

DOI: [10.46793/CIGRE37.C3.03](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.C3.03)**C3.03****METODOLOGIJA ZA ODREĐIVANJE DOZVOLJENIH NIVOVA BUKE
NOVOPROJEKTOVANIH VETROPARKOVA****METHODOLOGY FOR DETERMINING ALLOWED NOISE LEVELS OF NEWLY
DESIGNED WIND FARMS****Miloš Bjelić*, Tatjana Miljković, Marija Ratković**

Kratak sadržaj: Obnovljivi izvori energije, poput vetroparkova, imaju ključnu ulogu u smanjenju karbonskog otiska i ostvarivanju ciljeva Zelene agende kroz prelazak na održiv energetska sistem. Kako se broj vetroparkova uvećava, njihov uticaj na životnu sredinu postaje sve značajniji, uključujući i moguće negativne efekte buke na ljude. Zbog toga je važno u fazi projektovanja budućih vetroparkova sagledati njihov uticaj na ljude u okruženju sa aspekta buke. Potrebno je pre svega ustanoviti dozvoljeni nivo buke koji ne bi smeo biti premašen na lokacijama oko vetroparkova. U ovom radu prikazana je metodologija za određivanje dozvoljenih nivoa buke koju je potrebno sprovesti u fazi projektovanja budućih vetroparkova. Metodologija se oslanja na određivanju zavisnosti ambijentalne, pre izgradnje vetroparka, od brzine vetra na toj lokaciji. Metodologija ne predstavlja standard, već preporuku, i kao takva se primenjuje u svim delovima sveta. Ambijentalna buka se meri na 1.5 metara od tla, dok se brzina vetra može meriti na nekoliko načina, svodeći se na normalizovanu brzinu vetra na visini 10 metara od tla. Potrebno je formirati statistički značajan broj merenja buke i vetra, trajanja 10 minuta, i izračunati nivo buke koji je premašen u 90% slučajeva. Nakon formiranja zavisnosti nivoa buke od brzine vetra moguće je definisati kriterijume za dozvoljeni nivo buke na toj lokaciji. Utvrđeni dozvoljeni nivoi se mogu koristiti kao kriterijum u postupku izrade Studije uticaja na životnu sredinu. Takođe, ovi dozvoljeni nivoi mogu se koristiti u postupku provere uticaja vetroparka nakon izgradnje na životnu sredinu.

Ključne reči: *vetropark, buka, merenje, kriterijum za buku*

Abstract: Renewable energy sources, such as wind farms, play a key role in reducing the carbon footprint and achieving the goals of the Green Agenda by transitioning to a sustainable energy system. As the number of wind farms increases, their impact on the environment becomes more significant, including potential negative effects such as noise on people. Therefore, it is important, during the design phase of future wind farms, to assess their impact on people in the surrounding area with respect to noise. First and foremost, it is necessary to establish the allowed noise level that should not be exceeded at locations around the wind farms.

* Miloš Bjelić, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, bjelic@etf.rs
Tatjana Miljković, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, tm@etf.rs
Marija Ratković, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, rm@etf.rs

This paper presents a methodology for determining the allowed noise levels that must be implemented in the design phase of future wind farms. The methodology relies on determining the dependency of ambient noise, before the construction of the wind farm, on the wind speed at the location. The methodology is not a standard but a recommendation and, as such, is applied worldwide. Ambient noise is measured at a height of 1.5 meters above the ground, while wind speed can be measured in several ways, but ultimately normalized to wind speed at a height of 10 meters above the ground. A statistically significant number of 10-minute measurements of both noise and wind speed need to be conducted, and the noise level exceeded in 90% of the cases should be calculated. After establishing the dependency of noise levels on wind speed, it is possible to define criteria for the allowed noise levels at that location. The established allowed levels can be used as criteria in the Environmental Impact Study procedure. These allowed levels can also be used to assess the impact of the wind farm on the environment after construction.

Key words: *wind farm, noise, measurement, noise criteria*

1 UVOD

U poslednjim decenijama globalna energetska politika prolazi kroz transformaciju u pravcu održivosti, pri čemu se poseban akcenat stavlja na obnovljive izvore energije [1]. U tom kontekstu, energija iz vetra zauzima značajno mesto kao jedan od ključnih elemenata tzv. zelene agende, čiji je cilj smanjenje emisije gasova sa efektom staklene bašte, dekarbonizacija energetskog sektora i ublažavanje posledica klimatskih promena. Vetroparkovi kao sistemi za eksploataciju energije vetra, predstavljaju tehnološki napredan, ekološki prihvatljiv izvor energije, koji ne koristi fosilna goriva i ne emituje CO₂ tokom eksploatacije. Njihov doprinos održivoj budućnosti ogleda se kroz smanjenje zavisnosti od neobnovljivih izvora, poboljšanje energetske sigurnosti, kao i ekonomski razvoj ruralnih područja [2].

Međutim, pored brojnih prednosti vetroparkovi mogu imati i neke negativne uticaje na životnu sredinu [3]. Najčešće se ističu problemi vezani za vizuelni uticaj na pejzaž [4], uticaj efekta senki [5], kao i emisija buke [6]. Ovi faktori mogu imati negativne posledice na zdravlje ljudi i kvalitet života stanovništva, kao i na ukupan biodiverzitet u okolini vetroelektrana [7].

Buka koju proizvode vetroturbine može imati značajan uticaj na kvalitet života lokalnog stanovništva i životnu sredinu. Može se desiti da nivo koja potiče od vetroparka buke premaši dozvoljene granice koje mogu ometati svakodnevni život ljudi. Dugoročno izlaganje visokom nivou buke povezano je sa razvojem različitih zdravstvenih problema [8], uključujući poremećaje spavanja, hronični stres, povišen krvni pritisak, a čak se povezuje i sa povećanim rizikom od kardiovaskularnih bolesti [9]. Osim toga, buka može imati i negativan uticaj na životinje, ometajući njihovo ponašanje, putanje za migriranje, komunikaciju itd., što može ugroziti lokalni biodiverzitet.

Ambijentalna buka predstavlja sve zvukove koji su tipični za neku lokaciju. Ona može poticati od prirodnih izvora (kao što su vetar, životinje, ptice, kiša) i od ljudskih aktivnost (saobraćaj, industrijski zvuci, poljoprivredne aktivnosti itd.). Nivo ambijentalne buke zavisi od mnogo faktora i može se veoma razlikovati na različitim lokacijama. Zbog toga se i potencijalni uticaj budućih vetroparkova mora sagledavati u odnosu na svaku potencijalno ugroženu lokaciju i u odnosu na postojeće stanje buke na toj lokaciji. Da bi se precizno procenili potencijalni uticaji buke koja potiče od vetroparka na okolinu neophodno je sprovesti detaljna merenja i analize ambijentalne buke pre izgradnje vetroparka.

