale mogu biti spojene i HVDC-om (visokonaponski istosmjerni prijenos) jer su na HVDC-u gubitci manji, no cijena mu znatno skuplja (skupi prekidači) od standardne izmjenične prijenosne mreže. Vjetroelektrane se na mrežu spajaju pretvaračima koji rade na principu energetske elektronike. Slikom 1.11 prikazana je pojednostavljena shema priključka vjetroelektrana na mrežu.

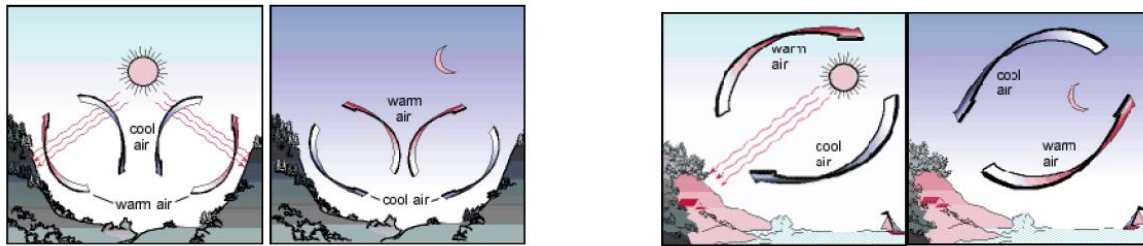


Slika 1.11 Shema priključka vjetroelektrana na mrežu [8]

1.7. Energija vjetra

Vjetar je masa zraka u pokretu koju uzrokuje razlika tlakova tj. razlika temperatura. Uzrokuje ga i sunčeva energija jer se 1 - 2% sunčeve energije pretvori u energiju vjetra te ga uzrokuje i sama rotacija Zemlje i konfiguracija tla i reljefa. Vjetar kao obnovljivi izvor, kao i prethodno opisan, je karakteriziran svojom nepredvidivošću te tako njegova stalno

promjenjiva brzina utječe na izlaznu snagu vjetroagregata. Slikom 1.12 vidi se kako razlika temperature zraka stvara vjetar.



Slika 1.12 Ilustracija razlike temperatura zraka i stvaranje vjetra [2]

Kinetička energija mase zraka definirana je umnoškom mase zraka i kvadrata brzine vjetra podijeljenim s 2 (izraz 1), a masa zraka (m) je definirana umnoškom gustoće zraka (ρ), površine (A) i brzine vjetra (v) (izraz 2) iz čega slijedi i izraz za snagu vjetra. (izraz 3.) Gustoća zraka ovisi o temperaturi, tlaku i vlažnosti, a za standardne uvjete iznosi 1.225 kg/m^3 .

$$E_k = \frac{mv^2}{2} \quad (1)$$

$$\dot{m} = \rho Av \quad (2)$$

$$P = \frac{\rho Av^3}{2} \quad (3)$$

S obzirom na to da nije sva snaga vjetra iskoristiva uvodi se aksijalni inducirani faktor, jer čeonni vrtlozi utječu na ulaznu brzinu vjetra. Aksijalni inducirani faktor pokazuje koliko turbina utječe na ulaznu brzinu vjetra i dan je izrazom 4 koji je definiran dijeljenjem poremećajne brzine čeonih vrtloga i ulazne brzine.

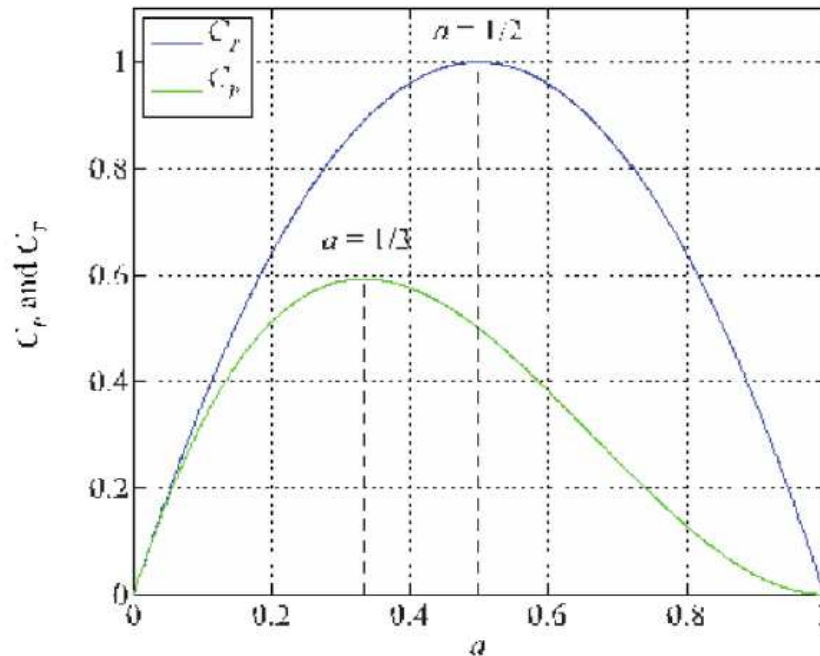
$$a = \frac{V_i}{V_\infty} \quad (4)$$

Iz prethodnih izraza tako se dolazi do koeficijenta snage C_p koji je dan izrazom 5.

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho Av_\infty^3} = 4a(1 - a)^2 \quad (5)$$

Njemački fizičar A. Betz je kroz svoja istraživanja zaključio da je u optimalan slučaju brzina vjetra nakon turbine usporena na $1/3$ početne vrijednosti odnosno da aksijalni

inducirani faktor iznosi $1/3$ što se uvrštavanjem u izraz za koeficijent snage dobiva da optimalan koeficijent snage tj. Betzov koeficijent iznosi 0.593. Ovisnost koeficijenta snage i faktora a prikazana je na slici 1.13

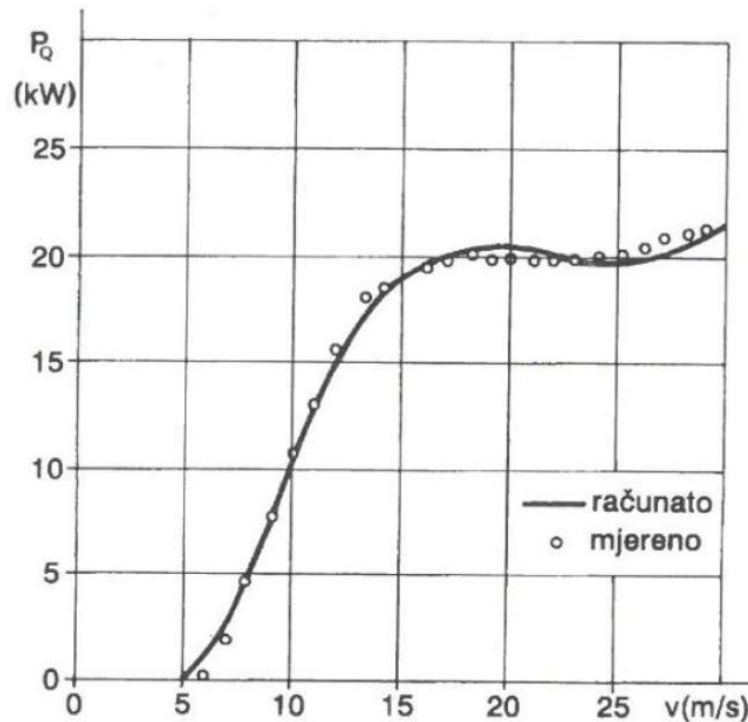


Slika 1.13 Ovisnost koeficijenta snage i faktora a [2]

1.8. Turbina vjetroagregata

1.8.1. Ovisnost snage turbine o brzini vjetra

Snaga turbine u ovisnosti o brzini vjetra je složena matematička funkcija koja zahtijeva velik broj podataka na temelju mjerenja brzine vjetra za određenu lokaciju. Određuje se matematička razdioba brzine i srednja brzina vjetra za određeni interval. Empirijski je ustvrđeno da snaga turbine nakon određenog iznosa brzine vjetra ne raste s trećom potencijom brzine vjetra kao što je navedeno u izrazu 3 nego prvo opada, a onda potom ponovno raste. Takvo ponašanje snage turbine posljedica je deformacije trokuta brzina što i uzrokuje smanjenje aerodinamičkih sila te samim time i smanjenje izlazne snage vjetroagregata, a ta ovisnost je prikazana slikom 1.14.

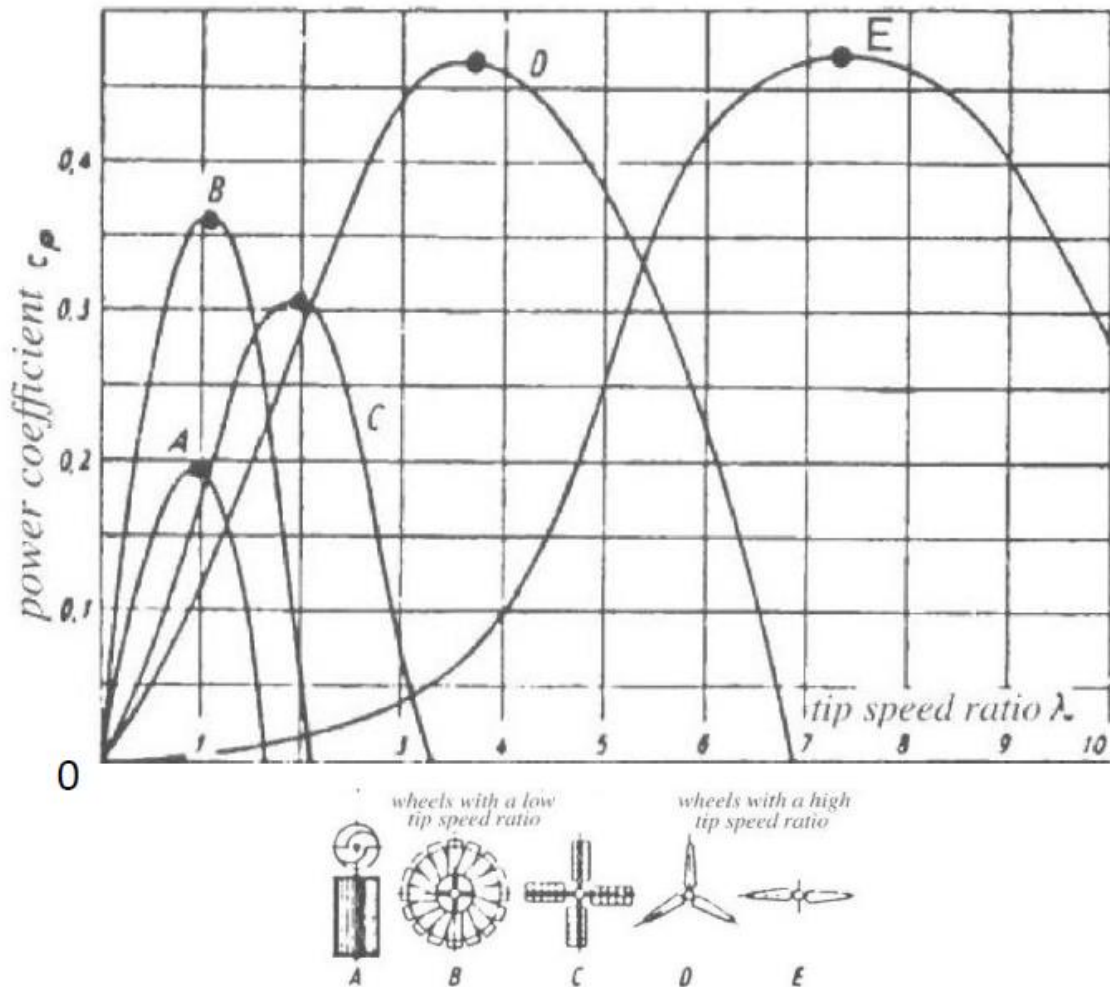


Slika 1.14 Ovisnost snage turbine o brzini vjetra [2]

1.8.2. TSR

TSR ili tip-to-speed pokazuje nam da za određenu brzinu vjetra učinkovitost turbine je matematička funkcija koeficijenta snage tj. koeficijenta brzine vrtnje rotora. Ako se rotor vrti presporo, efikasnost pada jer većina vjetra prolazi kroz rotor nezahvaćeno, a ako se rotor vrti prebrzo, efikasnost pada jer lopatice prolaze kroz već zahvaćen vjetar. TSR se definira dijeljenjem brzine vrha lopatica i brzine vjetra te je dan izrazom 6. Ovisnost koeficijenta snage i TSR-a za različite vrste turbina prikazana je slikom 1.15. S obzirom na nepredvidiv karakter vjetra njegova brzina stalno se mijenja, mijenjat će se i TSR, a za optimalan rad vjetroturbine potrebno je i mijenjati brzinu vrtnje turbine sukladno promijeni brzine vjetra. Današnji vjetroagregati spojeni su na mrežu frekvencijskim pretvaračem koji to i omogućuje.[2]

$$TSR = \frac{\omega R}{v} \quad (6)$$

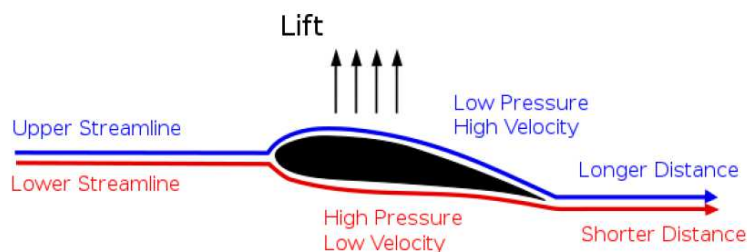


Slika 1.15 Ovisnost koeficijenta snage o TSR-u za različite vrste turbina [2]

