



SLOVENSKO DRUŠTVO ZA AKUSTIKO
SLOVENIAN ACOUSTICAL SOCIETY



Univerza v Ljubljani
Fakulteta za *gradbeništvo in geodezijo*

Hrup vetrnih elektrarn in mogoči vplivi na življenjsko okolje

Mednarodni znanstveni posvet

**Wind turbine noise and possible impacts on living
environment**

International scientific consultation



ZBORNİK PRISPEVKOV

Ljubljana, 15. 1. 2020

Hrup vetrnih elektrarn in mogoči vplivi na življenjsko okolje. Mednarodni znanstveni posvet.
Wind turbine noise and possible impacts on living environment. Expert consultation.
Zbornik recenziranih znanstvenih prispevkov / Book of peer-reviewed papers

Glavni in odgovorni urednik / Editor-in-chief

doc. dr. Mateja Dovjak, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, predsednica Slovenskega društva za akustiko (SDA)

Uredniški odbor / Editorial board

doc. dr. Mateja Dovjak

prof. dr. Mirko Čudina, upokojeni profesor, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, SDA

dr. Ferdinand Deželak, Zavod za varstvo pri delu, Ljubljana, SDA

dr. Rok Prislan, InnoRenew CoE, SDA

Organizacijski odbor / Organisational board

doc. dr. Mateja Dovjak,

prof. dr. Mirko Čudina

dr. Ferdinand Deželak

prof. dr. Matjaž Mikoš, dekan Fakultete za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani

Znanstveni odbor, recenzenti / Scientific board, reviewers

prof. dr. sc. Tino Bucak, University Campus Borongaj, Zagreb, Croatia, president of the Alps Adria Acoustics Association and Acoustical Society of Croatia (HAD)

prof. dr. sc. Kristian Jambrošič, Faculty of EE and Computing, Zagreb, Croatia, secretary of the HAD

prof. znanst. svet. dr. Aleš Krainer, upokojeni profesor, Univerza v Ljubljani, IAS, SDA

Bibliografsko informacijska podpora / Bibliographic information support

doc. dr. Teja Povh, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani

Oblikovanje in naslovnica / Page layout and cover page

prof. znanst. svet. dr. Aleš Krainer

Izdajatelj / Publisher

Slovensko društvo za akustiko, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana, Slovenija

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana, Slovenija

Kraj in leto izdaje / Place and year

Ljubljana, 2020

Naklada

8 tiskanih izvodov

Publikacija je brezplačna.

E-oblika dostopna na URL: <http://repozitorij.uni-lj.si> in <http://www.dlib.si> in <http://drustvo-akustika.si>

Kataložni zapis o publikaciji (CIP) pripravili v Narodni in univerzitetni knjižnici v Ljubljani

COBISS.SI-ID=297986304

ISBN 978-961-6884-58-7 (pdf)

Zbornik recenziranih znanstvenih prispevkov je nastal v sklopu mednarodnega znanstvenega posveta Hrup vetrnih elektrarn in mogoči vplivi na življenjsko okolje, ki ga je organiziralo Slovensko društvo za akustiko v sodelovanju s Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo UL, 15. 01. 2020 na Jamovi cesti 2 v Ljubljani.

Book of peer-reviewed papers was made within the international scientific consultation Wind turbine noise and possible impacts on living environment, organised by the Slovenian Acoustical Society and Faculty of Civil and Geodetic Engineering, University of Ljubljana, 15. 01. 2020, Jamova cesta 2, Ljubljana.

Prispevki so recenzirani. Za vsebino posameznega prispevka so odgovorni njegovi avtorji.

Articles are peer reviewed. The sole responsibility for the content of each paper lies with the authors.

Naslovnica pridobljena v februarju 2020 s strani:

Don Quixote fighting windmills. From Stories of Don Quixote: Written Anew for Young People (page 80), published in 1910 (source), written by James Baldwin and illustrated by G.A. Harker.

<http://3.bp.blogspot.com/-0-ki-X5R1->

[w/U6bDYhmKyQI/AAAAAAAAARrA/KnzTMcnHsPo/s1600/Don+Quijote.jpg](http://3.bp.blogspot.com/-0-ki-X5R1-w/U6bDYhmKyQI/AAAAAAAAARrA/KnzTMcnHsPo/s1600/Don+Quijote.jpg)

Copyright © by Slovenian Acoustical Society and Faculty of Civil and Geodetic Engineering, University of Ljubljana. All rights reserved. Reproduction and propagation under the law of copyright is not allowed! /

Copyright © Slovensko društvo za akustiko in Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani. Vse pravice pridržane. Reproduciranje in razmnoževanje po Zakonu o avtorskih pravicah ni dovoljeno.



PROGRAM POSVETA

13.00-13.05	doc. dr. Mateja Dovjak: Otvoritev posveta, predsednica Slovenskega društva za akustiko (SDA), Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, UL
13.05-13.10	prof. dr. Matjaž Mikoš: Uvodni pozdravni nagovor, dekan Fakultete za gradbeništvo in geodezijo, UL
13.10-14.10	dr. Branko Zajamšek: Uvodno vabljeni predavanje, Dobre prakse merjenja ter modeliranja hrupa vetrnih elektrarn, Adelaide Institute for Sleep Health (AISH), Flinders University, College of Medicine and Public Health, Australija
14.10-14.30	izr. prof. dr. sc. Antonio Petošić: General problems with description, measurements and assesment of environmental noise parameters in Croatia according ISO 1996-2:2017 and their connectivity with the problems from windfarms noise, University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing, Department of Electroacoustics, Zagreb
14.30-14.50	Odmor
14.50-15.10	dr. Ferdinand Deželak: Vetrne elektrarne in motenost okolja z njihovim hrupom, Zavod za varstvo pri delu (ZVD), Ljubljana
15.10-15.30	dr. Sonja Jeram: Vetrne elektrarne v slovenskih prostorskih načrtih, Nacionalni inštitut za javno zdravje (NIJZ), Ljubljana
15.30-15.50	prof. dr. Mirko Čudina: Vpliv hrupa vetrnih elektrarn, ustanovitelj in dolgoletni predsednik SDA, upokojeni profesor Fakultete za strojništvo, UL
15.50-16.10	Diego Loredan: Zakaj Slovenija ni primerna za vetrne elektrarne, Civilna iniciativa za zaščito Senožških Brd, Senožče
Pisni prispevek	doc. dr. Kristy Hansen: Strategies to improve wind farm noise compliance assessment, Adelaide Institute for Sleep Health (AISH), Flinders University, College of Medicine and Public Health, Australia
16.10-16.30	Razprava in zaključek



KAZALO

UVODNIK	1
AVTORJI	2
 Branko Zajamšek, Kristy Hansen DOBRE PRAKSE MERJENJA TER MODELIRANJA HRUPA VETRNIH ELEKTRARN	5
 Antonio Petošić, Petar Franček GENERAL PROBLEMS WITH DESCRIPTION, MEASUREMENTS AND ASSESMENT OF ENVIRONMENTAL NOISE PARAMETERS IN CROATIA ACCORDING ISO 1996-2:2017 AND THEIR CONNECTIVITY WITH THE PROBLEMS FROM WINDFARMS NOISE	11
 Ferdinand Deželak VETRNE ELEKTRARNE IN MOTENOST OKOLJA Z NJIHOVIM HRUPOM	23
 Sonja Jeram VETRNE ELEKTRARNE V SLOVENSKIH PROSTORSKIH NAČRTIH	35
 Mirko Čudina VPLIV HRUPA VETRNIH ELEKTRARN	43
 Kristy Hansen STRATEGIES TO IMPROVE WIND FARM NOISE COMPLIANCE ASSESSMENT	57
 Diego Loredan JE VETRNA ENERGIJA PRAVA IZBIRA ZA SLOVENIJO?	70



UVODNIK

Mednarodni znanstveni posvet z naslovom Hrup vetrnih elektrarn in možni vplivi na življenjsko okolje, ki je bil 15. 01. 2020 v Ljubljani, je organiziralo Slovensko društvo za akustiko (SDA) v sodelovanju s Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Tematika posveta se nanaša na izkoriščanje vetrne energije kot obnovljivega vira energije, ki sodi med čiste in trajnostne vire. Svetovna zdravstvena organizacija (WHO) uvršča hrup vetrnih elektrarn med pomembne vire hrupa v življenjskem okolju, ker predstavlja pomemben javno zdravstveni in okoljski problem. WHO je v letu 2018 sprejela priporočila za okoljski hrup in je vključila vetrne elektrarne kot nov vir hrupa. Epidemiološke raziskave so pokazale mogoč vpliv hrupa vetrnih elektrarn tudi na kakovost spanja, saj glavni problem predstavlja infrazvok in nizkofrekvenčni hrup, ki ga v veliki meri proizvajajo vetrne elektrarne. Posvet je bil organiziran, ker je problematika vetrnih elektrarn premalo poznana naši širši strokovni javnosti. Ocenili smo, da ozaveščanje o tej problematiki lahko pomaga pri osvetlitvi nekaterih dilem pri umeščanju vetrnih elektrarn v prostor in posledično prispeva k ustvarjanju manj hrupnega življenjskega okolja. Posvet je idejno zasnoval izr. prof. dr. Roman Kunič, pred kratkim preminuli predsednik SDA.