Ova merenja pomažu u utvrđivanju postojećih nivoa buke u okolini vetroparka i služe kao osnova za poređenje sa predviđenim nivoima buke tokom rada vetroparkova. Prvo je potrebno definisati ugrožene zone u kojima se ljudi mogu naći u dužem vremenskom periodu (stambeni ili radni prostor) kako bi se na njima vršio monitoring buke u dužem vremenskom intervalu. Ugrožene lokacije su obično one koje su i najbliže zoni vetroparka, ali to može zavisi od konfiguracije terena. U fazi projektovanja pozicija vetroturbina u vetroparku mogu se izvršiti preliminarni proračuni nivoa buke [10,11] i na taj način odrediti koje su potencijalno ugrožene lokacije. U nekim situacijama merenja ambijentalne buke nisu opravdana. U delu NZS 6808 standarda date su sledeće smernice: „Merenje nivoa ambijentalne buke i naknadne analize radi određivanja ograničenja buke treba izvršiti tamo gde se predviđaju nivoi buke vetroelektrane od 35 dBA ili više za lokacije koje su ugrožene bukom, kada su vetroturbine na 95% nominalne snage. Ako u neposrednoj okolini vetroelektrane nema lokacija koje su ugrožene bukom od 35 dBA merenja nivoa ambijentalne buke zvuka nisu potrebna” [12].

Nivo ambijentalne buke se povećava sa povećanjem brzine vetra na analiziranoj lokaciji. Sa druge strane se i nivo buke vetroturbina povećava sa povećanjem brzine vetra [13, 14]. Zbog toga je neophodno utvrditi zavisnost nivoa ambijentalne buke od brzine vetra pre izgradnje vetroparka kako bi se utvrdio potencijalni uticaj vetroparka. Krajem devedesetih godina prošlog veka ekspertska grupa *Working Group on Wind Turbine Noise* objavila je preporuku ETSU-R-97: *The Assessment and Rating of Noise From Wind Farms* [15]. Ova preporuka opisuje okvir za merenje buke vetroparka i daje način za određivanje nivoa buke za koje se smatra da nude razuman stepen zaštite suseda vetroparka, bez postavljanja nerazumnih ograničenja na razvoj ili dodavanje vetroparka neprimereno troškovima i administrativnim opterećenjima za programere vetroelektrana ili lokalne vlasti. Šesnaest godina kasnije radna grupa Instituta za Akustiku izdaje preporuku „*A Good Practice Guide to the Application of ETSU-R-97 for the Assessment and Rating of Wind Turbine Noise*” [16] u kojoj se, između ostalog, detaljno opisuju svi praktični aspekti povezani sa određivanjem graničnih vrednosti nivoa buke koje ne bi trebalo da prelazi buka budućih vetroparkova.

U ovom radu prikazan je način za određivanje dozvoljenih nivoa buke za buduće vetroparkove, za dve različite hipotetičke lokacije, baziran na dve navedene preporuke. Cilj rada je da razjasni postupak i nedoumice u vezi sa tehničkim aspektima procene buke, uključujući prikupljanje i analizu podataka o ambijentalnoj buci. Prikazani su primeri dve različite lokacije sa stanovišta ambijentalne buke kako bi se pokazalo da granične vrednosti za različite uslove ambijenta mogu biti drugačije. Razjašnjeni su potencijalno nejasni postupci u vezi merne opreme, trajanja merenja, uslova merenja, određivanja standardizovane brzine vetra i računanja kriterijuma za granične vrednosti buke.

Rad je podeljen u pet poglavlja. Nakon prvog, uvodnog poglavlja, sledi poglavlje metodologija u kom se objašnjava način određivanja graničnih vrednosti za nivoe buke. U trećem poglavlju je opisan način merenja nivoa buke i brzine vetra, zahtevi za mernu opremu kao i preporuke za trajanje merenja. U četvrtom poglavlju prikazani su simulirani rezultati za dve različite merne lokacije i prateća diskusija rezultata. U poslednjem, petom poglavlju, izneti su zaključci.

2 METODOLOGIJA

Utvrđivanje granica buke koje ne bi trebao da premaši budući vetropark rezultat je rada ekspertske grupe širom sveta i izvedene su u odnosu na:

- postojeće standarde i uputstva u vezi sa emisijom buke

- postojeće zakonske regulative
- potreba društva za obnovljivim izvorima energije radi smanjenja emisije zagađenja
- istraživanja radnih grupa za buku u Velikoj Britaniji, Danskoj, Holandiji i Nemačkoj

Da bi se utvrdile granične, odnosno dozvoljene vrednosti, potrebno je izvršiti ocenu stanja ambijentalne buke pre izgradnje vetroparka. Ova ocena vrši se u fazi izrade Studije uticaja na životnu sredinu i podrazumeva merenje ambijentalne buke, koje se često naziva i „nulto merenje“. Merenje ambijentalne buke podrazumeva monitoring buke na određenim lokacijama koje su potencijalno ugrožene izgradnjom budućeg vetroparka u pogledu buke. Tačne lokacije na kojima će se vršiti merenja određuju se kao geografski najbliže stambene ili radne jedinice zoni vetroparka. Precizniji način da se utvrde lokacije je da se izvrši proračun nivoa buke koje emituju vetroturbine i odrediti sve lokacije na kojima borave ljudi na kojima je nivo buke veći od 35 dB. Ovaj deo je veoma važan i zahteva angažovanje konsultanata za akustiku.

Potrebno je da se definiše deskriptor kojim će se izražavati stanje buke u životnoj sredini. Radna grupa odabrala je deskriptor L_{90} , izražen u dB(A) za opis stanja ambijentalne buke za potrebe određivanja dozvoljenih nivoa buke. Parametar predstavlja vrednost nivoa buke koja je premašena u 90% slučajeva. Ovaj deskriptor omogućava eliminaciju kratkih zvukova koji mogu biti netipični za svakodnevnu situaciju na mernoj lokaciji. Pokazano je da se korišćenjem ovog deskriptora umesto parametra L_{eq} , koji se uobičajno koristi za opis stanja buke u životnoj sredini, dobijaju vrednosti za oko 1.5 - 2.5 dB(A) manje [15].