1.9. Aerodinamički profil lopatice vjetroturbine

Lopatice vjetroturbine su dizajnirane poput krila aviona. Zbog aerodinamičkog profila zrak ne struji jednako s gornje i donje strane pa se javlja razlika tlakova. Strujanje zraka s gornje je brže od donje strane jer molekule zraka moraju proći dulji put. Turbine s velikim omjerom brzina na vrhu lopatica imaju mali broj isključivo tankih lopatica, koje su manje na vanjskom polumjeru nego što su na unutrašnjem. Lopatice zahtijevaju visokokvalitetnu površinu i aerodinamički oblik s visokim omjerom uzgona i otpora. Lopatice su izložene velikim naprezanjima uslijed aerodinamičkih i inercijskih sila. Takve turbine se koriste za proizvodnju električne energije. Turbine s malim omjerom brzina na vrhu lopatica imaju veći broj lopatica i to konstantne širine ili su čak šire na vanjskim polumjerima rotora nego na unutarnjim. Nema specifičnih zahtjeva glede površine lopatica i njihovog profila. Naprezanje lopatica su mala u usporedbi s turbinama s velikim omjerom brzina na vrhu

lopatica. Da bi profil lopatice preuzeo najveću snagu iz određene snage vjetra, potrebno je da bude postavljen pod optimalnim kutom α prema struji relativne brzine, kod kojeg je omjer uzgona i otpora profila optimalan. Profil lopatice je prikazan slikom 1.16.[2]



Slika 1.16 Aerodinamički profil lopatice [2]

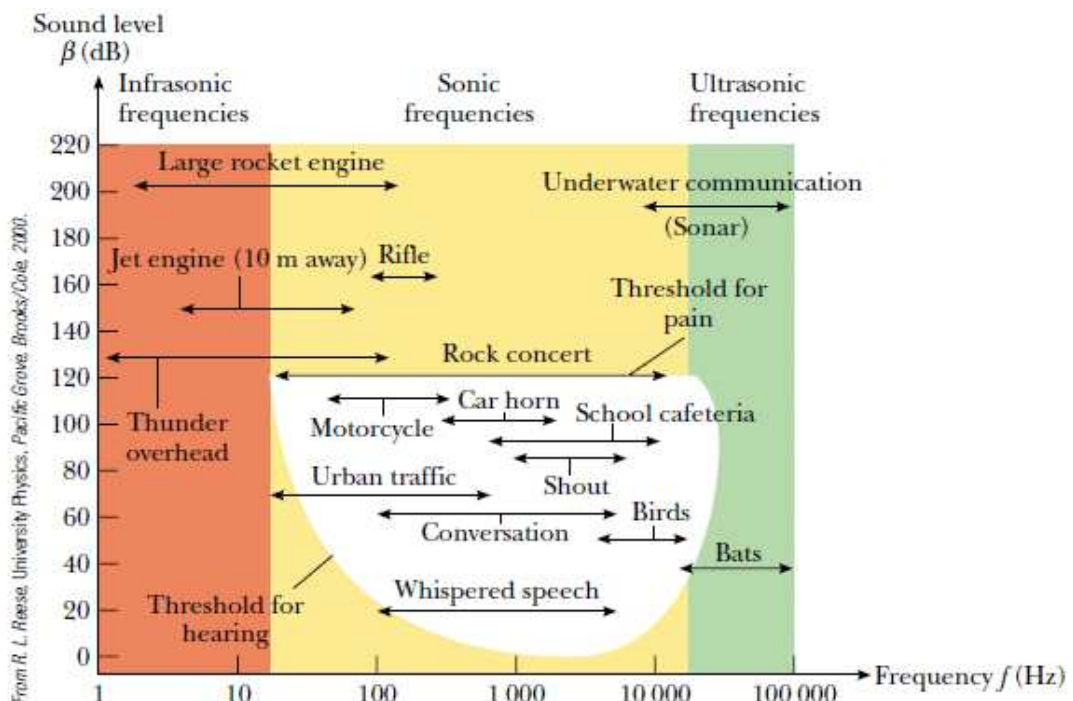
1.10. Regulacija snage vjetroagregata

Postoje dva načina upravljanja vjetroagregata – aktivna i pasivna regulacija. U pasivnoj regulaciji, lopatice vjetroturbine su podesive. Kada vjetar prekorači nazivnu brzinu, regulator za zakretanje lopatica će podesiti napadni kut i smanjiti predani moment sile. Razlika tlaka ispred i iza lopatice će se smanjiti, i time automatski i sila uzgona. Kada je brzina vjetra niža od nazivne brzine, napadni se kut održava na optimalnoj vrijednosti. Na višim brzinama, on se smanjuje smanjujući i silu uzgona. U vjetroturbinama s pasivnom regulacijom, lopatica je fiksno pričvršćena na glavinu rotora pod optimalnim (nazivnim) napadnim kutom. Kada je brzina vjetra ispod nazivne brzine, turbina može preuzeti maksimalnu snagu iz vjetra. Kada brzina vjetra prekorači nazivnu vrijednost jak vjetar može uzrokovati turbulencije na površini lopatice koja nije okrenuta prema vjetru. Kao rezultat, sila uzgona će se smanjiti i na kraju nestati s povećanjem brzine vjetra, smanjujući brzinu rotacije turbine.[2]

2. Buka vjetroagregata

Buka je definirana kao „svaki neželjeni zvuk koji izaziva neugodan osjećaj ili može nepovoljno utjecati na zdravlje.[10]“ Izvori buke su vezani uz okolinu u kojoj ljudi borave, a mogu biti linijski i točkasti. „S obzirom na karakteristike pojavljivanja zvučnih događaja u vremenu razlikujemo nepromjenjivu kontinuiranu buku, promjenjivu kontinuiranu buku, isprekidana buku i impulsnu buku.“ Osjetljivost čovjeka na buku često je subjektivna, a ovisi o akustičnim karakteristikama buke kao što su razina zvučnog tlaka, udio niskih frekvencija, udio šuma i slično. Osjetljivost čovjeka također ovisi i o glasnoći pojedinih frekvencija zvučnog izvora (frekvencijsko područje od 2 kHz do 5 kHz je najosjetljivije). Na slici 2.0 prikazano je frekvencijsko područje različitih zvučnih izvora. U slučaju vjetroagregata, buku najviše proizvodi aerodinamički rad lopatica, ali na buku utječe i rad generatora. Razina buke se mjeri u dB, a formula dana izrazom 7 glasi, gdje P_0 iznosi $20 \mu\text{Pa}$. Buka u vjetroagregatu nastaje prolaskom lopatica vjetroagregata kroz vjetar.

$$L_p = 20 \log \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (7)$$



Slika 2.0 Frekvencijsko područje pojedinih zvučnih izvora [11]

2.1. Parametri zvučnog polja

Zvučno polje je po definiciji „područje u prostoru u kojemu se širi zvučni val, a ono može biti slobodno – val širi bez refleksija, te difuzno – val se širi jednako u svim smjerovima zbog velikog broja refleksija.“

Glavni parametri zvučnog polja su:

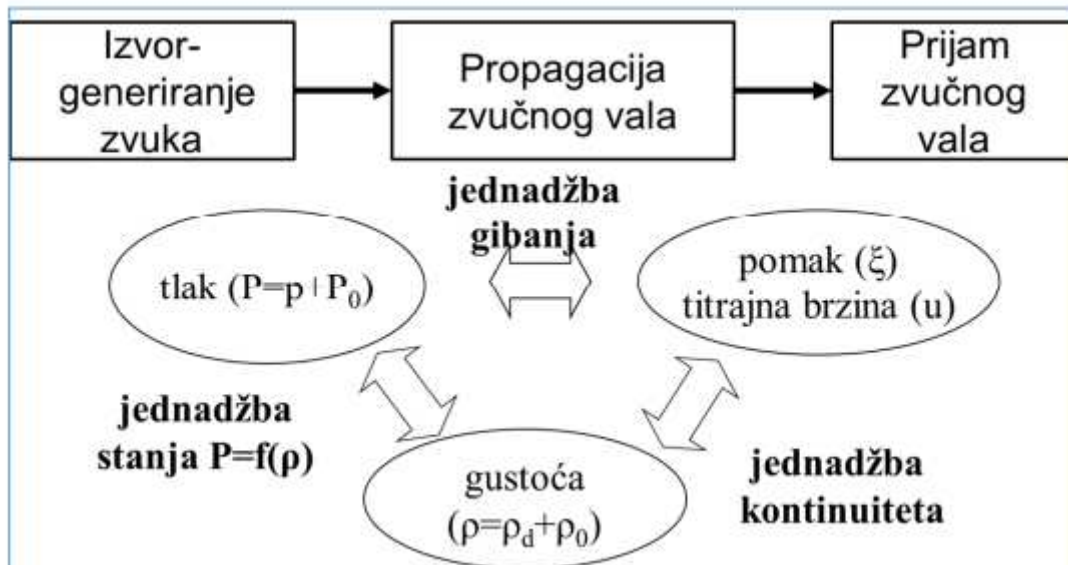
- Zvučna snaga[W ili dB referentno na 10^{-12} W]
- Zvučni tlak[Pa ili dB/dBA]
- Zvučni intenzitet[W/m² ili dB/dBA]
- Zvučna energija [J]
- ostali (statička i dinamička gustoća, pomak čestica medija, titrajna brzina "čestica medija, akceleracija).

Navedeni parametri zvučnog polja su vremenski promjenjive veličine koje ovise o pobudnoj sili koja čestice izbacuje iz ravnotežnog položaja. Pretpostavi li se da je pobudna sila izvora zvuka harmonička veličina, ona se može opisati trima sinusnim funkcija harmoničkog oscilatora za pomak i titrajnu brzinu koje su dane izrazima 8,9 i 10 gdje su X amplituda pomaka, ω kružna frekvencija, t vrijeme i φ fazni pomak. Dinamički tlak je parametar zvučnog polja koji se najjednostavnije mjeri, a osim njega može se mjeriti i intenzitet pomoću posebnih senzora koji mjere tlak i titrajnu brzinu čestice medija na osnovi lokalnih promjena temperature na mjestu mjerenja ili aproksimacije titrajne brzine iz gradijenta tlaka bliskih lokacija u zvučnom polju. Zvučni sustav se sastoji od zvučnog izvora, medija u kojem se zvučni signal širi te prijarnika zvučnog signala. Njih međusobno povezuje jednadžba stanja, gibanja i kontinuiteta (slika 2.1). Zvučni val se kroz medij širi različitim brzinama npr. u zraku njegova brzina iznosi oko 340 m/s dok u vodi iznosi 1500 m/s.[10]

$$\varepsilon(t) = X * \sin * (\omega t + \varphi) \quad (8)$$

$$u(t) = X * \omega * \cos(\omega t + \varphi) \quad (9)$$

$$a(t) = -X * \omega^2 * \sin(\omega t + \varphi) \quad (10)$$



Slika 2.1 Zvučni sustav i povezanost parametara zvučnog polja

2.2. Ocjenjska razina buke

Ocjenjska razina buke se dobije dodavanjem eventualnih prilagođenja (tonalno prilagođenje ili impulsno prilagođenje) na izmjerenu ili modeliranu razinu buke. Ocjenjska vrijednost se uspoređuje s vrijednostima prema pravilniku [13] koji propisuje najviše dopuštene razine buke s obzirom na vrstu izvora buke, vrijeme i mjesto nastanka. Vrijednosti prikazane na slici 2.2 odnose se na ukupnu razinu buke imisije od svih postojećih i planiranih izvora buke zajedno. Prema članku 5, „pravilnik govori da za područja u kojima je postojeća razina rezidualne buke jednaka ili viša od dopuštene razine tada novi izvor ne smije prelaziti za 5 dB umanjenu vrijednost u toj zoni, a ako je postojeća razina rezidualne buke niža od dopuštene razine onda novoinstalirani izvor ne smije povećati postojeću razinu buke za 1 dB“ kao što je prikazano slikom 2.2.