Pri realizaciji posveta so aktivno sodelovali svetovno priznani strokovnjaki na področju hrupa vetrnih elektrarn in nekaj domačih strokovnjakov, ki so nas tako seznanili z najnovejšimi domačimi dosežki na tem področju: dr. Branko Zajamšek raziskovalec na Adelaidi inštitutu za zdravo spanje, Avstralija, dr. Antonio Petošić profesor na Fakulteti za elektrotehniko in računalništvo, Vseučilišča v Zagrebu, dr. Ferdinand Deželak priznan raziskovalec na Zavodu za varstvo pri delu v Ljubljani, dr. Sonja Jeram raziskovalka na Nacionalnem inštitutu za javno zdravje v Ljubljani, dr. Mirko Čudina upokojeni profesor Fakultete za strojništvo, Univerze v Ljubljani, dr. Kristy Hansen docentka na Flinders University v Adelaidi, Avstralija in gospod Diego Loredan predstavnik Civilne iniciative za zaščito Senožeskkih Brd. SDA se pridružuje mnenju Svetovne zdravstvene organizacije, ki ugotavlja, da so potrebne dodatne raziskave, s katerimi bi raziskali mogoče vplive na življenjsko okolje. Z namenom varovanja zdravja in okolja, še zlasti ranljivih skupin prebivalstva, morajo vse odločitve slediti previdnostnemu načelu. Pozivamo ministrstva in vse pristojne institucije k premiku na tem področju in podajo zakonske zahteve in priporočila, ter podprejo raziskave in meritve pri umeščanju vetrnih elektrarn v prostor. Podlaga temu je lahko tudi ta zbornik, v katerem so temeljito obdelani in razsvetljeni različni vidiki problematike vetrnih elektrarn.

Zbornik je sestavljen iz dveh delov. V prvem delu so predstavljeni avtorji, v drugem delu so predstavljeni njihovi prispevki. Vabljeni k nadaljnem branju zbornika recenziranih znanstvenih prispevkov.

Urednica zbornika:
doc. dr. Mateja Dovjak
predsednica SDA, visokošolka učiteljica FGG UL

AVTORJI

Ime, priimek in naziv / Name, surname and title: **dr. Branko Zajamšek**

Organizacija / Affiliation: Adelaide Institute for Sleep Health, Flinders University, Level 2, Mark Oliphant Building, 5 Laffer Drive, Bedford Park SA 5042

Kontaktni naslov / Contact (email): branko.zajamsek@flinders.edu.au

Kratek CV / Short CV:

Dr. Zajamšek je diplomirani akustik (BSc (Hons)), doktor znanosti ter trenutno raziskovalec na Inštitutu za zdravo spanje v Adelajdi v Avstraliji. Dodiplomski študij akustike je opravil na Univerzi v Salfordu v Združenem kraljestvu, na tamkajšnjem akustičnem raziskovalnem centru. Študij je nato nadaljeval na Univerzi v Adelajdi ter univerzi Novega Južnega Welsa v Avstraliji, kjer je leta 2017 zagovarjal doktorsko disertacijo z naslovom *Experimental investigation into airfoil self-noise, blade-tower interaction noise and wind farm noise character*. Pred pričetkom doktorskega študija je delal na odelku za raziskave in razvoj v Microflown Technologies na Nizozemskem, kjer se je ukvarjal z razvojem novih metod za merjenje akustičnih veličin na osnovi merjenja akustične hitrosti delcev. Njegovi trenutni raziskovalni interesi so v modeliranju okoljskega hrupa, njegovem vrednotenju ter razvoju novih metod za vrednotenje vplivov hrupa na spanec. Branko je tudi komentor trem doktorskim študentom, enemu magistrskemu študentu ter član Avstralskega ter Slovenskega društva za akustiko.

Ime, priimek in naziv / Name, surname and title: **izr. prof. dr. Antonio Petošić**

Organizacija / Affiliation (ime in naslov / institution and address): University of Zagreb, Faculty of electrical Engineering and Computing

Kontaktni naslov / Contact (email): antonio.petosic@fer.hr

Kratek CV / Short CV:

Izr. Prof. dr. Antonio Petošić was born 1979 in Požega, and he was studying electrical engineering (radiocommunications and acoustics) at Faculty of Electrical Engineering and Computing, University of Zagreb. He was working as young researcher and Ph. D. student at the Department of Electroacoustics. As practical skills, he has experience in all types of acoustics measurements and modelling (environmental noise, reverberation time and all parameters determined from impulse response), vibration measurements. He has technical exam in the fields of acoustics measurements, projecting noise levels and estimating levels of noise in workstations from all types of sources. He is advisor for some domestic and international companies. The improvement of air conditioning devices' casings and parallel baffled silencers in heat and ventilation systems are tasks he has been doing recently. He was participating in organization of three interlaboratory comparisons in the field of environmental noise and acoustic insulation parameter measurements (air and impact sound insulation) with 40 laboratories, which are accredited for those types of measurements.



Ime, priimek in naziv / Name, surname and title: **dr. Ferdinand Deželak**, strokovni svetnik, dr. tehničnih znanosti

Organizacija / Affiliation: ZVD, Zavod za varstvo pri delu, d.o.o., Chengdujska 25, Ljubljana
Kontaktни naslov / Contact (email): ferdo.dezelak@zvd.si

Kratek CV / Short CV:

Dr. Ferdinand Deželak je bil rojen l. 1955 v Ljubljani. Na FAGG v Ljubljani, oddelek za geodezijo je diplomiral leta 1979, v letu 1981 pa je zaključil višješolski študij fizike-naravoslovna smer na FNT. V začetku leta 1985 je sprejel zaposlitev na Zavodu za varstvo pri delu v Ljubljani, kjer dela še sedaj kot strokovni svetnik na Centru za fizikalne meritve. Njegovo glavno področje dela predstavljajo meritve in analize hrupa in vibracij v delovnem ter naravnem okolju, protihrupne sanacije in teoretična akustika. Leta 1994 je zaključil magistrski študij na FNT, oddelek za matematiko - smer mehanika in si je pridobil naziv magister mehaničnih znanosti. Leta 2005 pa je na Fakulteti za strojništvo doktoriral iz področja impulznega hrupa ter bil promoviran v doktorja tehničnih znanosti. Na mednarodnih kongresih, konferencah ter revijah in časopisih je objavil več znanstvenih in strokovnih člankov in drugih prispevkov. Je član SDA, IIAV, INCE in NYAS.

Ime, priimek in naziv / Name, surname and title: **dr. Sonja Jeram**

Organizacija / Affiliation: Nacionalnem inštitutu za javno zdravje v Ljubljani
Kontaktни naslov / Contact (email): Sonja.Jeram@nijz.si

Kratek CV / Short CV:

Dr. Sonja Jeram je raziskovalka na Nacionalnem inštitutu za javno zdravje v Ljubljani. Dr. Jeramova je doktorirala iz biologije na Univerzi v Ljubljani na področju nevrofiziologije pri zvočni komunikaciji žuželk. S svojim delom je nadaljevala na področju kemijske varnosti in sodelovala kot gostujoča znanstvenica v Evropskem centru za validacijo alternativnih metod (JRC, Ispra). Za njeno delo na področju alternativnih strategij za zmanjšanje rabe živali v poskusih, je prejela nagrado Fundacije Doerenkamp-Zbinden. Zadnjih deset let dela na področju okoljskega hrupa in zdravja ljudi tudi v sklopu evropskih projektov Obzorje 2020.

Ime, priimek in naziv / Name, surname and title: **Diego Loredan**

Organizacija / Affiliation (ime in naslov / institution and address): Civilna iniciativa za zaščito Senožških Brd
Kontaktни naslov / Contact (email): diego.loredan@gmail.com

Kratek CV / Short CV:

Diego Loredan je vodja Civilne iniciative za zaščito Senožških Brd in se aktivno vključuje v dejavnosti, ki so se izvajale na področju postavitve vetrnega parka Senožška Brda.

Ime, priimek in naziv / Name, surname and title: **prof. dr. Mirko Čudina**

Organizacija / Affiliation: ustanovitelj in dolgoletni predsednik Slovenskega društva za akustiko (SDA), upokojeni profesor Fakultete za strojništvo, Univerza v Ljubljani

Kontaktni naslov / Contact (email): mirko.cudina@fs.uni-lj.si

Kratek CV / Short CV:

Prof. dr. Mirko Čudina je diplomiral, magistriral in doktoriral na Fakulteti za strojništvo, Univerze v Ljubljani, je trenutno upokojeni profesor Fakultete za strojništvo, Univerze v Ljubljani. Je avtor več kot 200 znanstvenih člankov, od tega več kot 60 v mednarodnih revijah z IF. Je avtor več učbenikov, knjig, monografij in priložnikov v slovenskem in angleškem jeziku. Bil je gostujoči profesor na univerzah v Oldenburgu, Lyonu in Dunaju. Je ustanovitelj Slovenskega društva za akustiko in bil njegov dolgoletni predsednik in kratek čas tajnik društva. Je soustanovitelj in izmenično predsednik Alpe Jadran akustičnega združenja (AAAA). Bil je tudi 4 leta direktor International Institute of Acoustics and Vibration in predsednik tehničnega odbora „Akustika“ pri SIST. Je član več mednarodnih (EAA, AAAA, IIAV, I-INCE, ICA) in domačih društev (SDA, ZSIS in SDVT).