Nivo ambijentalne buke pored ljudskih aktivnosti na mernoj lokaciji zavisi i od vetra. Vazdušno strujanje stvara buku na delovima vegetacije, kao što su krošnje drveća, lišće itd., kao i na objektima u neposrednoj okolini. Sa druge strane i buka koju prave vetroturbine direktno zavisi od brzine vetra [13]. Zbog toga je potrebno odrediti zavisnost nivoa ambijentalne buke od brzine vetra. U tu svrhu, pored merenja nivoa ambijentalne buke, potrebno je meriti i brzinu vetra. Merenje brzine vetra bi trebalo da bude standardizovano kako bi se moglo vršiti poređenje različitih lokacija koje se razlikuju po konfiguraciji. Detaljan postupak merenja brzine vetra i merenja buke dat je u narednom poglavlju.

Potrebno je izmeriti brzine vetra koje su zastupljene na samoj lokaciji ali i one pri kojima rade vetroturbine. Kako bi se obezbedio dovoljan set podataka za utvrđivanje veze između nivoa buke i brzine vetra potrebno je vršiti merenja u dugačkom intervalu vremena. Potrebno je i standardizovati najmanji kvant vremena u kom bi se vršilo merenje buke i brzine vetra. Ekspertska grupa koja je definisala preporuku odredila je da to bude kvant od 10 minuta. Produženje perioda merenja na više od 10 minuta predstavljao bi gubitak u vremenskoj rezoluciji i ne bi se mogle sagledati varijaciji nivoa buke.

Na osnovu obimnih merenja formira se set podataka sa 10-minutnim vrednostima deskriptora buke L_{90} i usrednjenih standardizovanih brzina vetra v_{10} , za sve brzine vetra od interesa. Na osnovu ovog seta podataka moguće je utvrditi korelaciju između stanja ambijentalne buke i brzine vetra. Koristeći izmereni set podataka formira se regresiona kriva pomoću polinoma trećeg ili četvrtog stepena. Koeficijenti regresione krive biraju se tako da se ostvari maksimiziranje parametra R^2 između izmerenih vrednosti i regresione krive [17]. Nakon izračunavanja regresione krive mogu se utvrditi nivoi buke za svaki opseg brzine vetra od 1 m/s očitavanjem sa krive. Očitane vrednosti se unose u narednu tabelu.

Tabela 1: Formular za nivo ambijentalne buke za različite brzine vetra

v_{10} (m/s)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Nivo L_{90} (dBA)												

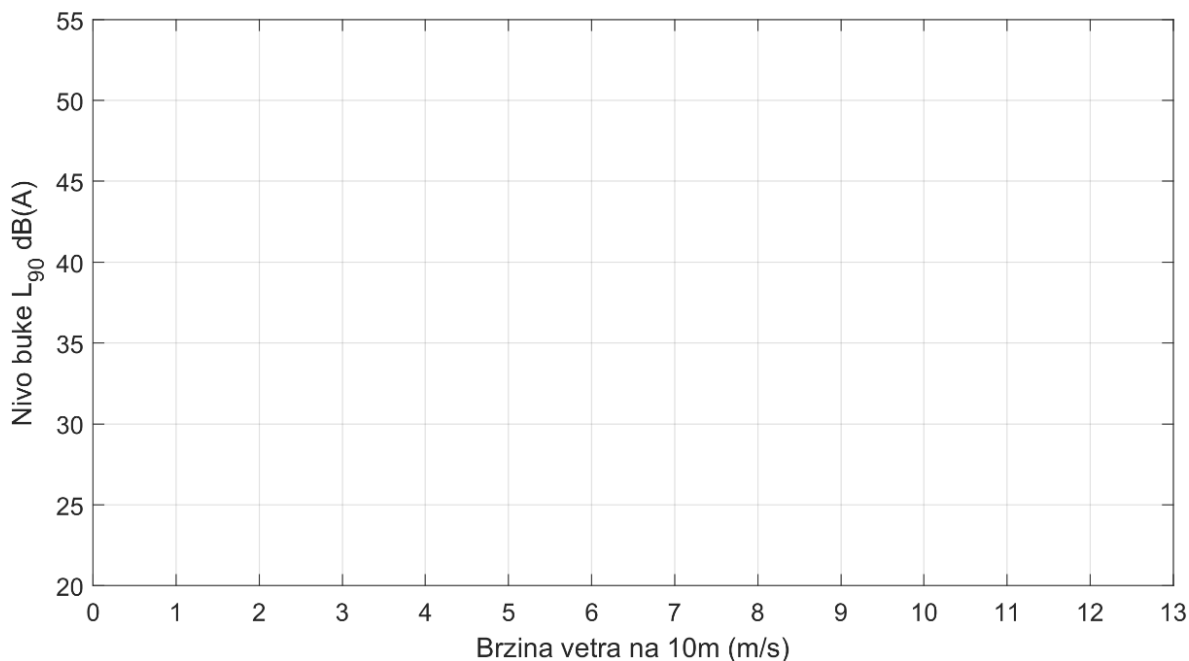
Ograničenja buke u ETSU-R-97 postavljena su sa ciljem zaštite stanovništva dok su van svojih stambenih jedinica, u njihovoj okolini. Dozvoljeni nivoi buke dobijaju se kombinacijom odgovarajuće fiksne granice i izvedene relativne granice. Fiksna granica određena je učešćem ljudi koji žive u toj oblasti u vlasništvu budućeg vetroparka. Na osnovu toga formiraju se dve vrednosti za fiksnu granicu:

- 1) Stanovništvo nema učešće u vlasništvu (*Non-stakeholder*) – fiksna granica je 40 dBA
- 2) Stanovništvo ima učešće u vlasništvu (*Stakeholder*) – fiksna granica je 45 dBA

Relativna granica buke se dobija na osnovu izmerenih vrednosti ambijentalne buke L_{90} koja zavisi od brzine vetra (Tabela 1) uvećane za 5 dB. Relativna granica se izračunava za sve vrednosti brzine vetra. Konačno, dozvoljena vrednost nivoa ambijentalne buke na lokaciji koja je potencijalno ugrožena budućim vetroparkom dobija se kao:

- 1) Stanovništvo nema učešće u vlasništvu: $\min\{40 \text{ dBA}, L_{90} + 5 \text{ dB}\}$
- 2) Stanovništvo ima učešće u vlasništvu: $\min\{45 \text{ dBA}, L_{90} + 5 \text{ dB}\}$

Ovakav kriterijum primenjuje se na sve vrednosti brzine vetra iz Tabele 1. Vrednosti dozvoljenih nivoa predstavljaju se tabelarno (slično kao Tabela 1) ili na grafiku čija je forma data na Slici 1. Opseg na y-osi ovog grafika može biti promenjen u zavisnosti od stanja buke na mernoj lokaciji.