Zona buke	Namjena prostora	Najviše dopuštene ocjenske razine buke $L_{R,Acq}$ / dB(A)			
		L_{day}	$L_{evening}$	L_{night}	L_{den}
1.	Zona zaštićenih tihih područja namijenjena odmoru i oporavku uključujući nacionalni park, posebni rezervat, park prirode, regionalni park, spomenik prirode, značajni krajobraz, park-šuma, spomenik parkovne arhitekture, tiha područja izvan naseljenog područja	50	45	40	50
2.	Zona namijenjena stalnom stanovanju i/ili boravku, tiha područja unutar naseljenog područja	55	55	40	56
3.	Zona mješovite, pretežito stambene namjene	55	55	45	57
4.	Zona mješovite, pretežito poslovne namjene sa stanovanjem, sa povremenim stanovanjem, pretežito poljoprivredna gospodarstva	65	65	50	66
5.	Zona gospodarske namjene pretežito zanatske. Zona poslovne pretežito uslužne, trgovačke te trgovačke ili komunalno-servisne namjene. Zona ugostiteljsko turističke namjene uključujući hotele, turističko naselje, kamp, ugostiteljski pojedinačni objekti s pratećim sadržajima. Zona sportsko rekreacijske namjene na kopnu uključujući golf igralište, jahački centar, hipodrom, centar za zimske sportove, teniski centar, sportski centar – kupališta. Zona sportsko rekreacijske namjene na moru i rijekama uključujući uređena kupališta, centre za vodene sportove. Zona luka nautičkog turizma uključujući sidrište, odlagalište plovnih objekata, suha marina, marina.	65	65	55	67
6.	Zona gospodarske namjene pretežito proizvodne industrijske djelatnosti. Zona morskih luka državnog značaja na bitne djelatnosti, zone morskih luka osobitog međunarodnog gospodarskog značaja, zone morskih luka županijskog značaja. Zona riječnih luka od državnog i županijskog značaja.	Razina buke koja potječe od izvora buke unutar ove zone a na granici s najbližom zonom 1, 2, 3 ili 4 u kojoj se očekuju najviše imisijske razine buke, buka ne smije prelaziti dopuštene razine buke na granici zone 1, 2, 3 ili 4.			

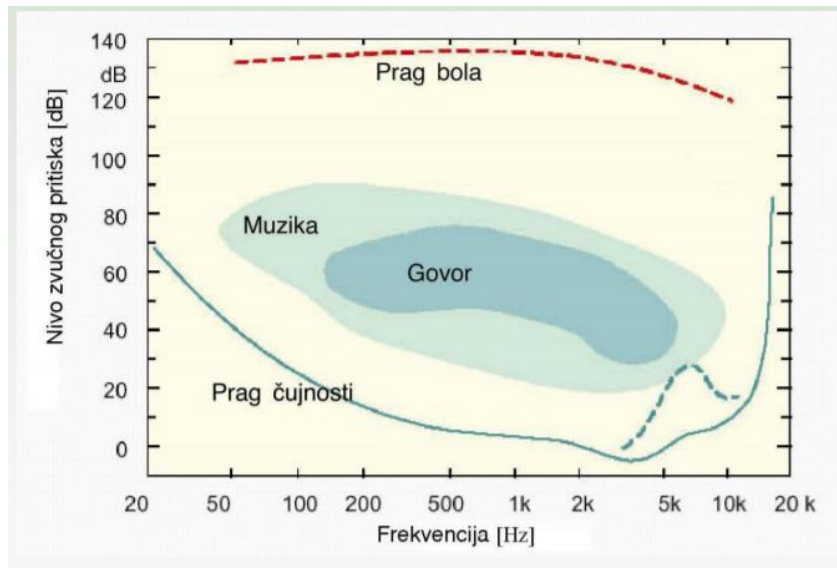
Slika 2.2 Ocjenska razina buke po zonama [13]

2.3. Veza zvučnog tlaka i zvučne snage

Zvučni tlak se računa prema izrazu 11, ako je poznata zvučna snaga, poznato okruženje izvora, ako pretpostavimo da je izvor mali u odnosu na udaljenost na kojoj se promatra te ako se izvor zvučne snage nalazi na otvorenome.

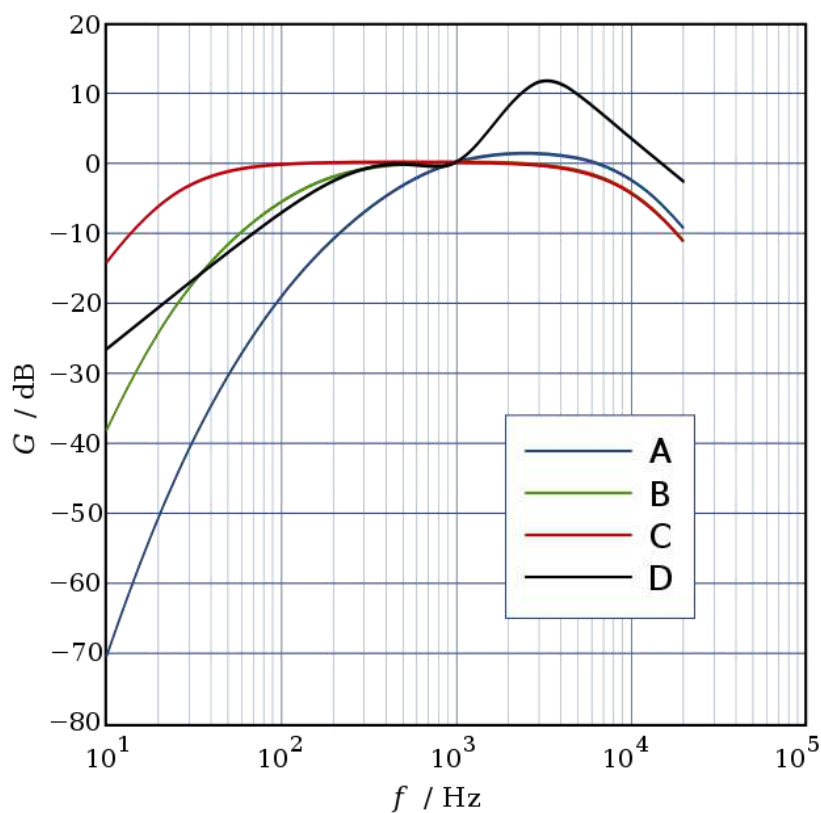
$$L_p = L_W + 10 \cdot \log \left(\frac{Q}{4 \cdot r^2 \cdot \pi} \right) + C \quad (11)$$

Q je „faktor usmjerenosti izvora koji ovisi o tome nalazi se točkasti izvor u potpuno slobodnome polju ili je okružen refleksijskim ploham“, dok je korekcija C u izrazu zbog temperaturnih uvjeta (u praksi zanemariva). Na većim udaljenostima se dodaje prigušenje koje ovisi o frekvenciji tj. karakteristikama medija u kojemu se zvuk širi.



Slika 2.3 Ovisnost praga čujnosti o frekvenciji te frekvencijska područja govora, glazbe.[14]

A-vrednovana frekvencijska karakteristika prikazana na slici 2.4 se dobije inverzijom krivulje praga čujnosti prema slici 2.3 te prikazuje vrijednost bližu onome kako čuje ljudsko uho.



Slika 2.4 A,B,C i D-vrednovane krivulje[15]

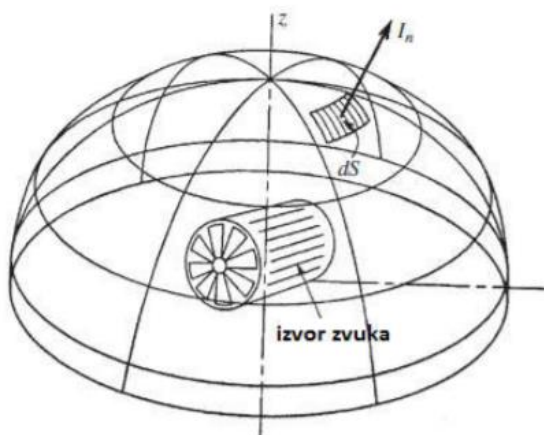
2.4. Zvučna snaga

Zvučna snaga je veličina koja određuje razinu zvučnog tlaka nekog izvora u prostoru. Izražava se u decibelima kao A-vrednovana vrijednost, Z(ero)-vrednovana vrijednost ili po frekvencijskim pojasima od interesa. “Ako zvučna snaga izvora nije poznata, određujemo ju tako da izmjerimo tlak na paralelepipedu ili površini oko njega, iz toga pod pretpostavkom da se na svim frekvencijama ravni val širi od izvora, izračunamo zvučni intenzitet I_n te ga pomnožimo površinom mjerne plohe S_n . Snaga zvučnog izvora definirana je izrazom 12.”[17]

$$W = \oiint I \cdot dS = \sum I_n \cdot S_n \quad (12)$$

Pod pretpostavkom da je zvučni intenzitet jednak zvučnome tlaku, zvučna snaga je dana izrazom 13, gdje su L_p usrednjena razina zvučnog tlaka, S površina i S_0 referentna površina (1m^2). Slika 2.5 prikazuje određivanje zvučne snage iz izmjerenog tlaka.

$$L_w = \overline{L_p} + 10 \cdot \log \left(\frac{S}{S_0} \right) \quad (13)$$



Slika 2.5 Određivanje zvučne snage uz pomoć zvučnog tlaka[10]

2.4.1. Zvučna snaga vjetroagregata

Porastom brzine puhanja vjetra, raste i razina zvučne snage koju vjetroagregat proizvodi. Na slici 2.6 prikazana je ovisnost brzine puhanja vjetra i zvučne snage za način rada 0 vjetroagregata.

Mode0										
Frequency	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
31	68.6	71.1	74.1	78.2	78.6	78.8	78.8	78.8	78.8	78.8
63	78.6	81.1	84.1	88.2	88.6	88.9	88.9	88.9	88.9	88.9
125	85.2	87.7	90.7	94.8	95.1	95.1	95.1	95.1	95.1	95.1
250	88.1	90.6	94.4	98.5	98.8	98.8	98.8	98.8	98.8	98.8
500	89.1	91.6	96.5	100.6	100.9	101.4	101.4	101.4	101.4	101.4
1000	89.5	92	97.8	101.9	102.2	102.1	102.1	102.1	102.1	102.1
2000	87.7	90.2	95.9	100	100.4	99.6	99.6	99.6	99.6	99.6
4000	82	84.5	86.3	90.4	90.8	92	92	92	92	92
8000	72.8	75.3	78.4	82.5	82.9	84	84	84	84	84
Total power	95.5	98	102.8	106.9	107.2	107.2	107.2	107.2	107.2	107.2

Mod5										
Frequency	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
31	68.6	71.1	74.1	76.3	76.4	76.6	76.6	76.6	76.6	76.6
63	78.6	81.1	84.1	86.3	86.4	86.7	86.7	86.7	86.7	86.7
125	85.2	87.7	90.7	92.9	92.9	92.9	92.9	92.9	92.9	92.9
250	88.1	90.6	94.4	96.6	96.6	96.6	96.6	96.6	96.6	96.6
500	89.1	91.6	96.5	98.7	98.7	99.2	99.2	99.2	99.2	99.2
1000	89.5	92	97.8	100	100	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9
2000	87.7	90.2	95.9	98.1	98.2	97.4	97.4	97.4	97.4	97.4
4000	82	84.5	86.3	88.5	88.6	89.8	89.8	89.8	89.8	89.8
8000	72.8	75.3	78.4	80.6	80.7	81.8	81.8	81.8	81.8	81.8
Total power	95.5	98	102.8	105	105	105	105	105	105	105

Mod18										
Frequency	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
31	68.6	69.7	68.2	68.3	68.7	68.6	68.6	68.6	68.6	68.6
63	78.6	79.7	78.2	78.3	78.8	78.7	78.7	78.7	78.7	78.7
125	85.2	86.3	84.8	84.9	84.9	84.9	84.9	84.9	84.9	84.9
250	88.1	89.2	88.5	88.6	88.6	88.6	88.6	88.6	88.6	88.6
500	89.1	90.2	90.6	90.7	91.2	91.2	91.2	91.2	91.2	91.2
1000	89.5	90.6	91.9	92	91.9	91.9	91.9	91.9	91.9	91.9
2000	87.7	88.8	90	90.1	89.4	89.4	89.4	89.4	89.4	89.4
4000	82	83.1	80.4	80.5	81.9	81.8	81.8	81.8	81.8	81.8
8000	72.8	73.9	72.5	72.6	73.8	73.8	73.8	73.8	73.8	73.8
Total power	95.5	96.6	96.9	97	97	97	97	97	97	97

Slika 2.6 Usporedba zvučne snage (dBA) za različite brzine vjetra i za načine rada 0, 5 i 18 vjetroatregata