Ime, priimek in naziv / Name, surname and title: **doc. dr. Kristy Hansen**

Organizacija / Affiliation: Flinders University

Kontaktni naslov / Contact (email): Kristy.hansen@flinders.edu.au

Kratek CV / Short CV:

Dr Kristy Hansen is a Senior Lecturer at Flinders University. She holds a Bachelor of Mechanical Engineering (1st Class Honours) and a PhD from the University of Adelaide. She has contributed to a book on wind farm noise that was published by Wiley in 2017 and papers on the topic of wind farm noise published in the *Journal of the Acoustical Society of America*, *Journal of Sound and Vibration*, *Applied Acoustics* and *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. She is currently working on two textbooks on Acoustics that will be published in 2020 and 2023 by CRC Press. She has also been successful in acquiring Category 1 research income from the National Health and Medical Research Council and the Australian Research Council. She received the highly prestigious and competitive Discovery Early Career Researcher (DECRA) award in 2018. Dr Hansen is currently the principal supervisor on 3 PhD and 1 Masters projects. Her current research interest is environmental noise, with a special focus on wind farm noise. Her research involves propagation modelling, measurements, data analysis and investigation of human perception. She is a member of the Australian Acoustical Society, Acoustical Society of America and the International Institute of Acoustics and Vibration.



DOBRE PRAKSE MERJENJA TER MODELIRANJA HRUPA VETRNIH ELEKTRARN

Branko Zajamšek^{1*} in Kristy Hansen²

¹ Adelaide Institute for Sleep Health, Flinders University, College of Medicine and Public Health, Australia

² College of Science and Engineering, Flinders University, Tonsley, Australia

*Vodilni, korespondenčni avtor: branko.zajamsek@flinders.edu.au (Branko Zajamšek)

POVZETEK

Ta članek vsebuje pregled dobrih praks merjenja ter modeliranja hrupa vetrnih elektrarn (HVE) z pogosto uporabljenimi inženirskimi metodami. Zunanje meritve HVE so zahtevne zaradi prisotnosti vetra, ki prispeva neželjeno kontaminacijo z vetrnim hrupom pri frekvencah nižjih od okoli 50 Hz. Zaradi tega je te nizke frekvence priporočljivo meriti na višini tal, kjer je vpliv vetra na meritve minimalen. Višje frekvence je med tem priporočljivo meriti na tipični višini človeka, to je 1.5 m, kar pomeni, da je priporočljivo zunanje meritve izvajati na dveh višinah. Modeliranje HVE se največkrat izvaja z uporabo inženirskih modelov kot so ISO9613-2, CONCAWE ter Nord2000. Kljub določenim pomanjkljivostim teh modelov pri modeliranju atmosfere in tal, lahko v določenih okoliščinah ponudijo dobre napovedi. Ta članek tako prispeva pregled omenjenih modelov, oceno njihovih prednostih in slabostih ter smernice za njihovo implementacijo pri modeliranju HVE.

Ključne besede: Hrup vetrnih elektrarn, meritve hrupa, modeliranje hrupa



1 UVOD

Merjenje hrupa vetrnih elektrarn (HVE) na prizadetih stanovanjskih lokacijah, to so lokacije kjer se ljudje pritožijo zaradi hrupa HVE, je poseben izziv zaradi velikega prispevka nizkofrekvenčnega hrupa, zahteve po meritvah v vetrovnih razmerah in vplivu atmosferskih razmer na zvočno moč vetrnih turbin in širjenja hrupa od posamezne turbine do bivališča. Za zmanjšanje vpliva nizkofrekvenčnega vetrnega hrupa, so potrebni specializirani vetrobrani za zmanjšanje vpliva turbulenc (oziroma hrupa, ki ga le te povzročajo) na mikrofona. Pri tem gre poudariti, da se vpliv vetra veča z oddaljenostjo od tal, kar pomeni, da so vetrobrani najbolj učinkoviti na nizkih višinah. V tem dokumentu sta tako v odstavku 0 podrobneje opisana dva tipična vetrobrana katera se uporabljata za merjenje HVE.

Skoraj vsaka umestitev vetrnih elektrarn v prostor, zahteva napoved njihove ravni hrupa vetrnih pri okoliških bivališčih. Na splošno je za napovedovanje ravni hrupa na prostem pri dotičnem prebivališču potrebno poznati raven zvočne moči turbine, oddaljenost bivališča od posamezne turbine v vetrni elektrarni, značaj in tip tal med vsako turbino in bivališčem ter meteorološke pogoje (predvsem profil vetra). Ker se razmere na površini tal na dolgih razdaljah precej spreminjajo in ker se atmosferske razmere razlikujejo glede na čas (v dnevu ter letu) in lokacijo, so vsi izračuni narejeni na podlagi standardnih inženirskih modelov zgolj približni. Tako je potrebno rezultate poročati z intervali zaupanja ter opisom meteoroloških pogojev za katere veljajo napovedi. Poleg tega na raven hrupa pri sprejemniku, vpliva izhodna zvočna moč vetrne elektrarne, na katero potencialno vplivajo razmiki med turbinami, dotok vetra v ravnino rotorja, višina turbine, dolžina lopatic in moč turbine. V tem dokumentu so tako v paragrafu 0 predstavljeni trije inženirski modeli kateri se uporabljajo za napovedovanje HVE skupaj z komentarjem o njihovi natančnosti ter praksah dobre rabe.

2 MERJENJE HRUPA

2.1. Vetrobrani

Vetrobrani so akustično prozorni ščiti mikrofonov pred vetrnim hrupom pri merjenju hrupa v naravnem okolju. Osnovni ali primarni vetrobrani so narejeni iz odprto celične pene in se tesno prilegajo po mikrofona. Za mikrofona s 6,35 mm premera, kakršni se po navadi uporabljajo za merjenje HVE, se uporablja krogelni primarni vetrobran z 90 mm premera (glej Slika 1). Mikrofona s primarnim vetrobranom je nato postavljen v večji sekundarni vetrobran plosferične ali sferične oblike (glej Slika 1), kateri je narejen iz okoli 2 cm debele akustične pene katera je prekrita z umetnim krznom. Krzno se uporablja, ker je dobro absorbira turbulentno energijo vetra in ne ustvari dodatnih turbulenc (Wuttke, 2005). Tako pena kot krzno sta pritrjena na plosferično (oziroma sferično) lahko jekleno konstrukcijo, ki je pritrjena na jekleno ploščo premera 1 m, kot je prikazano na Slika 1. Celotna konstrukcija plosferičnega vetrobrana je podrobneje opisana v IEC 61400-11 Ed.3. Sferični vetrobran je med tem sestavljen iz enakih materialov, a je pritrjen na drog visok okoli 1,3 m, kar pomeni, da je mikrofona v središču vetrobrana na višini 1,5 m. Pri obeh sekundarnih vetrobranih je pomembno, da je mikrofona postavljen v središče vetrobrana, saj je tako zaščita pred vetrnim hrupom največja.

Polsferični vetrobran



Jeklena plošča premera 1m in debeline 2 mm.

Sekundarni vetrobran s premerom 450 mm



Primarni sferični vetrobran s premerom 90 mm

Mikrofon

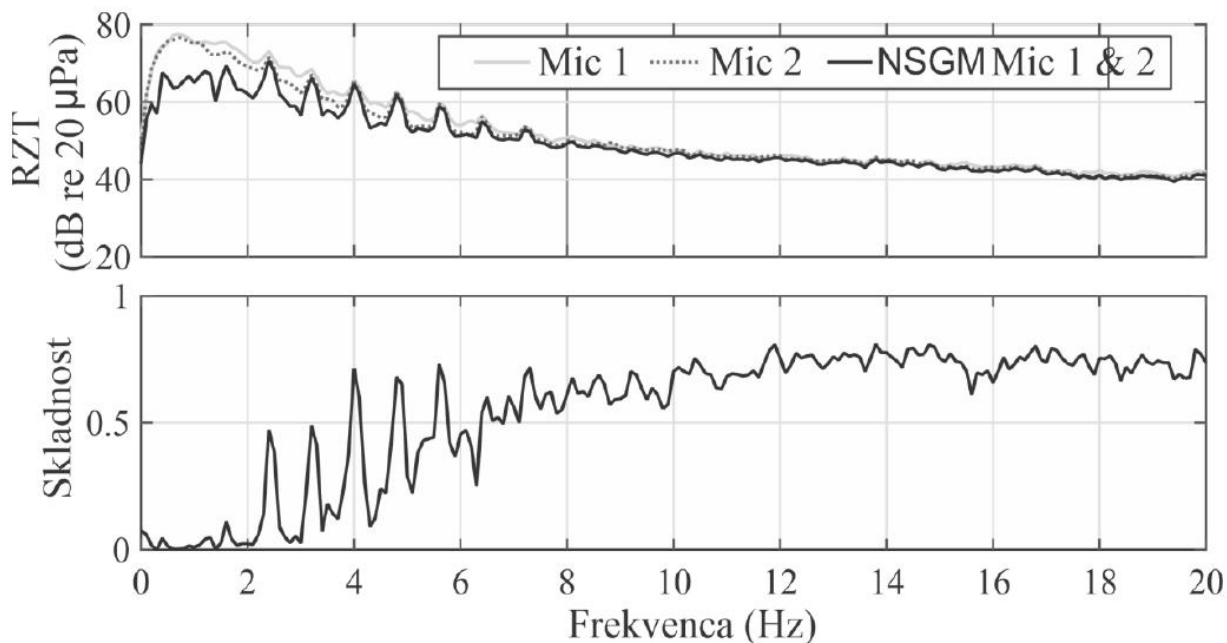
Sferični vetrobran



1500 mm

Slika 1. Poloblatti ter oblatti vetrobran za merjenje HVE v naravnem okolju

Učinkovitost plosferičnega vetrobrana pred vetrnim hrupom je prikazana na Slika 2. Ta slika kaže meritve ravni zvočnega tlaka (RZT) z dvema mikrofonom lociranima 10 m narazen.