Slika 1: Grafička forma za predstavljanje rezultata korelacije merenja buke sa merenjem vetra i dozvoljenih vrednosti buke koje ne bi trebao da premaši vetropark

3 POSTUPAK MERENJA BUKE I BRZINE VETRA

3.1 Oprema za merenje buke i izbor lokacije za merenje

Oprema za merenje buke treba da ispunjava standarde za klasu 1 mernih uređaja [18]. Mikrofon bi trebalo da budu smešteni u štitnik za vetar kako bi se smanjio efekat buke koju stvara protok vazduha na mikrofону. Štitnik za vetar mora biti većeg prečnika od 100 mm. Tamo gde proizvođač nije predložio kombinaciju štitnik-mikrofon, što je najčešće slučaj, štitnik ne bi trebalo da ima uticaj veći od ± 1 dB u bilo kom oktavnom opsegu od 63 Hz do 4000 Hz [19]. Kalibracija sistema za merenje vrši se pomoću kalibratora klase 1, prema specifikaciji proizvođača, u periodima ne duže od dve godine pre datuma završetka istraživanja. Sistem treba da bude kalibrisan na terenu prilikom postavljanja i pri svakoj promeni baterije.

Merenja buke treba da se vrše u blizini stambenih jedinica u oblasti koja se često koristi za odmor i rekreaciju. Identifikovanje optimalnih pozicija za merenje mora biti stvar profesionalne procene i iskustva, ali se nude sledeće smernice [16]:

- Mikrofon treba da budu postavljeni na visini od 1.2-1.5 metara iznad zemlje i ne bliže od 3.5 metara bilo kojoj značajnoj reflektujućoj površini (kao što je zgrada ili ograda), osim zemlje. Položaj treba da bude unutar 20 metara od stambene jedinice.
- Opremu treba postaviti na pozicijama gde su nivoi buke reprezentativni za tipične „niske“ nivoe u blizini stambenih jedinica.
- Cilj je da se izmeri „tipični“ ili „indikativni“, a ne „apsolutno najniži“ nivoi pozadinske buke (koji se mogu odrediti samo proširenim merenjima na velikom broju lokacija tokom dugog perioda koji nije ni potreban ni izvodljiv).
- Na većini lokacija, nivoi ambijentalne buke će biti determinisani vetrom u drveću i vegetaciji i izvorima buke koji se nalaze izvan imanja, kao što je buka saobraćaja. Treba identifikovati prisustvo lokalnih izvora buke kao što su pumpe, baštenske česme, kućni odvodi, vodotokovi i poljoprivredna oprema. Takvi izvori su promenljivi i njihove efekte treba isključiti tamo gde je to moguće izborom položaja merenja.
- Tamo gde nije moguće isključiti uticaj promenljivih lokalnih izvora buke izborom pozicije, moguće je isključiti takve podatke iz skupa podataka koji se koristi za izvođenje kriterijuma za dozvoljene nivoe.

Na Slici 2 prikazano je pozicioniranje uređaja za merenja buke na dve merne lokacije. Na merni mikrofon postavljen je zaštitnik za vetar i mikrofon se nalazi na 1.4 metra od tla. U okruženju ne postoje refleksione ravni, sem zemlje.



a)



b)

Slika 2: Primer pozicija mernog uređaja na dve merne lokacije

3.2 Trajanje merenja i filtriranje podataka merenja

Trajanje merenja buke određuje se potrebom da se prikupi dovoljno validnih podataka o opsegu brzina vetra. Da bi se ovaj zahtev ispunio potrebno je vršiti merenja u trajanju od barem 2 nedelje. Prema ETSU preporuci mora se obezbediti da se tokom perioda analize izmere brzine vetra u rasponu od 0 do 12 m/s. U slučajevima u kojima buduće vetroturbine imaju regulaciju nagiba sa kojom postižu maksimalni nivo zvučne snage pri standardizovanoj brzini vetra od 7-8 m/s prikupljanje podataka o buci pri brzinama vetra do 12 m/s se ne smatra neophodnim. Takođe, na nekim lokacijama pojava standardizovanih brzina vetra iznad 7-8 m/s je relativno neuobičajena i prikupljanje podataka pri većim brzinama vetra može zahtevati nepotrebno dug period. Često nije potrebno meriti brzine vetra znatno ispod brzine uključenja vetroturbina (uglavnom 2-4 m/s na visini glavčine). Na osnovu toga preporučeni raspon minimalne brzine vetra (na 10 m) za analizu buke:

- Za turbine sa regulacijom nagiba: između *cat-in* brzine vetra i brzine vetra koja odgovara njegovom maksimalnom nivou zvučne snage.
- Za turbine sa regulacijom zaustavljanja: između *cat-in* brzine vetra i 12 m/s.

Da bi se obezbedila potrebna količina podataka potrebno je da se dobije najmanje 200 validnih tačaka podataka za svaki od perioda u okviru zahtevanog opsega brzine vetra i ne manje od 5 validnih podataka u bilo kom opsegu brzine vetra od 1 m/s. Ove smernice nisu striktno. Možda će biti potrebno više podataka ako podaci pokazuju veliko rasturanje, odnosno može ih biti manje ako su podaci čvrsto grupisani.