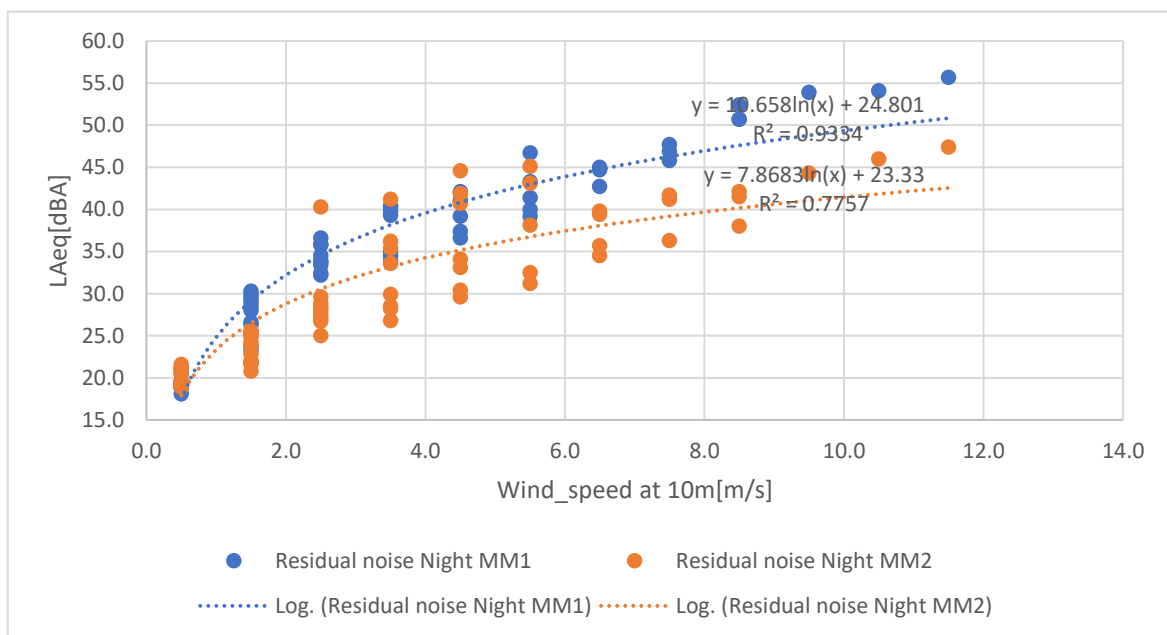
2.5. Rezidualna buka vjetroatregata

Povećavanjem brzine vjetra (na 10 m visine) na lokacijama udaljenim od autocesta ili nekih drugih prometnica povećava se i rezidualna buka zbog aerodinamičkog šuma oko objekata. Problem izrade tablice rezidualne buke je prikupljanje dovoljno uzoraka zbog neučestalosti pojedinih smjerova i brzina koje nisu zastupljeni kod mjerenja. Primjer tablice

s mjerenjima rezidualne buke ovisno o različitim smjerovima vjetra i brzinama dan je u tablici 1, a slikom 2.7 prikazana je ovisnost rezidualne buke vjetroagregata o brzini puhanja vjetra.

Brzina vjetra m/s	Smjer vjetra / °											
	0-29	30-59	60-89	90-119	120-149	150-179	180-209	210-239	240-269	270-299	300-329	330-359
1	27,3*	27,5*	27,4	27,4	27,3*	27,9*	27,6	27,3	26,5*	26,4*	26,8*	27,2*
2	27,8	27,5	28,4	28,4	27,5	27,8	28,2	28,1	27,5	27,8	28,2	28
3	30,2	29,2	29,9	30,5	30,3	29,5	30,3	29,9	29,9	30,7	30,6	30,2
4	34,2	34,1	35,3	35,7	35,4	34,9	35,2	35	34,4	35,6	35,4	35,4
5	38,7	35,1*	41,3	41,6	41,2	36,3	37,4	37,7	38,7	40	41,3	41,3
6	39,3	35,2*	44,8*	44	42,8	39,4*	39,9	40,3	40,6	42,7*	46,1	45,2
7	41,1*	-	45,6*	46,2	46,1*	45,8*	44,4*	44,4	43,8*	44,4*	48,4	48,2
8	54,5*	-	54,0*	52,8	56,1*	-	51,7*	46,4*	42,5*	51,9*	54,2	53,7
9	57,4*	-	56,7*	56,1	56,2*	-	-	44,8*	-	56,4*	56,0*	56,5
10	61,0*	-	-	56,1*	-	-	-	-	-	59,8*	59,9*	58,7
11	63,0*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	60,4*	59,6
12	64,8*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	60,9*
13	65,1*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	63,8*
14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tablica 1. Rezidualna buka na 10 m visine u ruralnim krajevima u ovisnosti o brzini i smjeru vjetra (prikaz u binovima), daleko od autoceste (* označava mali broj uzoraka)



Slika 2.7 Ovisnost rezidualne buke o brzini puhanja vjetra za sve prikupljene smjerove vjetra

2.6. Načini rada vjetroagregata

Modovi vjetroagregata određuju brzinu i snagu koju vjetroagregat proizvodi. Modovi se najčešće kreću od 0 do 18 iako različite vrste vjetroagregata nemaju pristup svim

modovima (slika 2.8), a uporabom viših modova se smanjuje zvučna snaga, ali se smanjuje i količina proizvedene električne energije. Modovi vjetroagregata te njihove pripadne zvučne snage u dBA su prikazani slikom 2.9.

Brzina vjetra na visini „hub-a“ se procjenjuje korištenjem izraza 14 i koristi se u izračunu razina zvučnog tlaka pri različitim brzinama vjetra gdje je z_0 „roughness“ parametar prema „Harmonoise“ modelu s $z_0=0.05$ (usporedba izmjerenih brzina na različitim visinama). U_0 (m/s) je brzina vjetra na visini $h_0=10m$.

$$U(h) = \frac{\log_e\left(\frac{h}{z_0} + 1\right)}{\log_e\left(\frac{h_0}{z_0} + 1\right)} \quad (14)$$

operating mode	rated power [kW]	available hub heights [m]					
		108	118	120	148	159	164
Mode 0	5700	●	●	●	●	●	●
Mode 1	5600	●	●	●	●	●	●
Mode 2	5500	●	●	●	●	●	●
Mode 3	5400	●	●	●	●	●	●
Mode 4	5270	●	●	●	●	●	●
Mode 5	5150	●	●	●	●	●	●
Mode 6	5040	●	●	●	–	●	●
Mode 7	4930	●	●	●	–	–	●
Mode 8	4810	○	○	○	–	–	○
Mode 9	4700	○	○	○	–	–	○
Mode 10	4290	○	○	○	○	○	○
Mode 11	4170	○	○	○	○	○	○
Mode 12	3990	●	●	●	●	●	●
Mode 13	3700	●	●	●	●	●	●
Mode 14	3450	●	●	–	●	●	●
Mode 15	3200	●	●	–	●	●	●
Mode 16	2980	●	●	–	●	●	●
Mode 17	2800	●	●	–	●	●	●
Mode 18	2580	●	●	–	●	●	●

● mode available
 ○ mode on request
 – mode not available

Slika 2.8 Različiti modovi vjetroagregata te ovisnost dostupnosti moda o visini „hub-a“ [18]

v	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SoundPowerMode0	95.5	98	102.8	106.9	107.2	107.2	107.2	107.2	107.2	107.2
SoundPowerMode1	95.5	98	102.8	106.8	106.8	106.8	106.8	106.8	106.8	106.8
SoundPowerMode2	95.5	98	102.8	106.4	106.4	106.4	106.4	106.4	106.4	106.4
SoundPowerMode3	95.5	98	102.8	106	106	106	106	106	106	106
SoundPowerMode4	95.5	98	102.8	105.5	105.5	105.5	105.5	105.5	105.5	105.5
SoundPowerMode5	95.5	98	102.8	105	105	105	105	105	105	105
SoundPowerMode6	95.5	98	102.8	104.5	104.5	104.5	104.5	104.5	104.5	104.5
SoundPowerMode7	95.5	98	102.8	104	104	104	104	104	104	104
SoundPowerMode8										
SoundPowerMode9										
SoundPowerMode10										
SoundPowerMode11										
SoundPowerMode12	95.5	98	99.7	100	100	100	100	100	100	100
SoundPowerMode13	95.5	98	99.2	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5	99.5
SoundPowerMode14	95.5	97.9	98.7	99	99	99	99	99	99	99
SoundPowerMode15	95.5	97.7	98.3	98.5	98.5	98.5	98.5	98.5	98.5	98.5
SoundPowerMode16	95.5	97.4	97.8	98	98	98	98	98	98	98
SoundPowerMode17	95.5	97	97.4	97.5	97.5	97.5	97.5	97.5	97.5	97.5
SoundPowerMode18	95.5	96.6	96.9	97	97	97	97	97	97	97

Slika 2.9 Načini rada vjetroagregata i pripadne zvučne snage u dBA u ovisnosti o brzini (m/s) na 10 m visine. Na visini „hub-a“ se proračunava brzina

3. Metode mjerenja i modeliranja rezidualne buke i buke vjetroagregata

3.1. Zvukomjer

„Zvukomjer (slika 3.1) je uređaj koji se koristi za mjerenje buke tj. mjerenje razine zvučnog tlaka nekog izvora i njegove frekvencijske raspodjele. Zvukomjer se sastoji od mikrofona, pojačala, filtera, zaslona, digitalnih i analognih izlaza te sučelja za povezivanje na računalo.[16]“ Zvukomjer usrednjava kvadrat vrijednosti zvučnog tlaka te ga prikazuje u dB. Vrijednost tlaka koju zvukomjer prikazuje može se izračunati izrazom 15.

$$L_{eq} = 10 \log \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \right] * \int_{t_1}^{t_2} \frac{p(t)^2}{p_{ef0}^2} dt \quad (15)$$

Vremenska konstanta integracije ovisi o vrsti zvučnog podražaja, a dijeli se na brzu (115 ms), sporu (1 s), i impulsnu (35 ms). Za kalibraciju uređaja koristi se umjerivač, a u današnje dobe postoji i digitalan oblik zvukomjera.



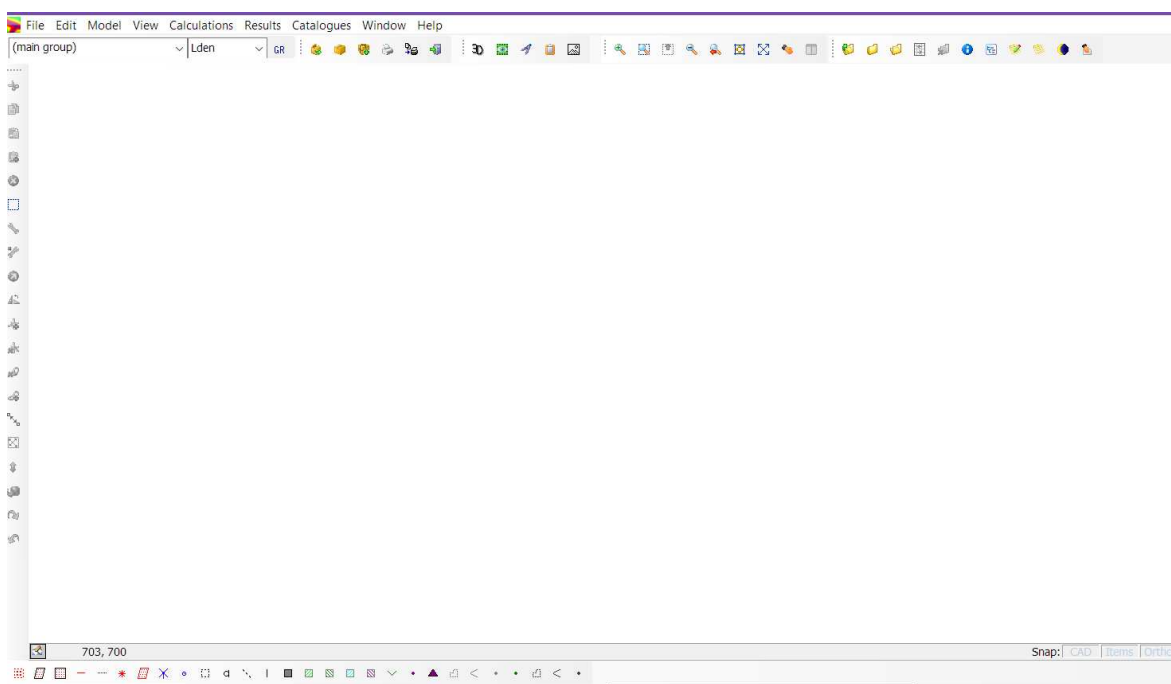
Sl. 3.1 Zvukomjer [16]

3.2. Metode modeliranja buke

Postoji više načina modeliranja i proračuna buke, a jedan od načina je Predictor-LimA u kojemu su implementirane različite metode proračuna. (ISO 9613-2, EU-CNOSSOS, NMPB, Harmonoise...)

3.2.1. Predictor-LimA

Predictor-LimA V2022.1 je programski alat tvrtke DGMR Software za proračun industrijske buke u okolišu, a njegovi izračuni se temelje na metodi ISO 9613.1/2 te po preporukama novog standarda kvalitete ISO 17534. Predictor-LimA prikazuje model buke u 2D, no ima i podršku za 3D i “Street View”. Prednosti programa su brza instalacija te jednostavnost korištenja. DGMR Software također proizvodi i programske alate iNoise i NoiseAtWork koji također služe za proračun i modeliranje buke.