Slika 2. Graf navzkrižne spektralne gostote moči (NSGM) (zgoraj) ter skladnosti (spodaj) med dvema mikrofonom v sekundarnem plosferičnem vetrobranu locirana 10 m narazen

Kot je razvidno iz zgornjega grafa Slika 2, je bil v tem primeru vetrni hrup prisoten samo pri frekvencah nižjih od 8 Hz, kar se odraža v razliki med RZT posameznega mikrofona in navzkrižni spektralni gostoti moči (NSGM). NSGM med obema mikrofona je nižja od RZT posameznega mikrofona zato, ker je vetrni hrup nekoherenten med dvema mikrofonom in se v procesu navzkrižne korelacije izniči, kar posledično vodi do nižjih NSGM vrednosti. Pri frekvencah višjih od 8 Hz, sta oba mikrofona podvržena istemu hrupu in je zato navzkrižna



korelacija med njima enaka RZT. Prisotnost vetrnega hrupa pri frekvencah nižjih od 8 Hz je potrjena tudi z meritvami skladnosti med dvema mikrofonoma, prikazanimi v spodnjem grafu na Slika 2, kjer je skladnost pri teh nizkih frekvencah zmanjšana zaradi prisotnosti vetrnega hrupa.

2.2. Višina meritev

Nekatere nacionalne smernice (Avstralija, Nova Zelandija ter Združeno Kraljestvo na primer) merjenje HVE priporočajo na višini 1.2 – 1.5 m. Na tej višini je veter ter s tem povezani vetrni hrup lahko problem, zato so se v praksi uveljavile tudi meritve na tleh, kjer je veter najmanjši. Natančna analiza teh dveh merilnih mest je predstavljena v Hansen et al. (2019) od koder sledi, da je frekvence nižje od 50 Hz najbolje meriti na tleh, medtem ko je za višje frekvenca priporočana višina 1.5 m. Na tej višini se izmeri interakcija med direktnim in od tal odbitim hrupom, kar predstavlja tipičen hrup kateremu je podvržen človek. V tem članku so avtorji tudi pokazali da se meritve na tleh ne dajo preprosto pretvoriti v ekvivalentne meritve na 1.5 m z uporabo preprostega popravka, kar pomeni, da se morajo meritve zato v idealni situaciji izvajati na obeh višinah.

3 MODELIRANJE

Raven zvočnega tlaka pri sprejemniku se z uporabo inženirskih modelov določi z ozirom na raven zvočne moči vira, to je vetrne turbine. Prispevek ravni zvočnega tlaka na lokaciji sprejemnika od posamezne turbine se sešteje na energijski osnovi z neupoštevanjem relativne faze hrupa različnih vetrnih turbin.

Mnogi preprosti inženirski modeli kot so ISO9613-2 (1996), CONCAWE (Marsh, 1982) ter NORD2000 (DELTA, 2002) se uporabljajo za modeliranje HVE med katerimi je ISO model najbrž najbolj priljubljen. K njegovi priljubljenosti najbrž največ prispeva njegova dobra natančnost glede na preprostost modela in grobih predpostavk na katerih je model osnovan. Vsi trije modeli so podrobneje opisani v naslednjih poglavjih.

3.1. ISO9613-2 (1996) model

Ta model izračuna A-vrednoteno ekvivalentno raven hrupa za 1/3 oktavne pasove med 63 Hz ter 8 kHz upoštevajoč vplive tal, terena, ograj, rastlinja, višino vira ter nekatere druge. Kakorkoli, model ne upošteva meteoroloških vplivov, kar je morebiti tudi njegova največja slabost.

Nekaj priporočil za uporabo ISO9613-2 modela pri modeliranju HVE, ki so v glavnem povzeta po Perkins et al. (2013):

- Za izračun vpliva tal se naj uporabi enačba 9 v standardu. V primeru pa, da spekter zvočne moči ni na voljo, je vpliv tal -3 dB.
- Koeficient G za tla mora biti 0, kar pomeni, da se tla smatrajo kot trda površina (to velja tudi za tla ki so pokrita s travo, na primer), kar predstavlja najslabše akustične pogoje.
- Negotovost pri zvočni moči turbine mora biti upoštevana. V kolikor ta ni znana, naj se uporabi ± 2 dB.



- Višina sprejemnika naj bo na 4 m, zato da se zmanjša potencialni prevelik vpliv talnih vplivovov v bližini sprejemnika.
- Uporabi naj se temperatura zraka 10°C ter 70% vlažnost zraka za modeliranje dokaj nizke zvočne absorpcije zraka.
- V primeru da vetrna turbina ni vidna z lokacije sprejemnika, se naj prostorski vplivi omejijo na največ 2 dB.
- Dodaten popravek v višini 1,5 dB (pri $G = 0$) naj se doda končnim splošnim rezultatom v primeru, da hrup potuje preko konkavnega terena (na primer manjše doline).

Kljub temu da se z ISO9613-2 modelom modelirajo najslabši možni pogoji, kot so trda tla in so tako napovedi konservativne, to še ne pomeni, da so s tem kompenzirane tudi vse negotovosti povezane z modelom. Za pregled teh negotovosti ter njihovo analizo je bralec napoten k Hansen et al. (2017) od koder je razvidno, da je realistična natančnost, ki jo ta model lahko doseže okoli ± 4 dB, kar je pomembno imeti v mislih pri interpretaciji napovedi.

3.2. CONCAWE model

Ta model je bil razvit na podlagi virov višine do 25 metrov nad tlemi in se običajno uporablja do razdalje 2 km od vira hrupa. Za napovedi HVE z uporabo CONCAWE se običajno predpostavljajo najslabše meteorološke razmere (kategorija vremena 6), ki veljajo za vse vetrne turbine in lokacije sprejemnikov. V nasprotju z ISO9613-2, se pri tem modelu uporablja popolnoma absorpcijska podlaga ($G = 1$), saj se je izkazalo, da trda podlaga vodi k precejšenim napovedim (Malcolm Hunt Associates and Marshall Day Acoustics, 2007). Vrednosti absorpcije zraka določene s standardom ISO9613-2, se uporabljajo tudi za napovedi z CONCAWE.

CONCAWE model, prav tako kot ISO9613-2, se najbolje odnese za napovedi pri konkavnem terenu med virom in sprejemnikom. Za raven ali nagnjen teren na drugi strani, pa lahko pričakujemo napihnjene napovedi vse tja do + 6 dB (Evans in Cooper, 2012).

3.3. NORD2000 model

Nord2000 je nordijska metoda napovedovanja hrupa iz okolja in je preverjena metoda za napovedovanje HVE (DELTA, 2002). To je edina metoda napovedovanja, ki dovoljuje natančno specifikacijo meteoroloških razmer (predvsem vetrnega profila), kar pomeni da se lahko uporablja za napovedovanja hrupa pri poljubnih hitrostih vetra. Ta fleksibilnost pa tudi pomeni, da so vhodni parametri za ta model lahko relativno kompleksni v primerjavi z ISO ter CONCAWE modeloma, kar v praksi zahteva natančne meteorološke meritve za natančne napovedi hrupa. Na žalost se trenutno tako natančne meteorološke meritve za potrebe modeliranja hrupa načeloma ne izvajajo in tako polni potencial te metode ostaja neizkoriščen.

3.4. Zaključne misli o modeliranju

Kot smo že omenili, je upoštevanje negotovosti pri modeliranju velikega pomena. Naše izkušnje s tem so, da se negotovost redko poroča in to kljub temu, da so napovedi HVE pogosto predmet sodnih obravnav in bi zato pričakovali intervale negotovosti okoli napovedi. Kakorkoli, poročanje intervalov negotovosti je dobra praksa ne le zato ker je tehnično pravilnejša od točkovnih napovedi, temveč tudi zato, ker omogoča boljše statistično primerjavo med napovedmi ter kasnejšimi meritvami HVE.