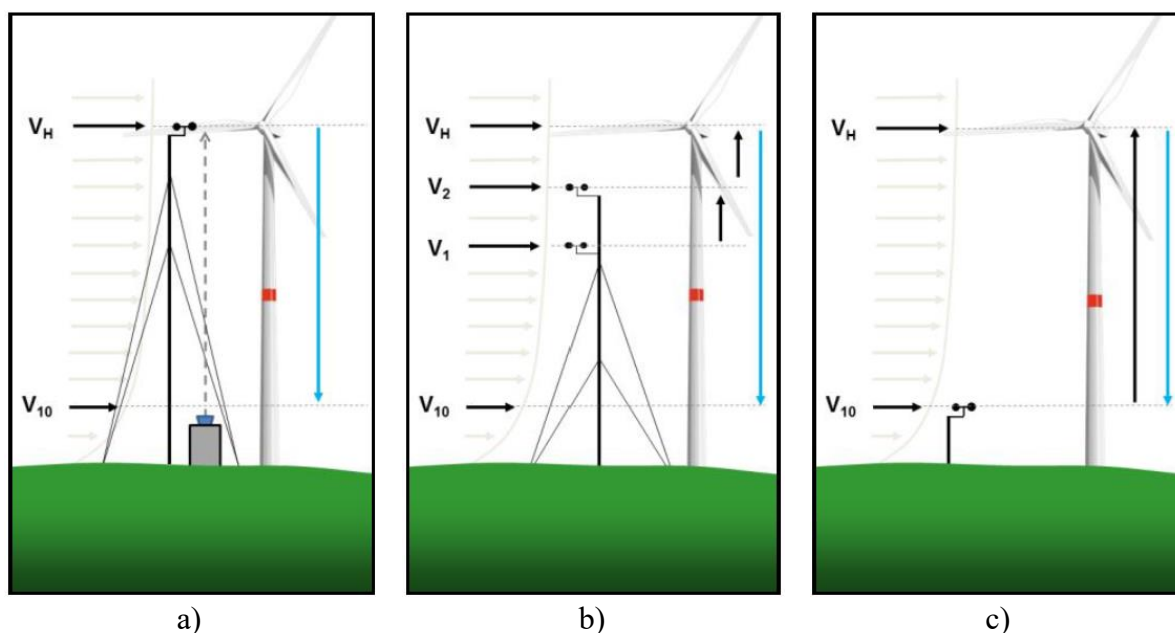
Da bi se obezbedili reprezentativni rezultati merenja za analizu buke i postavljanje adekvatnih kriterijuma za dozvoljeni nivo buke potrebno je izvršiti odgovarajuća filtriranja.

Da bi se dobio tipičan prikaz postojeće buke, analiza prikupljenih podataka treba da minimizira uticaj netipičnih izvora buke za reprezentativnu lokaciju merenja. ETSU-R-97 zahteva filtriranje podataka o buci, vetru i kiši za sate koje odgovaraju periodu odmora i noćnih sati. Uprkos pažljivom odabiru mernih lokacija, treba očekivati da se tokom istraživanja mogu javiti izvori buke koji nisu tipični za okruženje. Takvi izvori mogu biti neidentifikovana buka iz dvorišta, pumpe za vodu, motori u praznom hodu, itd. U takvim slučajevima treba izvršiti uklanjanje merenja koja sadrže te izvore buke. Upotreba indeksa L_{A90} će minimizirati uticaj prolaznih izvora buke koji bi mogli da podignu izmerene nivoe buke. Podaci prikupljeni tokom perioda padavina (kiša i sneg) moraju biti uklonjeni iz podataka.

3.3 Određivanje brzine vetra na standardizovanoj visini od 10 metara

Nivoi buke izmereni u svakom intervalu od 10 minuta su u korelaciji sa brzinom vetra na referentnoj poziciji na predloženoj lokaciji vetroparka. Potrebno je da se brzina vetra odredi na standardizovanoj visini od 10 metara (v_{10} standardizovana brzina vetra). Mogu se koristiti tri metode merenja brzine vetra (prikazane šematski na slici 3):

- Direktna merenja na visini glavčine koristeći jarbol koji nosi anemometar na visini glavčine (buduće) turbine.
- Merenje pomoću stuba nižeg od visine glavčine, koji nosi anemometre na dve različite visine. Ta merenja se koriste za izračunavanje brzine vetra na visini glavčine, koristeći eksponencijalni profil (izraz 1). Potrebno je da gornji anemometar (označen sa 2 na Slici 3b) bio na visini ne manjoj od 60% visine glavčine predložene turbine i donji anemometar (označen sa 1 na Slici 3b) najmanje 15 metara ispod nje. U okviru tih zahteva treba koristiti dve merne visine najbliže visini glavčine. Standardizovana brzina vetra dobija se na osnovu izračunate brzine vetra na visini glavčine i izraza (3).
- Merenje pomoću stuba koji nosi anemometar na visini od 10 metara, sa korekcijama smicanja vetra koje treba odrediti (izraz 3).



Slika 3: Šematski prikaz metode koja se koristi za procenu brzine vetra na visini 10 metara: a) merenje na visini glavčine, b) merenje na dve visine, manje od visine glavčine i c) merenje na visini 10 metara od tla [16]

$$v = v_{mereno} \cdot \left[\frac{h}{h_{mereno}} \right]^m, \quad (1)$$

gde je v računata brzina vetra, v_{mereno} izmerena brzina vetra, h visina na kojoj se računa brzina vetra, h_{mereno} visina na kojoj je merena brzina vetra i m eksponent smicanja, koji se računa na sledeći način:

$$m = \frac{\log(v / v_{mereno})}{\log(h / h_{mereno})}. \quad (2)$$

Brzina vetra na $h=10$ metara (v_{10}) može se izračunati na sledeći način:

$$v_{10} = v_{ref} \frac{\ln(10 / z)}{\ln(h_{ref} / z)}, \quad (3)$$

gde je v_{ref} izračunata ili izmerena brzina vetra na visini h_{ref} , a z dužina hrapavosti. Dužina hrapavosti od 0.05 m se koristi za standardizaciju brzine vetra visine glavčine na visinu od 10 m, bez obzira na stvarnu dužinu hrapavosti na mernoj lokaciji [20]. Ova procedura „normalizacije“ je usvojena radi uporedivosti rezultata ispitivanja za različite turbine.

Važno je da merenja buke ($L_{A90,10 min}$) i brzine vetra ($v_{10,10min}$) budu sinhronizovana tako da periodi usrednjavanja od 10 minuta budu odgovarajući za oba merenja. U ovu svrhu mogu se iskoristiti GPS prijemnici koji pružaju tačan izvor univerzalne vremenske reference.