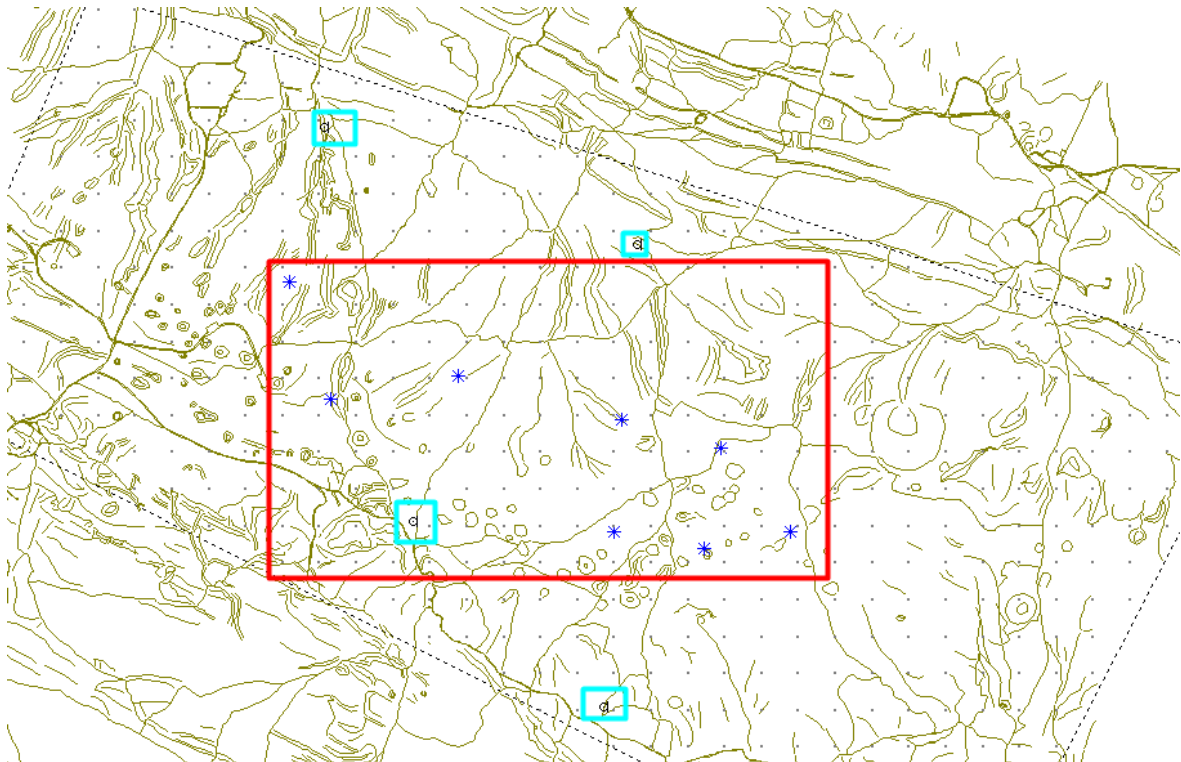


Slika 3.2. Sučelje programskog alata Predictor-LimA

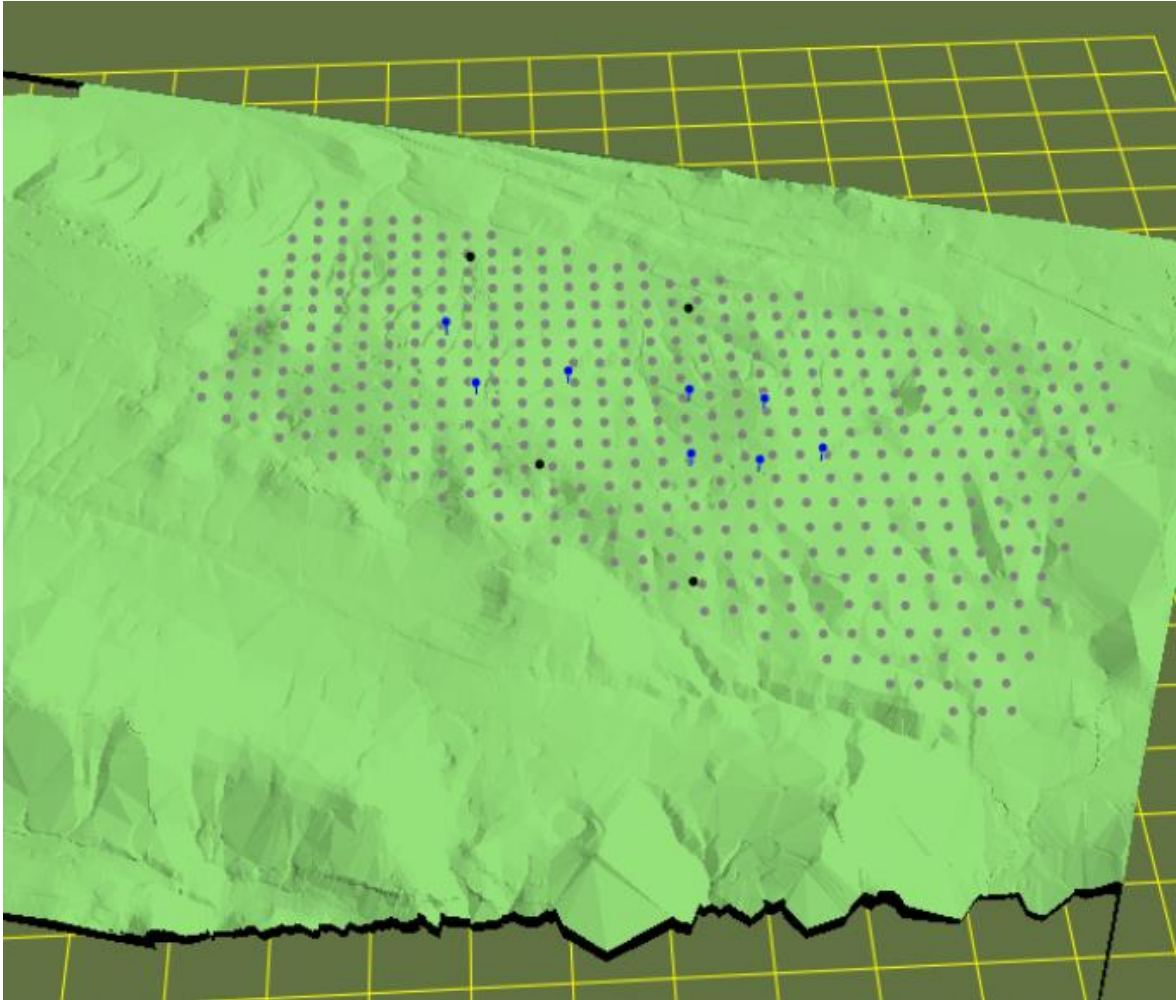
4. Rezultati mjerenja i modeliranja buke vjetroagregata

4.1. Model buke vjetroagregata

U simulacijskom dijelu modela promatramo Predictor-LimA grid u kojemu su postavljeni sedam vjetroagregata i četiri kontrolne točke na proizvoljnoj lokaciji. Svi vjetroagregati imaju brzinu uključivanja tj. „cut-in“ brzinu koja iznosi 2 m/s te brzinu isključivanja tj. „cut-out“ brzinu koja iznosi 20 m/s. Simulacijski model reljefa, sedam vjetroagregata i četiri kontrolne točke je prikazan slikom 4.1, a na slici su crvenom bojom uokvireni vjetroagregati te plavom bojom označene kontrolne točke tj. „receiveri“. Kontrolne točke u modelu su postavljene na određenim lokacijama na visini od 4 m te one prikupljaju podatke o iznosu zvučne snage buke. Visina svakog vjetroagregata iznosi 118 m. Slikom 4.2 prikazan je 3-D prikaz simulacijskog modela.



Slika 4.1 Simulacijski model reljefa sa sedam vjetroagregata postavljenih na vrhove brda



Slika 4.2 3-D prikaz simulacijskog modela reljefa sa sedam vjetroagregata postavljenih na vrhove brda

4.2. Postavke proračuna modela buke vjetroagregata

Prije nego se krene sa PredictorLIMA proračunom, moraju se postaviti ulazni parametri u postavkama.

4.2.1. Klasa stabilnosti i paramteri propagacije

Klase stabilnosti atmosfere su definirane slovima A-G (slika 4.3), a one ovise o solarnom zračenju te razdoblju dana, večeri noći. Oblačnost se iskazuje u oktama (potpuno oblačno 8/8 a vedro 0/8). Ove podatke je teško prikupiti tijekom mjerenja jer se dinamički mijenjaju ali uzima se neka prosječna vrijednost oblačnosti u intervalu mjerenja kao i prosječne vrijednosti drugih parametara (temperature, vlage, atmosferskog tlaka). Odabrana je klasa stabilnosti D jer je prisutna velika insolacija.

Table 5.9 CONCAWE determination of Pasquill stability category from meteorological information (full cloud cover is 8 octas, half cloud cover is 4 octas, etc.). After Marsh (1982)

Wind speed ^a m/s	Day-time incoming solar radiation			Over-cast	1 hour before sunset or after sunrise	Night-time cloud cover (octas)		
	slight	moderate	strong			0-3	4-7	8
< 2	A	A-B	B	C	D	F or G ^b	F	D
2.0-2.5	A-B	B	C	C	D	F	E	D
3.0-4.5	B	B-C	C	C	D	E	D	D
5.0-6.0	C	C-D	D	D	D	D	D	D
> 6.0	D	D	D	D	D	D	D	D

^a Wind speed is measured to the nearest 0.5 m/s and is measured close to the ground.

^b Category G is restricted to night-time with less than 1 octa of cloud and a wind speed less than 0.5 m/s.

Slika 4.3 Klase stabilnosti

Air absorption									
Temperature [K]	283,15								
Pressure [kPa]	98,60								
Air humidity [%]	56,70								
Frequency [Hz]	31	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Air absorption [dB/km]	0,04	0,15	0,46	1,05	1,89	3,95	11,57	40,58	140,14

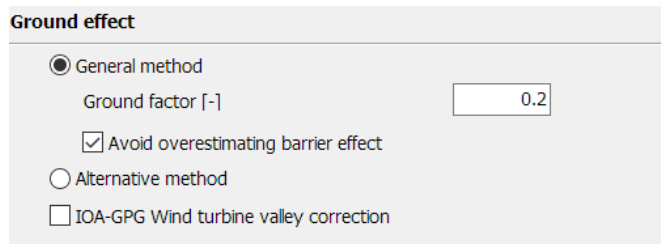
Slika 4.4 Parametri propagacije

Stability class	D
Wind direction [°]	A
Wind speed [m/s]	B
	C
	D
	E
	F
	G

Slika 4.5 Odabiri klase stabilnosti u simulaciji

4.2.2. Utjecaj tla

Utjecaj tla na apsorpciju buke za ovo područje iznosi 0.2 jer se radi o kamenjaru. (faktor u iznosu od 1 označava potpunu apsorpciju buke u tlu, a 0 označava potpunu refleksiju.)



Ground effect

General method

Ground factor [-]

Avoid overestimating barrier effect

Alternative method

IOA-GPG Wind turbine valley correction

Slika 4.6 Utjecaj tla

4.2.3. Cilj modeliranja buke vjetroagregata

Ciljevi izrade ovoga modela buke su:

- odrediti razine buke novih vjetroagregata u odnosu na rezidualnu buku te vidjeti koliko se ukupna razina buke povećala.
- odabrati mod rada vjetroagregata ovisno o prekoračenju po smjeru i brzini tako da je zadovoljen uvjet buke (+1 dBA od rezidualne buke ili manje stroži kriterij zona buke) te da je zadovoljena proizvodnja električne energije

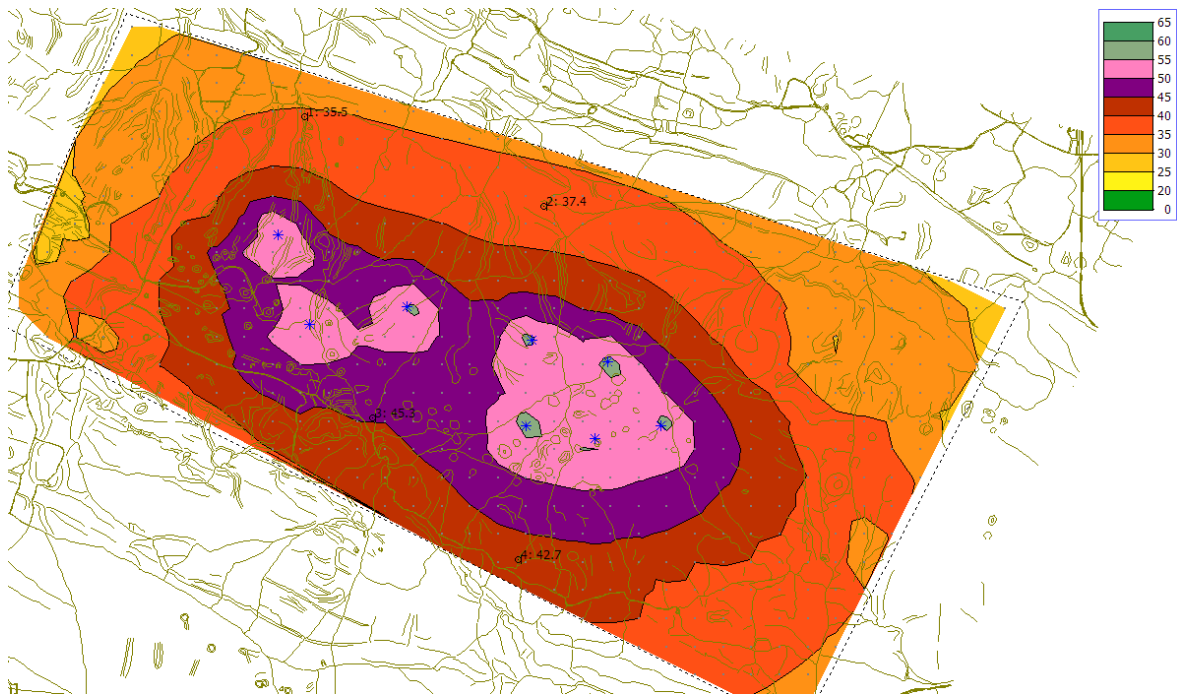
4.3. Rezultati proračuna buke vjetroagregata