Različne vrste hrupa vetrnih turbin izhajajo predvsem iz krožnega gibanja lopatic ter so tako aerodinamične narave. Ti gibljivi viri so kompleksni in prav tako je njihova porazdelitev po ravnini, kar posledično pomeni da je zaradi tega enako kompleksna tudi širitev hrupa od turbine do bližnjih bivališč (predvsem tistih oddaljenih samo nekaj sto metrov). Vsi modeli opisani v tem paragrafu, poenostavijo vetrno turbino na preprost stacionarni monopolni vir, kar je seveda v grobem nasprotju z realnostjo in zato pomembno prispeva k nenatančnosti napovedi. Kakorkoli, ena izmed popularnih metod za napoved hrupa HVE sposobna zajeti to aerodinamično kompleksnost vetrne turbine je numerično reševanjem parabolične enačbe (PE) (Cote, 2019). V tem kontekstu gibljivih virov, je vetrna turbina docela unikaten industrijski vir hrupa, ki zato morebiti zahteva boljše metode napovedovanja hrupa (kot je PE, na primer) od standardnih opisanih v tem članku. Natančnejše napovedi HVE bi pomembno izboljšale prostorske umestitve vetrnih elektrarn v prostor ter s tem posledično zmanjšale število pritožb in morebitnih sodnih postopkov.

5 ZAKLJUČEK

V tem članku sta podrobno opisana dva vetrobrana katera se najpogosteje uporabljata za meritve HVE na tleh ter 1,5 m od tal. Mi priporočamo da se za najboljše možne rezultate meritve HVE izvajajo na obeh prej omenjenih višinah.

Predstavljeni so bili trije priljubljeni inženirski modeli, kateri se pogosto uporabljajo za napovedovanja HVE. Bistvena razlika med temi modeli je v modeliranju meteoroloških pogojev, ki so kompleksen pojav, in zato pomembno vpliva na splošno kompleksnost modela. Kakorkoli, poznavanje meteoroloških pogojev je bistveno za natančno modeliranje vira hrupa in še pomembnejše za modeliranje njegove širitve od vetrne turbine do okoliških stanovanjskih lokacij. S tem v mislih bi korak od uporabe preprostih inženirskih modelov k uporabi sodobnejšim modelov sposobnih upoštevati meteorološke pogoje, bil nadvse dobrodošel, saj bi od natančnejšega modeliranja imeli veliko korist tako vlagatelji v vetrne elektrarne kot okoliški prebivalci.

REFERENCE

Marsh K. 1982. The CONCAWE model for calculating the propagation of noise from open-air industrial plants. *Applied Acoustics*, 15, 411–428. Dutilleux G.; Defrance J.; Ecoti`ere D.; Gauvreau B.; B´erengier M.; Besnard F.; Duc EL. 2010. Nmpb-routes-2008: the revision of the french method for road traffic noise prediction. *Acta Acustica united with Acustica*, 96(3), 452–462.

ISO 9613-2 1996 Acoustics: Attenuation of sound during propagation outdoors.

Perkins R.; Cand M.; Davis R.; Hayes M.; Jordan C. 2013. The production of a Good Practice Guide to assess wind turbine noise in the united kingdom using ETSU-R-97. 5th International Meeting on Wind Turbine Noise, Denver, Colorado.

Hansen K.; Zajamsek B.; Hansen C. 2017. Wind Farm Noise Uncertainty: Prediction, Measurement and Compliance Assessment, *Acoustics Australia*, DOI: 10.1007/s40857-017-0114-7



- IEC 61400-11 Ed.3.0 2012 Wind turbines - part 11: Acoustic noise measurement techniques.
- Malcolm Hunt Associates and Marshall Day Acoustics. 2007. Stakeholder Review & Technical Comments: NZS 6808:1998 Acoustics – Assessment and measurement of sound from wind turbine generators. Report prepared for New Zealand Wind Energy Association and EECA, Wellington, New Zealand.
- DELTA. 2002. Nordic Environmental Noise Prediction Methods, Nord2000 – Summary Report, Lyngby, Denmark.
- Wuttke J. 2005. Microphones and wind. *Journal of the Audio Engineering Society*, 40(10), 809–817.
- Cote B. 2019. Extended source models for wind turbine noise propagation. *Journal of the Acoustical Society of America* 145 (3), 1363–1371.
- Hansen K.; Zajamsek B.; Hansen C. .2019. Investigation of a microphone height correction for long-range wind farm noise measurements, *Applied Acoustics*, 155, 97--110



GENERAL PROBLEMS WITH DESCRIPTION, MEASUREMENTS AND ASSESMENT OF ENVIRONMENTAL NOISE PARAMETERS IN CROATIA ACCORDING ISO 1996-2:2017 AND THEIR CONNECTIVITY WITH THE PROBLEMS FROM WINDFARMS NOISE

Antonio Petošić¹, Petar Franček¹

¹ University of Zagreb, 00386 6129620, antonio.petosic@fer.hr

*Corresponding author: Antonio Petošić

ABSTRACT

Background / Introduction: In this paper, the main problems with measurement and assesment of environmental noise parameters in Croatia will be discussed in general and more also specific connected with wind farm noise where meteorological conditions play significant role in the assesment of residual noise and specific noise produced by the source.

Methods: The main problems with determination of residual noise in the proposed intervals (day and night) by Croatian bylaws and ISO 1996:1,2: 2017 standards, determination of meteorological windows and short time measurements in favourable and very favourable conditions are considered together with estimations of measurement uncertainty when the measurement intervals are sliced into several measurement samples.

Results: The common mistakes from accredited laboratories according ISO 17025:2017 in analyzing and reporting measurement results are presented through experience in organizing interlaboratory comparison in the field of measurement and modelling environmental noise parameters with and without meteorological conditions having influence on the results. The simple calculations of sound pressure level from problematic wind farm noise by assuming known electrical power at maximum operating conditons of working is done by assuming favourable and unfavourable propagation conditions.

Conclusions: There are different approaches in dealing with measurement data from sources when meteorological conditions plays significant role in estimation of environmental noise parameters (especially on background noise). The estimation of measurement uncertainty is a problem when there is a difference between overall noise level and background noise level is less then 3 dBA for A-weighted equivalent levels.

Key words: environmental noise parameters, meteorological windows, measurement positions, measurement uncertainty, limit values regarding residual noise



1 INTRODUCTION

Measurement of environmental noise parameters represents difficult task in some complex situations when meteorological data have influence on obtained measurement results due to unfavorable, neutral, favorable and very favorable propagation conditions (ISO 1996-2:2017; ISO 1996-1:2016). Accredited labs according ISO 17025:2017 should chose approximately the same measurement location for imission place (proposed by the national bylaws if defined in measurement procedure), the same minimum duration of measurements (5, 10 or 15 minutes if source is stable) or longer duration time (day or night), several days, evening, nights, several weeks, or full year, the same measurement procedure regarding the statistical analysis of data and calculation of expanded measurement uncertainty. The assessment of obtained (sound descriptor or overall A-weighted equivalent level) with limit values given in bylaw (bylaw about the maximum equivalent rating levels in the spaces where people are living and working) should also be done according the same chosen zones in urbanistic plans. The main problem is that in majority of places the noise zone is not connected with urbanistic zone. Also, in Croatia the proposed measurement position is 0,5 m in front of the open openings (window, balcony) of the most exposed object toward the dominant sound source where is usually impossible to put microphone due to bad relationships between owner of the source or bad weather conditions (cold weather). According the bylaw about activities which should be treated with noise abatement methods (after the measurements), the measured specific (total) level when the sound source is working is assessed in comparison with residual noise level assuming the known noise zone (usually +1 dBA allowed increased equivalent level if residual noise level is lower than zone limit value or level of the source alone=allowed maximum zone level – 5 dB(A). The second approach is when the noise level from the industrial plant is compared with limit value of the zone (inside the industrial and outside is usually the residential or mixed zone). This second approach is more suitable for source owner (higher allowed noise level) and the first approach is more suitable for people because the new source level should be lower. The second approach protects the limit value of residential or mixed zone if sound source is in industrial zone, but it is very difficult to make noise abatement methods which will allow increase of only 1 dB(A) of any new large industrial source. The problem in Croatia because in bylaws is proposed the measurement of residual noise when their level is minimal in some period of time (during day, night). It is very problematic to determine minimal level of residual noise because it is under big influence of other noise sources (road, rail and air traffic, neighbor activities) and in hilly terrain under the influence of weather conditions (favorable, very favorable, neutral, non-favorable) according ISO 1996-2:2017 or upwind, downwind according ISO 1996-2:2007.