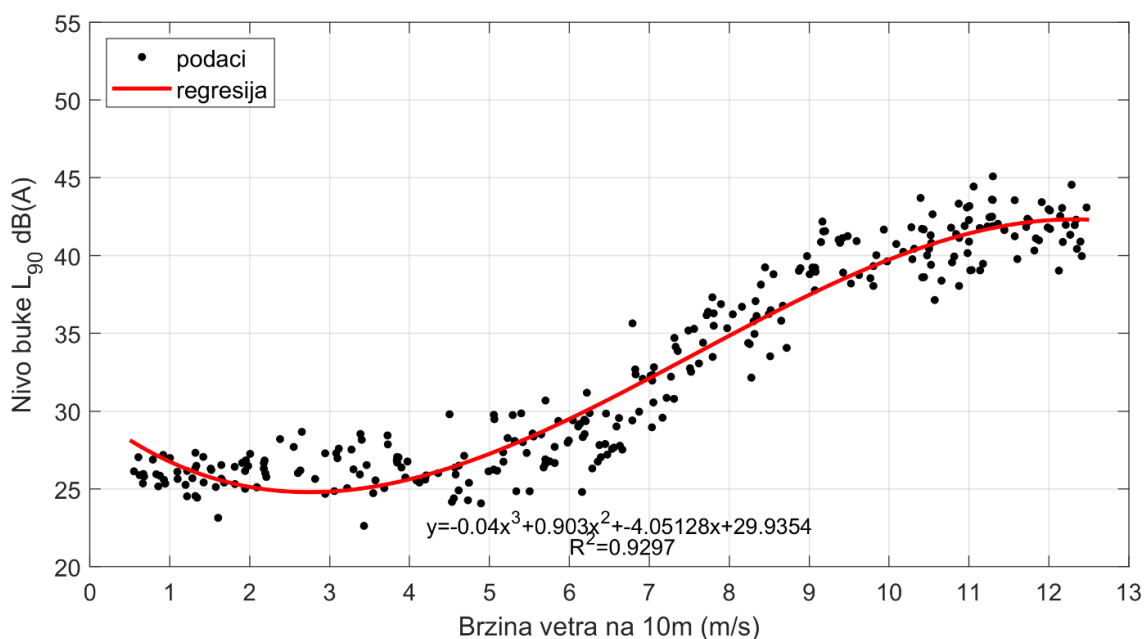
4 REZULTATI I DISKUSIJA

U ovom poglavlju prikazano je određivanje dozvoljenih vrednosti buke za potrebe projektovanja budućeg vetroparka za dve merne lokacije A i B na osnovu izmerenih vrednosti ambijentalne buke i izmerenih brzina vetra. Ove lokacije, kao i rezultati merenja buke su hipotetički, odnosno ne predstavljaju stvarne geografske lokacije u okolini budućeg vetroparka i stvarne rezultate merenja. Rezultati merenja su simulirani na osnovu dosadašnjeg iskustva Laboratorije za Akustiku Elektrotehničkog fakulteta u merenju ambijentalne buke za potrebe izrade studija uticaja na životnu sredinu. Cilj ovog poglavlja je da se prikaže postupak određivanja dozvoljenih nivoa ambijentalne buke pa su zato izabrane hipotetičke lokacije i simulirane vrednosti nivoa ambijentalne buke. Simulirane vrednosti brzine vetra i nivoa buke mogu se koristiti za ilustraciju postupka određivanja dozvoljenih vrednosti za potrebe budućeg vetroparka bez gubitka opštosti rešenja. Lokacije odgovaraju seoskim sredinama i predstavljaju dva različita slučaja po pitanju ambijentalne buke (blizine saobraćajnica, blizine šumskih pojaseva, ljudskih aktivnosti u okolini itd.). Izabrana su dva različita okruženja kako bi se pokazalo da se i kriterijumi za dozvoljene nivoe mogu razlikovati u zavisnosti od stanja ambijentalne buke pre izgradnje vetroparka.

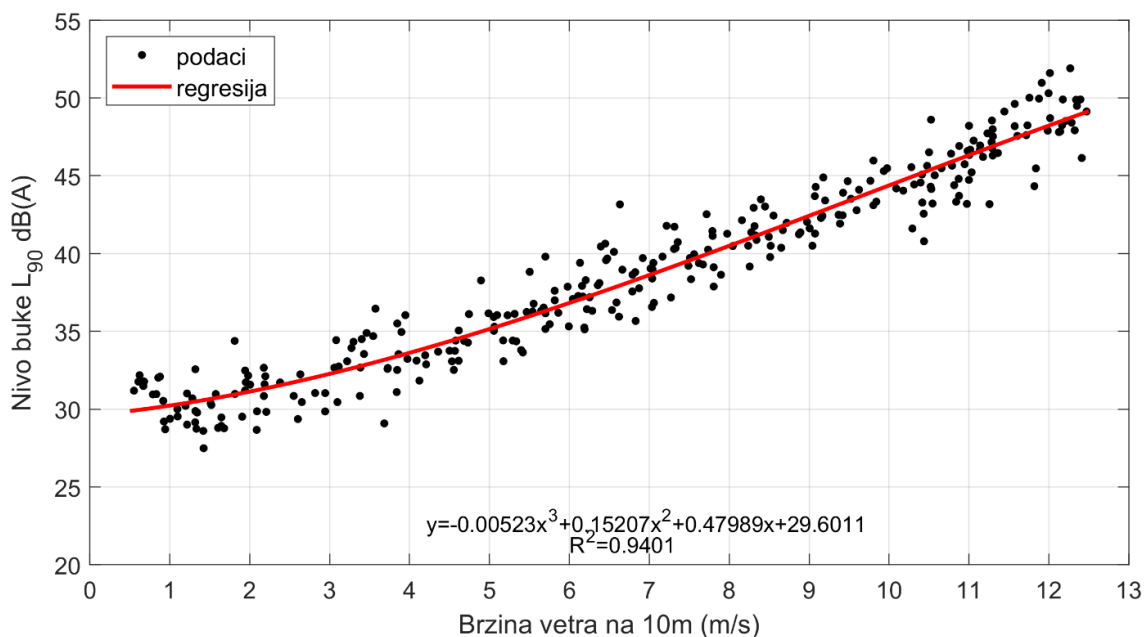
Za obe lokacije simulirani su rezultati merenja standardizovane brzine vetra v_{10} u opsegu od 0.5 m/s do 12.5 m/s. Vrednosti brzina vetra su iste za obe lokacije, što odgovara realnoj situaciji kada se meri u okolini buduće zone vetroparka i koriste podaci sa mernog stuba u unutrašnjosti vetroparka. Vrednosti merenja ambijentalne buke L_{90} simulirane su u opsegu 23 dB(A) do 45 dB(A) za lokaciju A i u opsegu 27 dB(A) do 52 dB(A) za lokaciju B. Broj vrednosti brzine vetra i ambijentalne buke je 300. U svakom opsegu brzina vetra od 1 m/s postoji barem 5 vrednosti merenja buke, čime je ispunjen zahtev iz preporuke.

Na Slici 4 prikazana je zavisnost nivoa buke L_{90} , izraženog u dB(A), od standardizovane brzine vetra v_{10} za Lokaciju A. Crnim tačkama prikazani su rezultati merenja.