4.3.1. Rezultati proračuna buke za mod 0

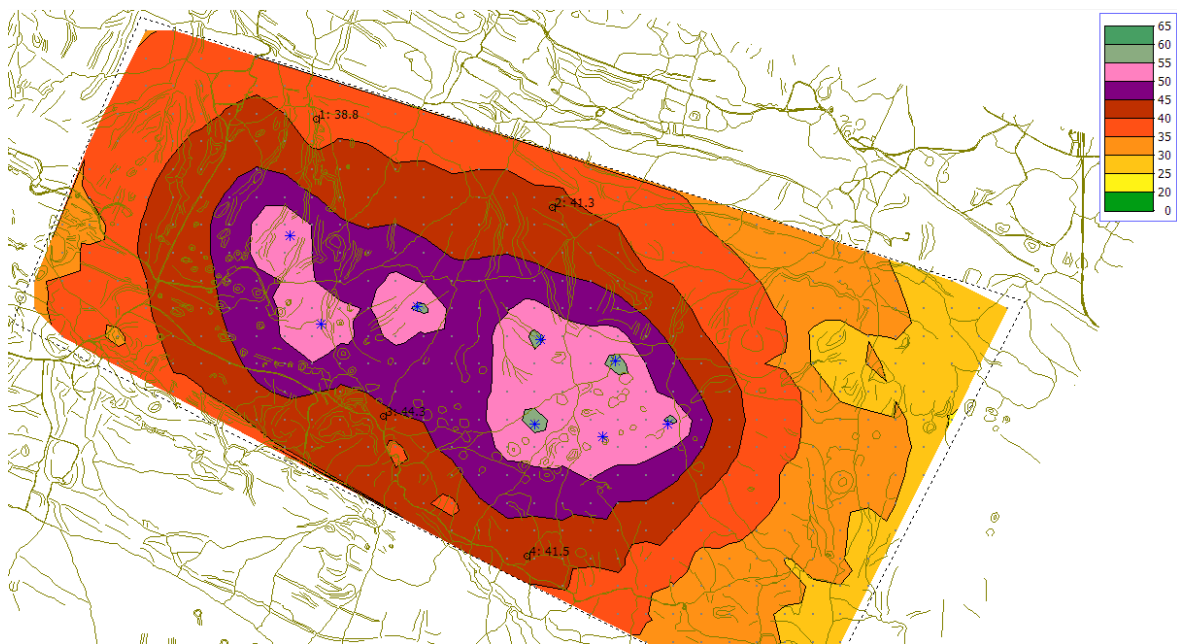
Nakon što su postavljeni svi parametri, napravila su se dva modela za koje se izvršio proračun za kuteve vjetra 0°, 90° i 180° (jugo, bura, bočni vjetar) i 270° te brzine vjetra 3 m/s i 8 m/s. Modeli proračuna buke za brzinu od 3 m/s su prikazani slikama 4.4, 4.5, 4.6 i 4.7, a modeli proračuna buke za brzinu od 8 m/s su prikazani slikama 4.8, 4.9, 4.10 i 4.11. Svi vjetroagregati rade u načinu rada 0.

4.3.1.1 Model 0_3

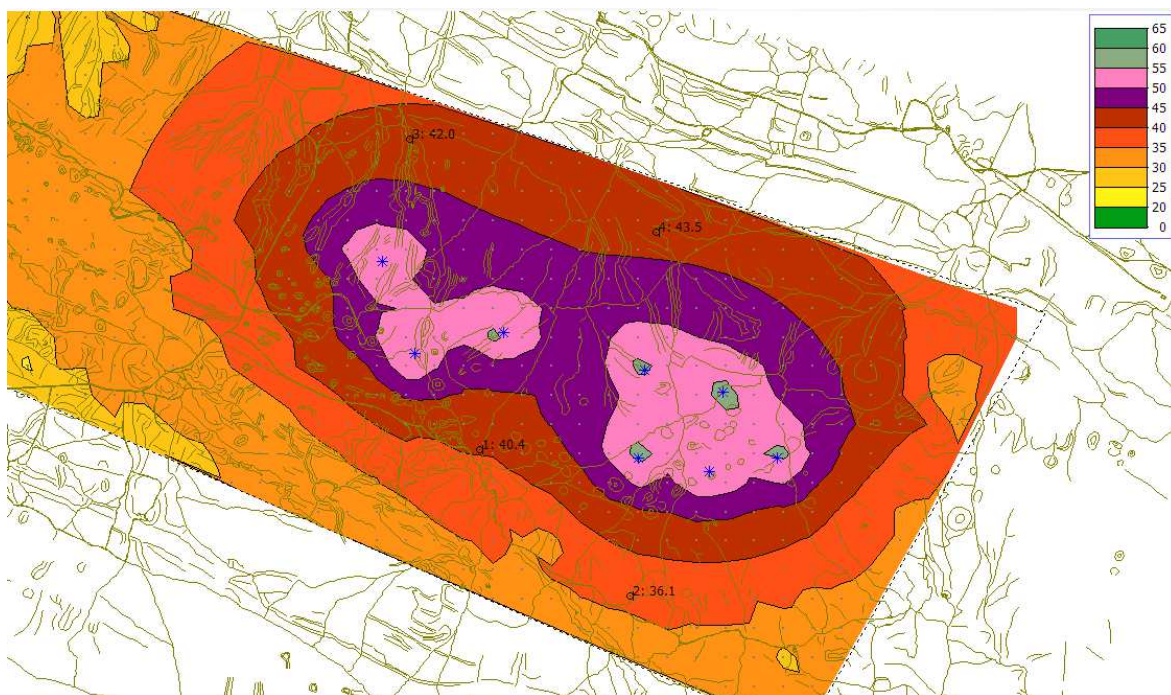
Model 0_3 prikazuje skupinu vjetroagregata u **načinu rada (mod) 0** s brzinom puhanja vjetra od **3 m/s** i za kuteve vjetra 0°, 90°, 180° i 270°. Iz slika 4.7, 4.8, 4.9 i 4.10 je vidljivo da se razina buka povećava na onu stranu na koju vjetra puše. Tablicom 2 prikazane su zvučne snage buke zabilježene na četiri različite kontrolne točke.



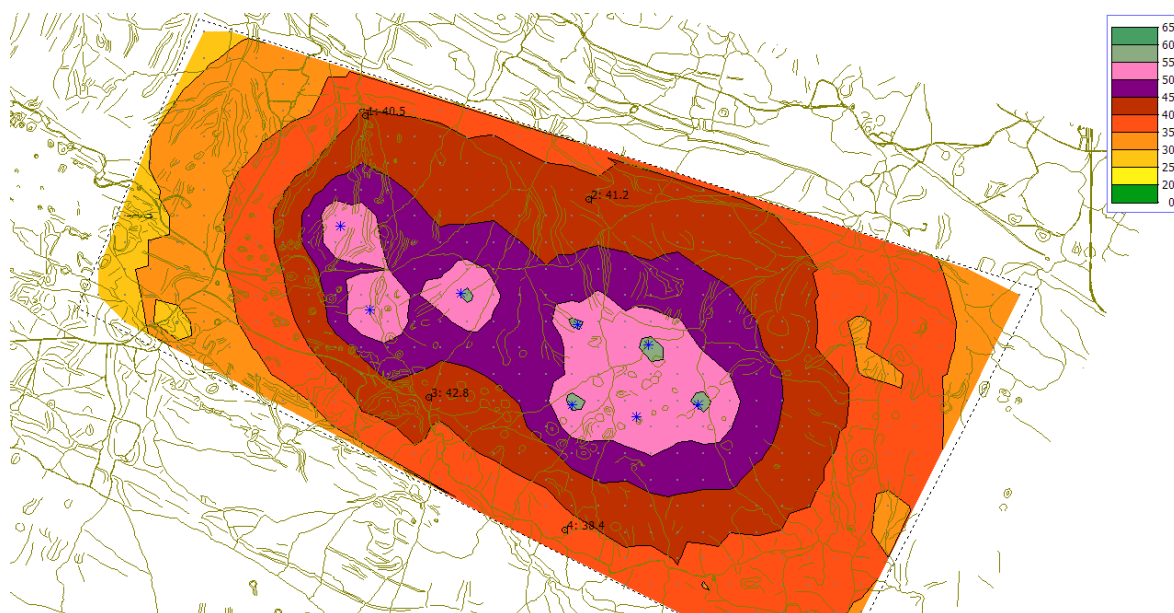
Slika 4.7 Model 0_3 za smjer puhanja vjetra od 0°



Slika 4.8 Model 0_3 za smjer puhanja vjetra od 90°



Slika 4.9 Model 0_3 za smjer puhanja vjetra od 180°



Slika 4.10 Model 0_3 za smjer puha vjetra od 270°

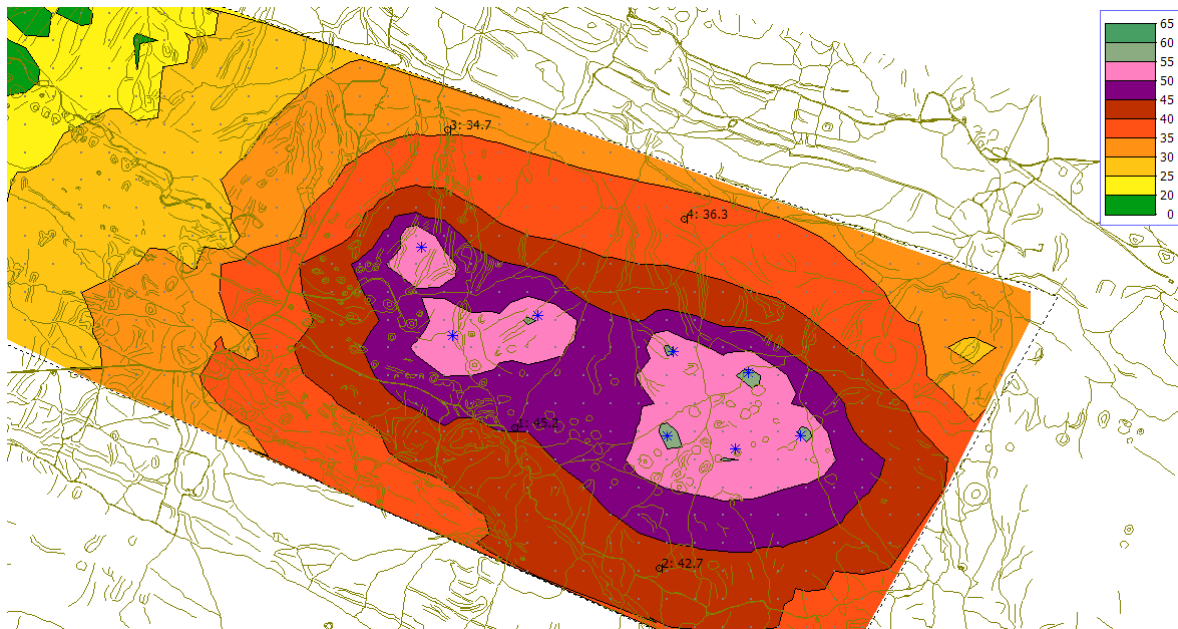
Model 0_3	Zvučna snaga za kut 0° [dBA]	Zvučna snaga za kut 90° [dBA]	Zvučna snaga za kut 180° [dBA]	Zvučna snaga za kut 270° [dBA]
Receiver 1	35.5	38.8	42.0	40.5

Receiver 2	37.4	41.3	43.6	41.2
Receiver 3	45.3	44.3	40.4	42.8
Receiver 4	42.7	41.5	36.1	38.4