The large technical problem in new standard (ISO 1996-1:2016) represents the measurement of meteorological data with higher precision simultaneously with logging environmental noise parameters in defined intervals. The meteorological data are often just measured in 10 min intervals and the selection of noise samples obtained in favorable and very favorable conditions are needed if short term measurements are done (few days, or one week). In normal situations (open terrain around Zagreb) and shorter distances between source and receiver according eq.11 in ISO 1996-2:2017 the meteorological conditions are always nonfavorable or neutral during the day period and favorable and very favorable during the night period. The big problem is during the measurement of environmental noise parameters when meteorological conditions have to be measured is discussed regarding the measurement at lower heights than proposed (4 m or 6 m instead 10 m as proposed in standard) due to the

location of meteorological station regarding the position of other objects nearby. The main problems are presented in this paper regarding the choosing appropriate statistics when time intervals of noise samples are not the same together with calculation of experimental measurement uncertainty when there is different weight of noise samples and showing meteorological windows during the measurements when they should be determined.

2 METHODS

The interlaboratory comparison (ILC-2019) in the field of description, measurement and assessment of environmental noise parameters from stable industrial source and local road traffic by analyzing individual noise events (passenger cars, heavy and medium heavy vehicles) in accordance with ISO 1996-2:2017 has been organized in 2019 (July-October) (Petosić, 2019).

The ILC had purpose not to compare the measurement results but also to see different laboratory procedures by choosing the correct measurement positions (Position 1-free field on the border between two objects and position 2-in front of the façade and do appropriate adjustments due to influence of the reflected field), measurement procedure and data analysis (averaging, calculation of measurement uncertainty, determination of meteorological windows).

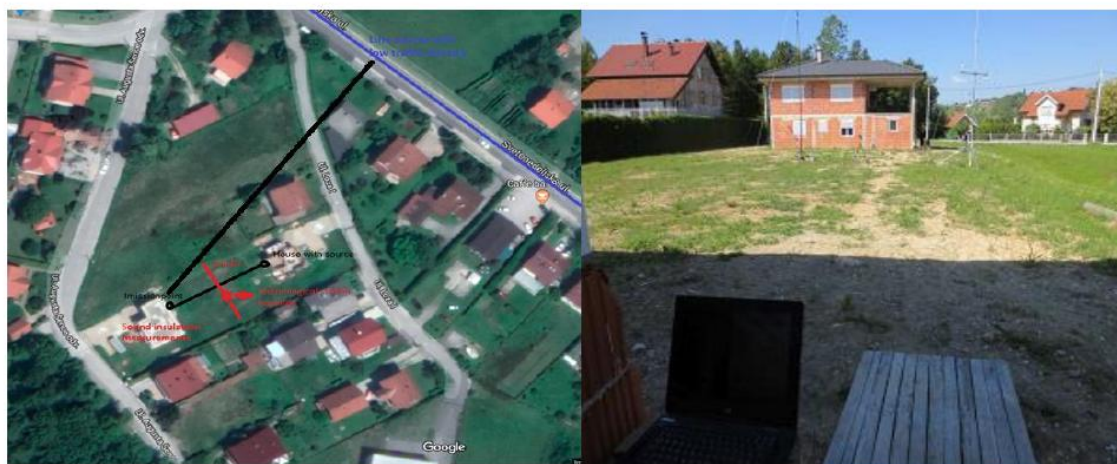


Figure 1. Measurement locations of three immision points (two for stable source and one for traffic) and position of meteorological stations (organizer's and participant's)

In addition, modelling the stable industrial source and local road noise has been done according ISO 9613-2:1997 or CNOSSOS-EU method. Some laboratories which have meteorological station have been measured meteorological conditions at 10 m (or 6 m) height). The meteorological data were compared with organizer meteostation (10 m and 4.3 m height) to check meteorological traceability. The organizer has prepared the excel tables which should have been filled with measured environmental noise parameters and meteorological data. The example of the excel table with data is shown in Table 1.

Table 1. The measured data in ILC-environmental noise parameters according ISO 1996-2:2017

Number of measurement (n)			
Measurement position			
Date of measurement			
Start of measurement (hh:mm:ss)			
End of measurement (hh:mm:ss)			
Time interval(min)			
Height of microphone h_r (m)			
Distance from the source D (m)			
Height of the source h_s (m)			
Eq.11 ISO 1996-2:2017 $(h_s+h_r)/D$			
Free field correction (dB)			
Measured value- L'_{Aeq} (dB)	Averaged values:	Standard deviation-s	Experimental measurement uncertainty ($u_{sou}=s/\sqrt{n}$)
Correction factor due to residual noise (from averaged value) (dB)			
Corrected value L_{Aeq} due to position and residual noise-averaged (dB)			
Tonal penalty K_T			
Impulse penalty K_i			
Rating value L_{Req} (dBA)			
L'_{A95} (dB)			
L'_{A1} (dB)			
$L'_{C,peak}$ (dB)			
$L'_{A,99}$ (dB)			
$L'_{A,max}$ (dB)			
L'_{AE} (dB)			
L_d			
Number of vehicles (passenger cars)			
Number of vehicles (medium heavy)			
Number of vehicles (heavy)			
Wind speed			
Wind Direction			
Angle source-microphone			
Pressure, Humidity, temperature			
Meteorological window (if relevant for this position (fill anyway to see the influence of perpendicular wind component)			



The laboratories should have done the measurements of stable source (several samples of measured noise parameters samples which could last different intervals due to erasing some sound events) and do the averaging (logarithmic with included different duration of intervals), and to calculate measurement uncertainty. The measured overall value (L'_{Aeq}) should have been corrected due to influence of residual noise ($L_{A,eq,back}$) and rating value of the source ($L_{R,Aeq}$) and sound descriptors (L_d , L_{den} , $L_{den,365}$) should have been found in the procedure at two measurement positions. The classical standard deviations (s , S), experimental standard deviations (u) when the source (u_{sou}) is working and also when residual noise is measured (u_{res}) and overall measurement uncertainty for A-weighted equivalent sound pressure level (U) are calculated for each laboratory and it will be calculated for overall ILC2019 when the majority data will be collected from participants.

3 RESULTS

3.1. Environmental noise parameters-stable source and road noise

The main problems for organizer was that some laboratories haven't averaged the results in correct manner (the organizer gave the formula which account the measurement intervals into account and some labs have used the formula assuming that all samples last the same time. The organizer provided the non-automatic formulas for calculation standard deviations s and S assuming the same duration of measurement intervals but the participants should use their procedures for data analysis or modify the organizer procedures for data averaging and calculation of meteorological windows. The majority of labs have chosen the same interval for measurement of residual noise and specific noise from the sound source. Some labs haven't provided A-weighted spectrum and in Croatia it is not clearly defined how to determine tonal adjustment due to presence of tone at 10 kHz (objective or subjective method described in standards (ISO 1996-2:2017; ISO 1996-1:2016). All Slovenian labs have used the method proposed in their bylaw.

The residual noise level varies much more during individual measurements of each lab when compared to the samples of noise when the source is turned on and during measurements on different days. Some labs haven't corrected the background noise levels because they were also measured in front of the façade and also all parameters should be corrected by using this value.

The problems with analyzing local road events was most tedious task because the majority of labs do not analyze sound exposure levels (L_{AE}) to find equivalent level of noise with known number of individual events (passing by of passenger cars, medium heavy and heavy vehicles). Some labs reported their overall results by deleting unknown sound events.

3.2. Wind farm noise measurements and assessment due to background noise

When wind farm noise is analyzed and background noise level is determined there is also no analysis of experimental measurement uncertainty (u_{res} at different wind speeds bins) because it is difficult to distinguish the noise form wind and overall activities of neighbors when wind farm noise is not working. The number of samples (N) in different wind speed bins (1 m/s intervals) is not equal (Bies et al., 2017). It is very difficult to estimate background noise especially at lower wind speeds due to large variation of background noise levels as seen in

Figure 2 and activity of people that should distinguished from noise generated by aerodynamic noise around objects. The noise samples obtained when the source is turned on should be distinguished into samples obtained in favorable (M3) and very favorable conditions (M4).

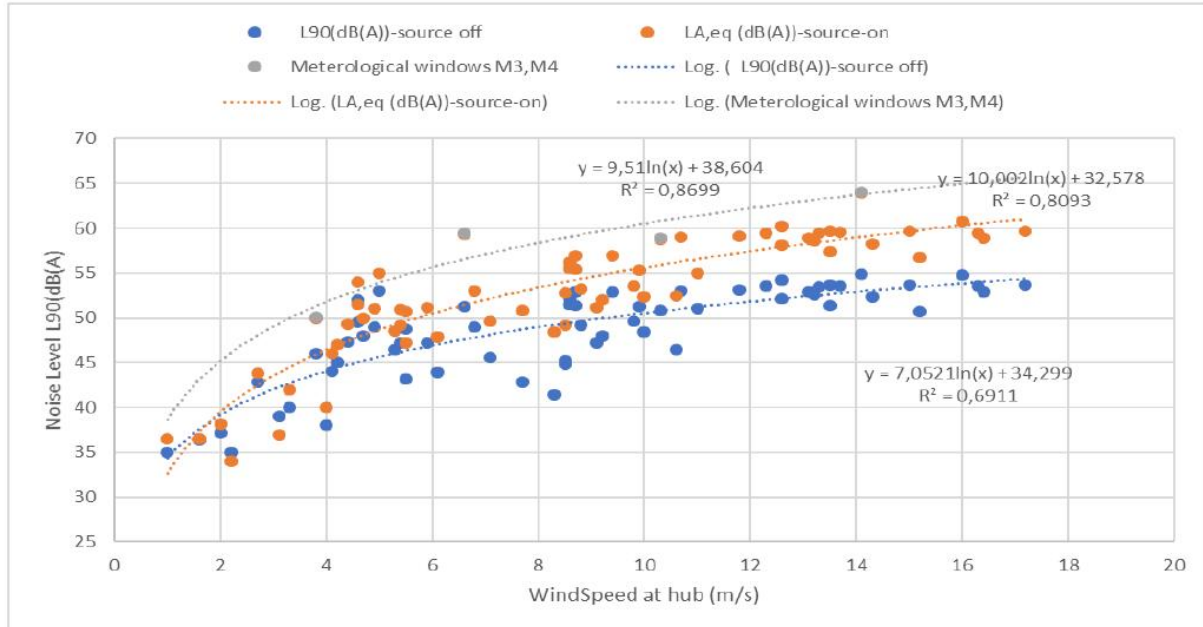


Figure 2. Measurement example of background noise and levels of at different windspeeds and favorable and very favorable propagation conditions and curve fitting with the most appropriate function