Na osnovu preporuke izvršena je regresija podataka polinomskom funkcijom četvrtog reda i ona je prikazana crvenom bojom. Na Slici se može uočiti da su vrednosti nivoa buke za brzine vetra ispod 7 m/s oko 25 dB(A) i da su približno ujednačenje. Ove vrednosti odgovaraju seoskim sredinama sa povremenim umerenim aktivnostima ljudi ili retkim saobraćajem. U opsegu brzina vetra od 7 m/s do 10 m/s vidi se da postoji skoro linearna zavisnost nivoa buke od brzine vetra, dok se iznad brzine od 10 m/s javlja „zaravnjenje“ nivoa buke. Ovi rezultati odgovaraju mernoj lokaciji sa relativno niskom vegetacijom u neposrednoj okolini i udaljenim pojasom visoke vegetacije kao što je drveće (npr. Lokacija prikazana na Slici 2a). Porast nivoa buke je posledica povećanja šuma koji nastaje na vegetaciji. Nakon određene brzine vetra niska vegetacija ne može napraviti veće strujanje vazduha, što za posledicu ima ujednačavanje nivoa buke.



Slika 4: Zavisnost nivoa ambijentalne buke od brzine vetra svedenoj na 10 m – Lokacija A



Slika 5: Zavisnost nivoa ambijentalne buke od brzine vetra svedenoj na 10 m – Lokacija B

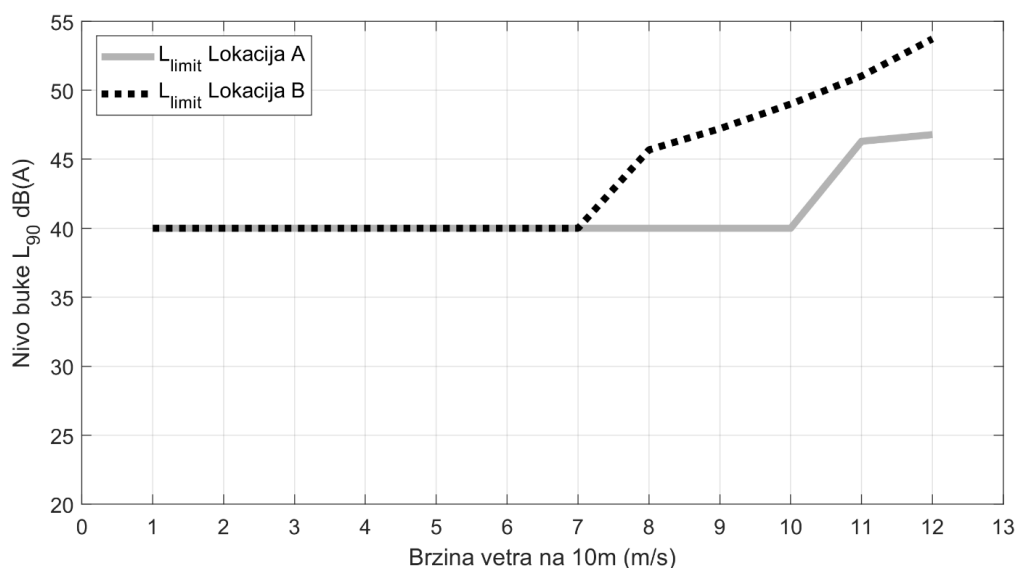
Na Slici 5 prikazana je zavisnost nivoa buke L_{90} od standardizovane brzine vetra v_{10} za Lokaciju B. Na osnovu preporuke izvršena je regresija podataka polinomskom funkcijom četvrtog reda koja je prikazana crvenom bojom. Na Slici se može uočiti da su vrednosti nivoa buke za ovu lokaciju veće u odnosu na Lokaciju A. Nivo buke pri malim brzinama vetra, ispod 3 m/s, je oko 30 dB(A) što odgovara povećanoj aktivnosti ljudi ili povećanom intenzitetu saobraćaja na lokalnim putevima. Za razliku od Lokacije A, na lokaciji B nivo buke praktično direktno zavisi od brzine vetra, iznad brzine 3 m/s. Ovakva situacija odgovara realnoj lokaciji u čijoj blizini postoji visoko rastinje. To mogu biti vetrobranski pojasevi sa visokim drvećem, obronci šumskih pojaseva, zasadi odraslog kukuruza i suncokreta itd. Porast nivoa buke je posledica povećanja šuma koji nastaje na lišću i granama (npr. Lokacija prikazana na Slici 2b). Velike površine krošnja drveća omogućavaju da se buka usled protoka vazduh povećava i da nema „zaravnjenja“ regresione krive.

Na osnovu regresionih krivih, dobijenih na osnovu mernih podataka, moguće je odrediti prosečne nivoe buke L_{90} za svaki opseg brzina vetra od 1 m/s. U Tabeli 2 prikazane su izračunate vrednosti za obe analizirane lokacije. I iz Tabele se može zaključiti da Lokacija B ima veće vrednosti nivoa buke od Lokacije A. Vrednosti variraju u zavisnosti od brzine vetra, što je posledica izgleda pojedinačnih lokacija.

Tabela 2: Vrednosti nivoa ambijentalne buke za različite brzine vetra

v_{10} (m/s)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Lokacija A Nivo L_{90} (dBA)	25.9	26.0	26.5	26.2	26.8	28.5	31.2	35.5	39	39.9	41.3	41.8
Lokacija B Nivo L_{90} (dBA)	30.4	30.6	32.3	33.4	34.8	37.4	38.8	40.7	42.2	44.0	46.0	48.7

Da bi se odredili dozvoljeni nivoi buke za budući vetropark potrebno je na podatke iz Tabele 2 primeniti metodologiju opisanu u drugom poglavlju. Pretpostavljajući da stanovništvo na Lokacijama A i B nema direktan finansijski uticaj u budućem vetroparku, odnosno nije vlasnik vetroparka primenjuje se strožiji fiksni kriterijum. To znači da je fiksna vrednost u ovom slučaju 40 dB(A). Ukoliko su izmerene vrednosti iz Tabele 1 manje od 40 dB(A) dozvoljena vrednost iznosi 40 dB(A), u suprotnom dozvoljena vrednost je vrednost iz Tabele 1 uvećana za 5 dB. Na osnovu ovih pravila formirane su dozvoljene vrednosti za sve analizirane brzine vetra, od 1 m/s do 12 m/s. Ove vrednosti prikazane su na Slici 6.