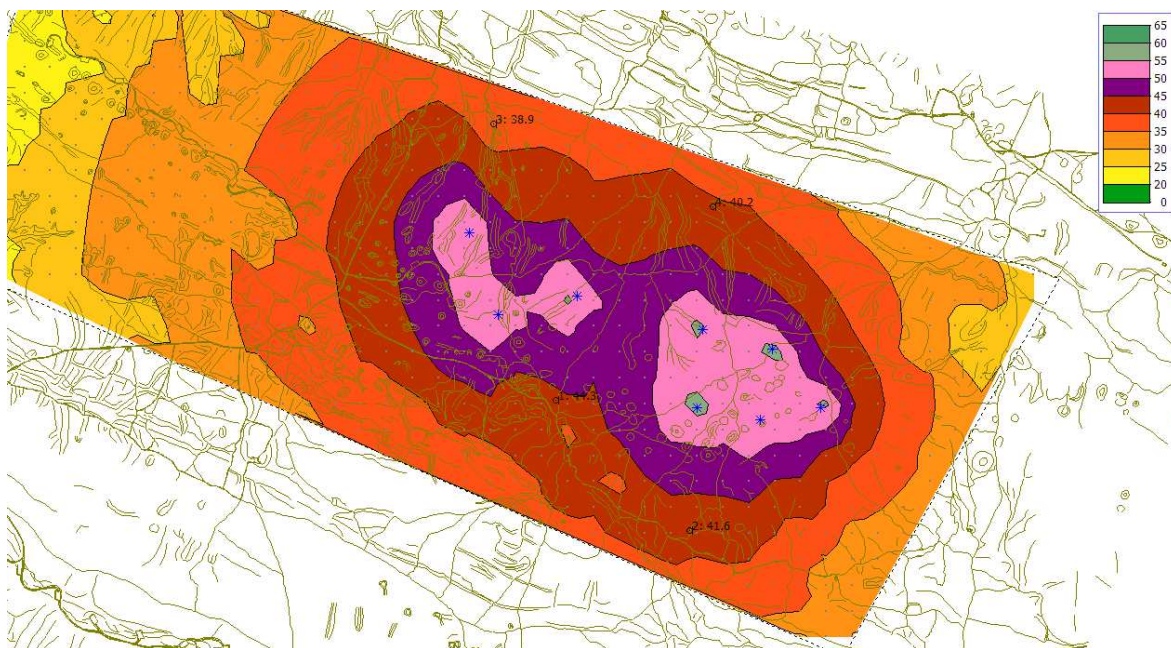
Tablica 2. Zvučna snaga buke modela 0_3

4.3.1.2 Model 0_8

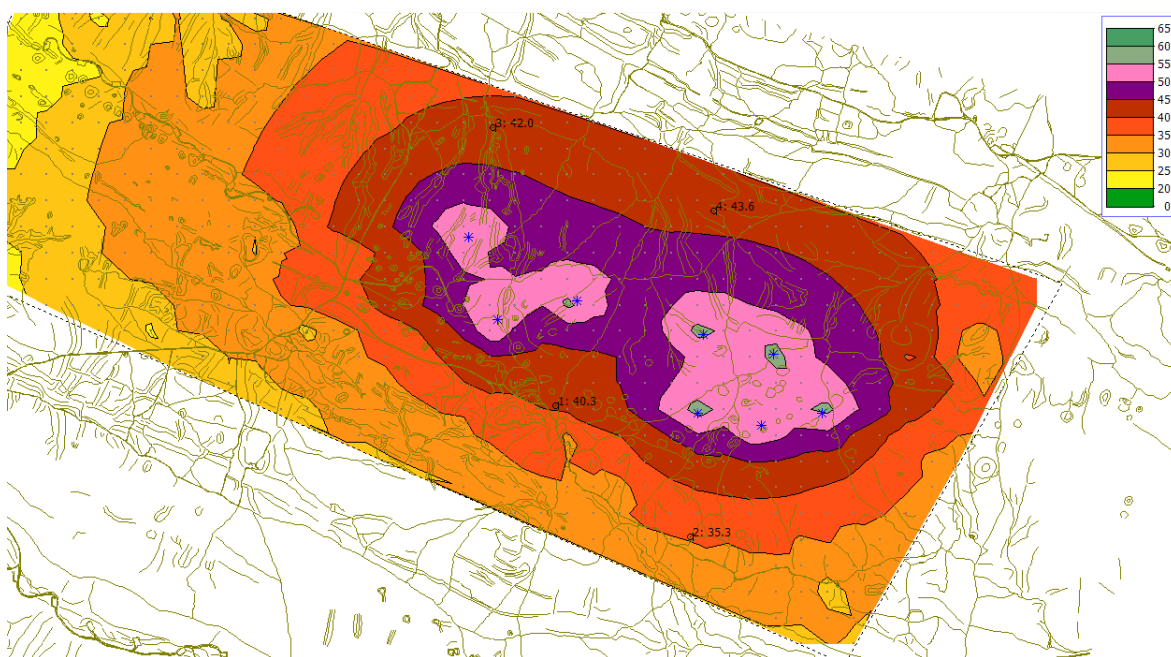
Model 0_8 prikazuje skupinu vjetroagregata **u načinu rada (mod) 0** s brzinom puhanja vjetra od **8 m/s** i za kuteve vjetra 0°, 90°, 180° i 270° (slike 4.11, 4.12, 4.13 i 4.14). Tablicom 3 prikazane su zvučne snage buke zabilježene na četiri kontrolne točke.



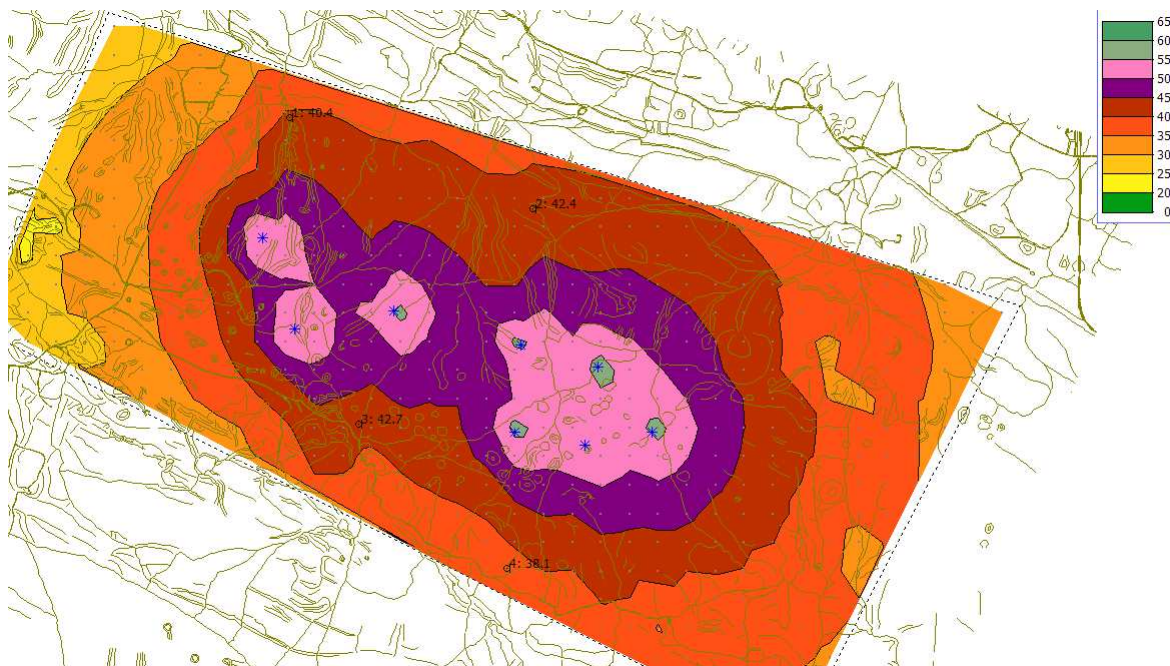
Slika 4.11 Model 0_8 za smjer puhanja vjetra od 0°



Slika 4.12 Model 0_8 za smjer puhanja vjetroa od 90°



Slika 4.13 Model 0_8 za smjer puhanja vjetroa od 180°



Slika 4.14 Model 0_8 za smjer puhanja vjetra od 270°

Model 0_8	Zvučna snaga za kut 0° [dBA]	Zvučna snaga za kut 90° [dBA]	Zvučna snaga za kut 180° [dBA]	Zvučna snaga za kut 270° [dBA]
Receiver 1	34.7	38.8	42.0	40.4
Receiver 2	36.4	40.3	43.7	42.4
Receiver 3	45.2	44.3	40.3	42.7
Receiver 4	42.7	41.6	35.4	38.1

Tablica 3. Zvučna snaga buke modela 0_8

4.3.2. Rezultati proračuna buke vjetroagregata za mod 5

4.3.2.1 Modeli 5_3 i 5_8

Model 5_3 predstavlja skupinu vjetroagregata u načinu rada (mod) 5 s brzinom puhanja vjetra od 3 m/s za kuteve vjetra 0°, 90°, 180° i 270°, a model 5_8 skupinu vjetroagregata isto u načinu rada 5, ali s brzinom puhanja vjetra od 8 m/s. Tablicom 4

prikazane su zvučne snage buke za četiri kontrolne točke modela 5_3, a tablicom 5 zvučne snage buke za četiri kontrolne točke modela 5_8.

Model 5_3	Zvučna snaga za kut 0° [dBA]	Zvučna snaga za kut 90° [dBA]	Zvučna snaga za kut 180° [dBA]	Zvučna snaga za kut 270° [dBA]
Receiver 1	33.3	36.6	39.8	38.3
Receiver 2	35.2	39.1	41.4	39.0
Receiver 3	43.1	42.1	38.2	40.6
Receiver 4	40.5	39.3	33.9	36.2

Tablica 4. Zvučna snaga buke modela 5_3

Model 5_8	Zvučna snaga za kut 0° [dBA]	Zvučna snaga za kut 90° [dBA]	Zvučna snaga za kut 180° [dBA]	Zvučna snaga za kut 270° [dBA]
Receiver 1	32.5	36.6	39.8	38.2
Receiver 2	34.2	38.1	41.5	40.2
Receiver 3	43.0	42.1	38.1	40.5
Receiver 4	40.5	39.4	33.2	35.9

Tablica 5. Zvučna snaga buke modela 5_8

4.3.3. Rezultati proračuna buke vjetroagregata za mod 18

4.3.3.1 Modeli 18_3 i 18_8

Model 18_3 predstavlja skupinu vjetroagregata u načinu rada (mod) 18 s brzinom puhanja vjetra od 3 m/s za kuteve vjetra 0°, 90°, 180° i 270°, a model 18_8 skupinu vjetroagregata isto u načinu rada 18, ali s brzinom puhanja vjetra od 8 m/s. Tablicom 6 prikazane su zvučne snage buke za četiri kontrolne točke modela 18_3, a tablicom 7 zvučne snage buke za četiri kontrolne točke modela 18_8.

Model 18_3	Zvučna snaga za kut 0° [dBA]	Zvučna snaga za kut 90° [dBA]	Zvučna snaga za kut 180° [dBA]	Zvučna snaga za kut 270° [dBA]
Receiver 1	25.3	28.6	31.8	30.3
Receiver 2	27.2	31.1	33.4	31.0
Receiver 3	35.1	34.1	30.2	32.6
Receiver 4	32.5	31.3	25.9	28.2

Tablica 6. Zvučna snaga buke modela 18_3

Model 18_8	Zvučna snaga za kut 0° [dBA]	Zvučna snaga za kut 90° [dBA]	Zvučna snaga za kut 180° [dBA]	Zvučna snaga za kut 270° [dBA]
Receiver 1	24.5	28.6	31.8	30.2
Receiver 2	26.2	30.1	33.5	32.2
Receiver 3	35.0	34.1	30.1	32.5
Receiver 4	32.5	31.4	25.2	27.9

Tablica 7. Zvučna snaga buke modela 18_8

4.4. Usporedba rezultata

Tablicom 8 prikazana je usporedba iznosa zvučne snage buke vjetroagregata na receiver-u po različitim modelima simulacije buke vjetroagregata. Usporedba rezultata je provedena na četiri kontrolne točke (četiri „receiver-a“) s navedena četiri različita kuta puhanja vjetra, dvije brzine i tri načina rada. U prvome stupcu tablice navedeni su modeli gdje u imenu modela prvi broj označava broj načina rada, a drugi broj označava brzinu puhanja vjetra. U redcima su navedene kontrolne točke gdje u imenu prvi broj označava broj

kontrolne točke, a drugi broj označava smjer puhanja vjetra. Iz rezultata vidi se da prelaskom iz manjeg moda u veći, iznos zvučne snage buke se smanjuje.