The samples when wind turbines are working should be compared with background noise level at different speeds and also according the meteorological windows (M1, M2, M3, M4) described in new standards (ISO 1996-2:2017; ISO 1996-1:2016). The wind speed is measured also at a wind farm turbines aggregates and close to the measurement location to estimate meteorological window close to the imission point locations. There are reported problems that wind speed direction at the site is not same as wind direction at hub (estimated at 10 m assuming logarithmic velocity profile) due to hilly terrain problems and turbulence effects. Usually the windfarm noise A-weighted equivalent noise level is estimated at maximum operating conditions in catalogue data assuming maximum electrical power produced at nominal wind speed given by producers.

3.3. Wind farm noise modelling by using downwind and upwind meteorological corrections

The simple estimation of problematic windfarm noise (5 point sources) at given maximum 2 MW electrical power and assuming downwind and upwind meteorological conditions with divergence (A_{div}) and ground reflection (A_g) in a model according to the known distance and meteorological corrections given in a Table 5.4 in (Bies et al., 2017). The sound power is estimated according eq. 1 (Bies et al., 2017).

$$L_{W,A} = 10.3 \cdot \log_{10}(kW) + 74.9 \text{ (dB re } 10^{-12} \text{ W)} \quad (1)$$

The situation is shown in Figure 3. where the location of wind turbines and immission point is shown. Each wind turbine has been considered as point source with different distance to the immission point and the sound pressure level at immission point has been calculated in upwind and downwind conditions.

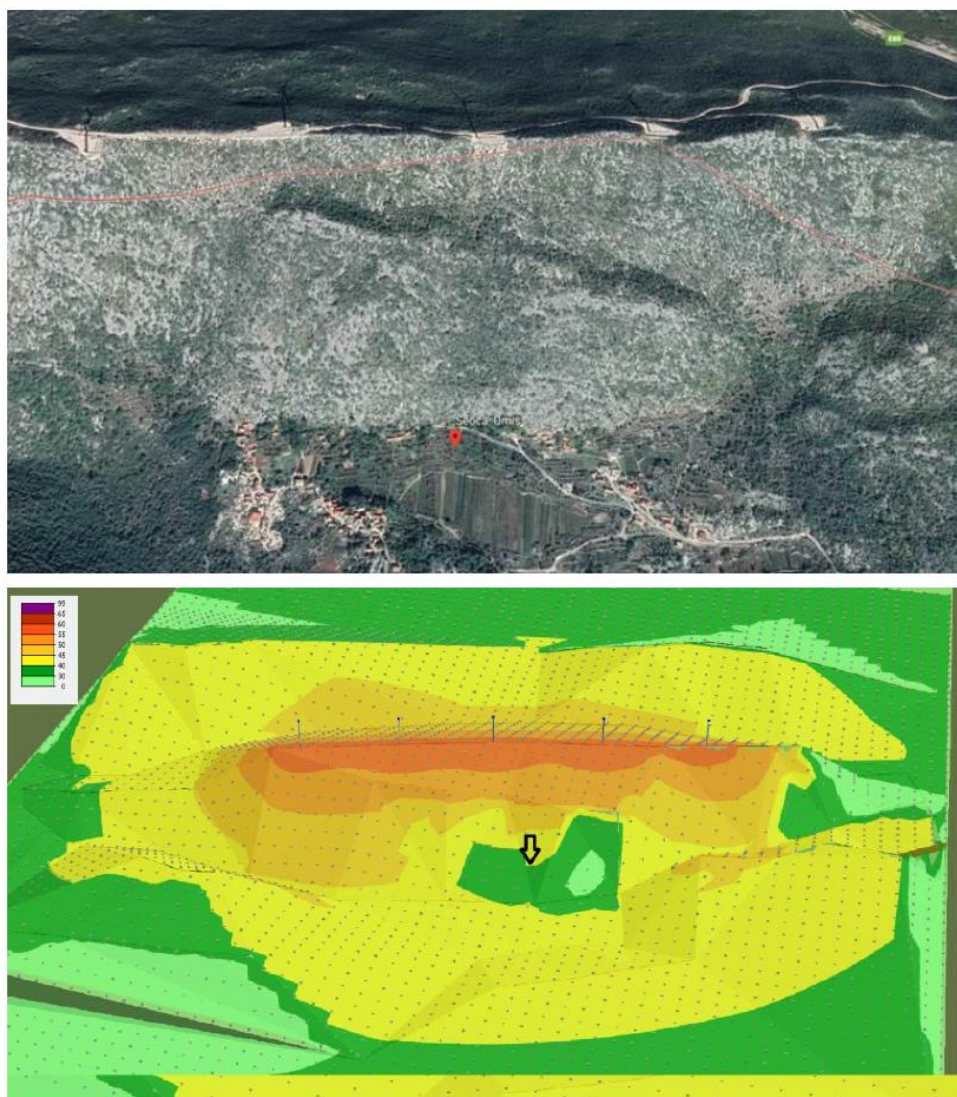


Figure 3. Modelled windfarm noise in neutral, upwind and downwind propagation conditions assuming five point sources and immission point marked with arrow

It is evident that the windfarm noise is different in neutral conditions when A_{met} is negligible compared with situations in downwind and upwind conditions.

Results for A-weighted equivalent pressure levels are shown in Table 1. with estimated overall acoustic power $L_{w,A}$ and effects of attenuation (0,005 dB/m) due to different distances from point sources and due to influence of meteorological (upwind, downwind) and ground reflection effects according to the eq.2 (Hansen, et al., 2017).

$$L_{pA} = L_{WA} - 10 \cdot \log_{10}(d^2 + h_h^2) - 8 - \Delta L_{atm} - A_{met} \quad (2)$$



Meteorological correction has been calculated for A-weighted value at three different distances. The results for A-weighted equivalent sound pressure level are shown in Table 1 with some input parameters.

Acoustic power at relevant wind speeds when maximum electrical power 2MW is obtained, $L_{W,A}$	109 dBA
Distance from middle wind turbine d (m)	600 m
Height of hub (relevant to the receiver) h_h (m)	300 m
Influence of meteorological conditions (for middle poin) A_{met} in neutral conditions	0 dBA
Influence of meteorological conditions (for middle point) A_{met} in upwind conditions	7,5
Influence of meteorological conditions (for middle point) A_{met} in downwind conditions	-5
Equivalent sound pressure level in receiver point L_{pA} (dB(A) in neutral conditions	45 dBA

The given data are not official because the author used empirical equations for calculation acoustic power by knowing electrical power. It is evident that the level of noise at imission point is around 45 dBA with this input data in neutral propagation conditions.

3.4. Meteorological data

Some labs in ILC have measured the meteorological data during all measurement period (background noise at measurement position 1, 2, 3) but have not determined meteorological windows for sources of background noise. The meteorological data should have been measured during the stable source measurements at second position where condition from eq. 11 is not satisfied and correct angle between source and receiver with velocity components in that direction is determined. There is also evident that some labs determine the meteorological windows by using the Table 4 approach from (ISO 1996-2:2017) where only M1 and M4 window exists during the night period measurements. ANNEX-A is more detailed in derivation of meteorological windows. When eq. (11) is satisfied the meteorological parameters should be checked on the microphone heights with self-noise generated due to wind over windshield (chapter 5.1 in (ISO 1996-2:2017)). The organizer compared the measurement data with participants in 1 s intervals if they are provided. Participants provided their meteorological data in 1 s, 1 min, 3 min or 10 min intervals) as averaged value for some measurement period (during Source1Pos2 measurements and S2Position3). Also, the standard deviations od all measured parameters and overall meteorological windows have been compared during the different measurement intervals. The comparison between measured data during one measurement interval at 4,3 m height and 10 m height is shown in Figure 4 with averaging the wind speed magnitude and direction (from device and unwrapped) in 1min intervals.