Slika 6: Dozvoljene vrednosti buke za budući vetropark za lokaciju 1 i lokaciju 2

Sa Slike 6 može se videti da su dozvoljene vrednosti za budući vetropark na Lokacijama A i B za brzine vetra do 7 m/s iste i iznose 40 dB(A). Nakon te vrednosti brzine vetra na Lokaciji B primenjuje se „blaži uslov“ gde je vrednost ambijentalne buke uvećana za 5 dB. „Blaži uslov“ za Lokaciju A se primenjuje tek pri brzinama vetra većim od 10 m/s. Razlike u dozvoljenim vrednostima za ove dve lokacije razlikuje se čak za 10 dB ($v_{10}=10$ m/s) čime se pokazuje da se svaka lokacija mora analizirati posebno. Zbog različitosti aktivnosti ljudi, konfiguracije terena i vegetacije stanje ambijentalne buke može biti veoma različito na različitim lokacijama, koje mogu biti udaljene i svega nekoliko stotina metara. Na svakoj potencijalno ugroženoj lokaciji potrebno je izvršiti opsežan set merenja kako bi se utvrdila zavisnost nivoa buke od brzine vetra i na osnovu toga definisale dozvoljene vrednosti. Ove vrednosti predstavljaju kriterijum za ocenu uticaja budućeg vetroparka u pogledu buke na životnu sredinu. Proračunima buke koju prave vetroturbine u fazi izrade Studije uticaja na životnu sredinu moguće je utvrditi eventualna premašenja dozvoljenih nivoa i preduzeti adekvatne optimizacije u fazi projektovanja. Dozvoljene vrednosti buke izračunate prema predstavljenoj metodologiji mogu biti i kriterijum za ocenu uticaja vetroparka nakon njegove izgradnje gde bi se merenjem utvrdio uticaj na životnu sredinu.

5 ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazan je postupak određivanja graničnih vrednosti nivoa buke koje ne bi trebalo da premaši budući vetropark, prema preporuci ETSU-R-97. Ova metodologija, iako nije standardizovana predstavlja dobru praksu koja se može koristiti kao osnov za donošenje odluka u okviru Studije o proceni uticaja na životnu sredinu. Korišćenjem ove metode moguće je na objektivnan način sagledati ambijent lokacije i time unaprediti proces planiranja i kontrole uticaja vetroparkova. Pokazano je da se prilikom proračuna dozvoljenih nivoa buke mora vršiti i monitoring standardizovane brzine vetra jer ambijentalna buka zavisi i od vetra. Postupak je demonstriran za rezultate merenja ambijentalne buke i standardizovane brzine vetra na dve hipotetičke lokacije. Lokacije se razlikuju po svojoj strukturi, odnosno blizini saobraćajnica, aktivnosti ljudi, stanja vegetacije i nadmorske visine. Pokazano je da se dozvoljeni nivoi ambijentalne buke moraju postavljati za sve brzine vetra od interesa za analizirani vetropark. Prikazani rezultati pokazuju da se pojedinačne lokacije mogu drastično razlikovati po pitanju dozvoljenih nivoa buke i da se analiza za potrebe izrade Studije uticaja na životnu sredinu mora raditi nezavisno za svaku od lokacija.

ZAHVALNICA

Ovaj rad finansijski je podržan od strane Ministarstva za nauku, tehnološki razvoj i inovacije pod brojevima ugovora 451-03-137/2025-03/200103 i 451-03-136/2025-03/200103.

6 LITERATURA

- [1] John K. Kaldellis, D. Zafirakis, The wind energy (r)evolution: A short review of a long history, Renewable Energy, Volume 36, Issue 7, 2011, 1887-1901, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.01.002>.
- [2] Theresa M. Groth, Christine A. Vogt, Rural wind farm development: Social, environmental and economic features important to local residents, Renewable Energy, Volume 63, 2014, 1-8, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.08.035>.
- [3] Jeffery R.D., Krogh C., Horner B. Adverse health effects of industrial wind turbines. Can Fam Physician. 2013 May;59(5):473-5. PMID: 23673580.

- [4] Stephen Gibbons, Gone with the wind: Valuing the visual impacts of wind turbines through house prices, *Journal of Environmental Economics and Management*, Volume 72, 2015, 177-196, <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2015.04.006>.
- [5] Erik Nordman, "Wind Power and Human Health: Flicker, Noise, and Air Quality" (2010). Technical Reports. 8.
- [6] Eja Pedersen, Kerstin Persson Waye; Perception and annoyance due to wind turbine noise—a dose–response relationship. *J. Acoust. Soc. Am.* December 2004; 116 (6): 3460–3470. <https://doi.org/10.1121/1.1815091>
- [7] Knopper Loren D. , Ollson Christopher A. , McCallum Lindsay C. , Whitfield Aslund Melissa L. , Berger Robert G. , Souweine Kathleen , McDaniel Mary, Wind Turbines and Human Health, *Frontiers in Public Health*, Volume 2, 2014, 10.3389/fpubh.2014.00063
- [8] Schmidt JH, Klokke M. Health effects related to wind turbine noise exposure: a systematic review. *PLoS One*. 2014 Dec 4;9(12):e114183. doi: 10.1371/journal.pone.0114183. PMID: 25474326.
- [9] Chiu, CH., Lung, SC.C., Chen, N. *et al.* Effects of low-frequency noise from wind turbines on heart rate variability in healthy individuals. *Sci Rep* **11**, 17817 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97107-8>
- [10] B. Søndergaard, B. Plovsing, Prediction of noise from wind farms with Nord2000, Part 1 and 2, Proc. Wind Turbine Noise 2009 Conference, Aalborg Denmark, June 2009.
- [11] JOR3-CT95-0091 ‘Development of a Wind farm Noise Propagation Prediction Model’, Bass J H, Bullmore A J, Sloth E, Final Report for EU Contract JOR3 CT95 0051, 1998
- [12] NZS 6808:2010 Acoustics – Wind farm noise.
- [13] Sany Renewable Energy Co., Ltd., “SI-172625 Wind Turbine Technical Description”, version No. V9, May 12, 2023.
- [14] International Electrotechnical Commission publication IEC 61400-11:2012 Wind Turbines-Part 11: Acoustic noise measurement techniques (IEC 61400-11).
- [15] ETSU-R-97 FOR THE ASSESSMENT AND RATING OF WIND TURBINE NOISE, 1996.
- [16] UK Institute of Acoustics: “A good practice guide to the application of ETSU-R-97 for the assessment and rating of wind turbine noise” (the UK Institute of Acoustics guidance), May 2013.
- [17] Devore, Jay L. (2011). *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences* (8th ed.). Boston, MA: Cengage Learning. pp. 508–510. ISBN 978-0-538-73352-6.

- [18] IEC 61672-1:2013 - Electroacoustics - Sound level meters - Part 1: Specifications
- [19] "Noise Measurements in Windy Conditions", R.A. Davis & M.C. Lower, ISVR Consultancy Services. ETSU Report W/13/00386/REP (1996).
- [20] IEC 61400-11:2012 - Wind turbines - Part 11: Acoustic noise measurement techniques