	Receiver 1_0	Receiver 1_90	Receiver 1_180	Receiver 1_270
Model 0_3	35.5	38.8	42.0	40.5
Model 0_8	34.7	38.8	42.0	40.4
Model 5_3	33.3	36.6	39.8	38.3
Model 5_8	32.5	36.6	39.8	38.2
Model 18_3	25.3	28.6	31.8	30.3
Model 18_8	24.5	28.6	31.8	30.2

Tablica 8. Usporedba zvučne snage buke za modove 0, 5 i 18 na receiver-u 1

	Receiver 2_0	Receiver 2_90	Receiver 2_180	Receiver 2_270
Model 0_3	35.5	38.8	42.0	40.5
Model 0_8	36.4	40.3	43.7	42.4
Model 5_3	35.2	39.1	41.4	39.0
Model 5_8	34.2	38.1	41.5	40.2
Model 18_3	27.2	31.1	33.4	31.0
Model 18_8	26.2	30.1	33.5	32.2

Tablica 9. Usporedba zvučne snage za modove 0, 5 i 18 na receiver-u 2

	Receiver 3_0	Receiver 3_90	Receiver 3_180	Receiver 3_270
Model 0_3	45.3	44.3	40.4	42.8
Model 0_8	45.2	44.3	40.3	42.7

Model 5_3	43.1	42.1	38.2	40.6
Model 5_8	43.0	42.1	38.1	40.5
Model 18_3	35.1	34.1	30.2	32.6
Model 18_8	35.0	34.1	30.1	32.5

Tablica 10. Usporedba zvučne snage buke za modove 0, 5 i 18 na receiver-u 3

	Receiver 4_0	Receiver 4_90	Receiver 4_180	Receiver 4_270
Model 0_3	42.7	41.5	36.1	38.4
Model 0_8	42.7	41.6	35.4	38.1
Model 5_3	40.5	39.3	33.9	36.2
Model 5_8	40.5	39.4	33.2	35.9
Model 18_3	32.5	31.3	25.9	28.2
Model 18_8	32.5	31.4	25.2	27.9

Tablica 11. Usporedba zvučne snage buke za modove 0, 5 i 18 na receiver-u 4

4.5. Utjecaj buke vjetroagregata na rezidualnu buku

Tablicom 12 prikazane su vrijednosti rezidualne buke okoline za određenu brzinu te smjer puhanja vjetra. U svrhu simulacije, promatraju se brzine 3 i 8 m/s.

Brzina vjetra [m/s]	Smjer puhanja vjetra [°]			
	0-29	90-119	180-209	270-299
1	27,3*	27.4	27.6	26,4*
2	27.8	28.4	28.2	27.8
3	30.2	30.5	30.3	30.7
4	34.2	35.7	35.2	35.6
5	38.7	41.6	37.4	40

6	39.3	44	39.9	42,7*
7	41,1*	46.2	44,4*	44,4*
8	54,5*	52.8	51,7*	51,9*
9	57,4*	56.1	-	56,4*
10	61,0*	56,1*	-	59,8*
11	63,0*	-	-	-
12	64,8*	-	-	-
13	65,1*	-	-	-
14				
15	-	-	-	-

Tablica 12. Iznosi rezidualne buke okoline za određene brzine puhanja vjetra i smjerove puhanja vjetra

Promatra li se slučaj za smjer puhanja vjetra od 0° i brzinu od 3 m/s rezidualna buka okoline iznosi 30.2 dBA, a ako uzmemo slučaj modela 0_3 gdje vjetroagregati rade u načinu rada 0, brzina vjetra iznosi 3 m/s i smjer je 0° i dodamo iznos buke na kontrolnoj točki 1 (35.5 dBA) možemo odrediti povećanje ukupne buke na tom području.

$$30.2 \text{ dBA} + 35.5 \text{ dBA} = 36.6 \text{ dBA} \rightarrow \text{povećanje} = 6.4 \text{ dBA}$$

S obzirom na to da je povećanje buke veće od 1 dB moramo pronaći optimalan način rada vjetroagregata koji će zadovoljavati i razinu buke i proizvodnju električne energije. Sukladno računom za prvo povećanje izračunata su ostala povećanja ukupne buke za navedene kuteve, brzine vjetra i modove vjetroagregata i prikazan su tablicom 13.

Iz navedenih rezultata može se zaključiti da kada brzina vjetra iznosi 3 m/s ni jedan mod način rada ne bi odgovarao te bi trebalo daljne povećati mod ili uz promjenu ocjenske razine uzeti način rada 18. U slučaju kada brzina vjetra iznosi 8 m/s povećanje je u svim slučajevima znatno manje od 1 dB tako da je u tom slučaju najbolje držati sve vjetroagregate u modu 0 za najveću moguću proizvodnju električne energije.

	Povećanje za smjer 0°	Povećanje za smjer 90°	Povećanje za smjer 180°	Povećanje za smjer 270°
Model 0_3	6.4	8.9	12	10.2
Model 5_3	4.8	7.1	10	8.3

Model 18_3	1.3	2.2	3.8	2.8
Model 0_8	≈ 0	0.2	0.4	0.3
Model 5_8	≈ 0	0.1	0.3	0.2
Model 18_8	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0

Tablica 13. Usporedba povećanja ukupne buke i načina rada vjetroagregata

4.6. Proizvedena električna energija vjetroagregata s obzirom na način rada

Na slici 4.15 vidimo da vjetroagregati visine 118 m imaju pristup modu 0, 5 i 18. U mod-u 0 jedan vjetroagregat proizvodi 5700 kW, u modu 5 proizvodi 5150 kW, a u modu 18 proizvodi 2580 kW. Može se zaključiti da u periodu kada brzina vjetra iznosi 3 m/s, proizvedena električna energija će biti minimalna zbog povećanje ukupne buke okoline, ali kada brzina vjetra iznosi 8 m/s proizvodnja električne energije će biti maksimalna jer svi vjetroagregati mogu raditi u modu 0.

operating mode	rated power [kW]	available hub heights [m]					
		108	118	120	148	159	164
Mode 0	5700	●	●	●	●	●	●
Mode 1	5600	●	●	●	●	●	●
Mode 2	5500	●	●	●	●	●	●
Mode 3	5400	●	●	●	●	●	●
Mode 4	5270	●	●	●	●	●	●
Mode 5	5150	●	●	●	●	●	●
Mode 6	5040	●	●	●	–	●	●
Mode 7	4930	●	●	●	–	–	●
Mode 8	4810	○	○	○	–	–	○
Mode 9	4700	○	○	○	–	–	○
Mode 10	4290	○	○	○	○	○	○
Mode 11	4170	○	○	○	○	○	○
Mode 12	3990	●	●	●	●	●	●
Mode 13	3700	●	●	●	●	●	●
Mode 14	3450	●	●	–	●	●	●
Mode 15	3200	●	●	–	●	●	●
Mode 16	2980	●	●	–	●	●	●
Mode 17	2800	●	●	–	●	●	●
Mode 18	2580	●	●	–	●	●	●

● mode available
○ mode on request
– mode not available

Slika 4.15 Proizvedena električna energija s obzirom na način rada vjetroagregata [18]

Zaključak

Buka vjetroagregata je složen problem koji je uvijek prisutan pri projektu izrade i pogona vjetroelektrane. Ovaj diplomski rad je napisan kao uvod u određivanje i modeliranje buke vjetroagregata te odabir načina rada vjetroagregata ovisno o proizvedenoj razini buke te proizvedenoj električnoj energiji.

U početnom dijelu diplomskog rada opisani su osnovni dijelovi vjetroagregata te je ukratko i opisana podjela vjetroagregata. Daljnje je opisano stanje industrije vjetroelektrana u svijetu i Republici Hrvatskoj, opisan je utjecaj vjetroelektrana na elektroenergetsku mrežu te su objašnjene glavne značajke vjetra te njegova uloga u proizvodnji električne energije u vjetroagregatu. U projektnom dijelu diplomskog rada, provedena je simulacija reljefa sa sedam vjetroagregata i četiri kontrolne točke s ciljem izrade simulacijskog plana rješavanja buke vjetroagregata. Nakon što su bili definirani svi početni parametri simulacije, napravljena su šest različitih modela za načine rada vjetroagregata 0, 5 i 18, za brzine puhanja vjetra u iznosu od 3 i 8 m/s te smjerove puhanja vjetra u iznosu od 0°, 90°, 180° i 270°.

Usporedbom rezultata zvučne snage pojedine kontrolne točke ustvrđeno je da prelaskom iz manjeg u veći načina rada, zvučna snaga buke će se smanjiti, ali će se i ukupna proizvedena električna energija smanjiti. U periodu kada brzina vjetra iznosi 3 m/s, proizvedena električna energija će biti minimalna zbog povećane ukupne buke okoline, ali kada brzina vjetra iznosi 8 m/s proizvodnja električne energije će biti maksimalna jer svi vjetroagregati mogu raditi u nultom načinu rada. Daljnjom financijskom analizom rada vjetroagregata i analizom potrošnje električne moglo bi se preciznije ustvrditi koji je optimalan slučaj za rad vjetroelektrane u pojedinom satu te tako napraviti detaljan plan rada vjetroagregata.

Literatura

- [1] *Višekriterijsko upravljanje vjetroagregatom*, Poveznica: <https://www.koncar-institut.hr/wp-content/uploads/2017/05/Multi-Criteria-Wind-Turbine-Control.jpg>
- [2] S. Šadek, *Energija vjetra*, predavanja s predmeta „Obnovljivi izvori i pohrana energije“, FER, (ak. god 2021./2022)
- [3] *REN21 Global Status Report 2019*, Poveznica: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf
- [4] *GWEC 2023.*, Poveznica: https://gwec.net/wp-content/uploads/2023/04/GWEC-2023_interactive.pdf
- [5] *Godišnji izvještaj o proizvodnji VE u RH u 2021. godini*, HOPS, Poveznica: <https://www.hops.hr/page-file/fpgRxv2qoKU9z5SH07Q0p6/izvjestaji-o-proizvodnji-ve-u-rh/HOPS%20-%20Godi%20%20A1nji%20izvje%20%20A1taj%20o%20proizvodnji%20VE%20u%20HR%20za%202021.pdf>
- [6] *Mjesečni izvještaj o proizvodnji vjetroelektrana u RH u prosincu 2022. godine*, HOPS, Poveznica: <https://www.hops.hr/page-file/suCWGUjtl6Xxgyzm3zTVB/izvjestaji-o-proizvodnji-ve-u-rh/HOPS%20-%20Mjese%20%20Dni%20izvje%20%20A1taj%20o%20proizvodnji%20VE%20u%20HR%20za%20Prosinac%20%202022.pdf>
- [7] H. Pandžić, *Uvod u spremnike energije*, predavanja s predmeta „Obnovljivi izvori i pohrana energije“, FER, (ak. god 2021./2022)
- [8] A. Čurković, H. Pandžić, Ž. Tomšić, *Vjetroene elektrane*, predavanja s predmeta „Ekonomija u energetici“, FER, (ak. god 2022./2023.)
- [9] I. Kuzle, *Dinamičko modeliranje elektrana*, predavanja s predmeta „Dinamika i regulacija elektroenergetskog sustava“, FER, (ak. god 2022./2023.)
- [10] A. Petošić, S. Grubeša, M. Suhanek, *Osnove akustike, buka okoliša i zvučna izolacija te mjere za zaštitu od buke u otvorenom i zatvorenom prostoru*, FER, (Zagreb, 2018.)

- [11] *Approximate frequency and sound level ranges of various sources and that of normal human hearing*, Poveznica: https://www.researchgate.net/figure/Fig1-Approximate-frequency-and-sound-level-ranges-of-various-sources-and-that-of_fig1_328721684
- [12] A- Bies, C.H Hansen, C.Q. Howard: "*Engineering Noise Control*" 5-th Edition
- [13] Pravilnik o najvišim dopuštenim razinama buke s obzirom na vrstu izvora buke, vrijeme i mjesto nastanka, Poveznica: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2021_12_143_2454.html
- [14] "Frekvencijski i dinamički opseg čujnosti", Poveznica: <https://slideplayer.rs/slide/17133932/>
- [15] "A-vrednovana i C-vrednovana krivulja", Poveznica: <https://www.wikiwand.com/sh/Zvuk>
- [16] Zvukomjer, Poveznica: <https://uporabnadozvola.hr/cijena-mjerenja-buke/>
- [17] D. Stošić, „*Buka transformatora*” ,(Zagreb, 2021.)
- [18] NORDEX katalog, *Octave sound power levels*

Sažetak

U diplomskom radu je obrađena tema buke vjetroagregata te je analiziran vjetroagregat pri odgovarajućim brzinama vjetra s obzirom na razinu generirane zvučne i proizvedene električne snage. Razmotreni su modovi tj. načini rada vjetroagregata pri različitim brzinama i smjerovima vjetra radi postizanja postavljenih akustičkih kriterija. U uvodnome dijelu je objašnjena teorijska pozadina vjetroagregata i stanje vjetroelektrana u svijetu te Republici Hrvatskoj. Potom je objašnjena buka vjetroagregata, njeni parametri te mjere zaštite. Opisane su metode mjerenja i modeliranja buke vjetroagregata te rezultati mjerenja i modeliranja buke vjetroagregata. U rezultatima mjerenja i modeliranja buke napravljen je proračun razina buke za vjetroagregate te ugrožene objekte pri kritičnim kutevima vjetra te je predložen odgovarajući način rada s obzirom na dozvoljenu proizvedenu razinu buke i proizvodnju električne energije.