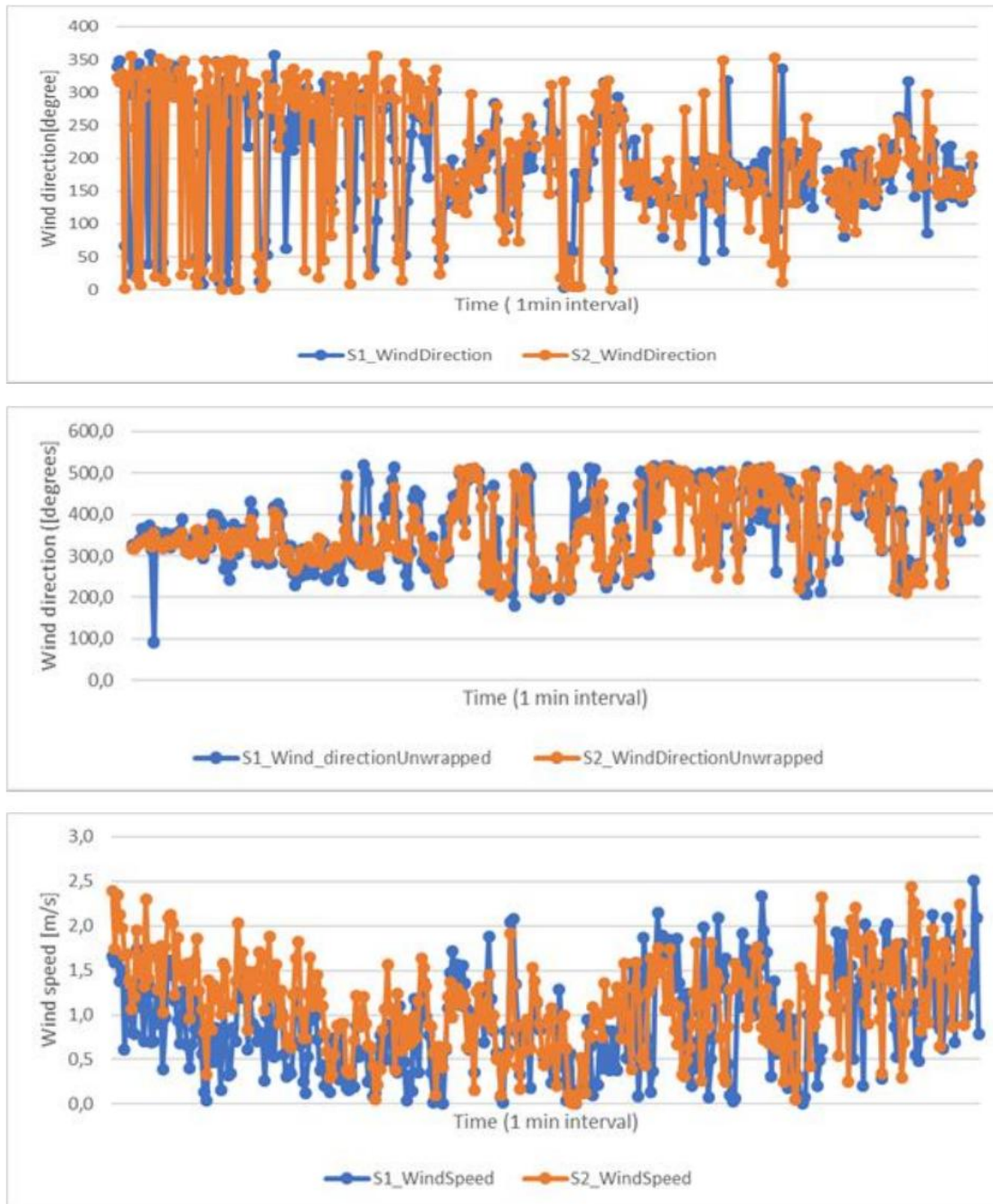


Figure 4. Comparison between meteorological data at two different heights (S1-4.3 m and S2-10 m) up-wind direction from station, unwrapped wind direction and wind speed magnitude from station

When wind direction is not affected from the obstacles (nearby houses) there is a very good agreement between measured values for wind speed magnitude U_0 at $h_0=4.3$ m and U at $h=10$ m according to the eq. (3) (Bies et al., 2017) where ε is wind shear coefficient which depends on the atmospheric stability and surface roughness (Bies et al., 2017; Hansen et al., 2017).

$$U(h) = U_0 \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^{\epsilon} \quad (3)$$

Also, comparison between meteorological data between organizer and one participant is shown in Figure 5. during provided measurement period (when noise from stable industrial noise source is measured).

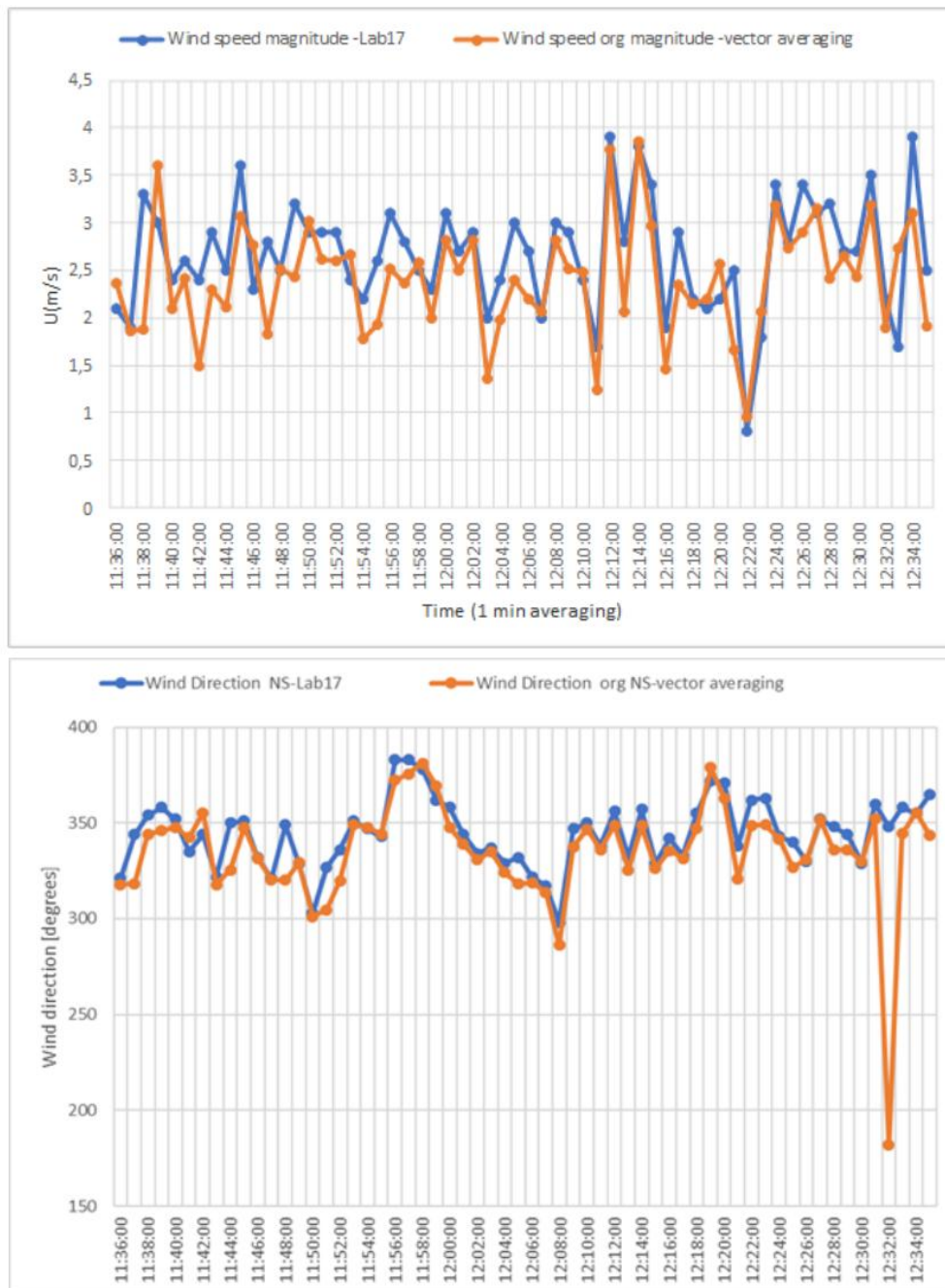


Figure 5. Comparison between the laboratory wind speed measured or estimated at 10m height (up) and between wind direction (down)



4 DISCUSSION

The laboratory should be careful when averaging environmental noise parameters which last different time intervals due to unwanted events appearing (eq. (5) and (6) in (ISO 1996-2:2017)). Also, the standard deviation of the samples depends on the measurement period according to the ANNEX A. It is visible that wind direction is approximately same at different heights but wind speed magnitude can be found from lower to greater height can be found by using eq. when the wind is not coming behind objects. In that case the wind magnitude determination is not correct, and it can have influence in determination of meteorological window. There is also evidence when the laboratories are fitting measured samples with wind speed velocity that different fitting curve is used. Maybe the most appropriate way for fitting the measured noise samples is to use logarithmic function because the acoustic power of aerodynamic noise depends logarithmically with wind speed (Hansen et al., 2017).

5 CONCLUSIONS

It is evident from presented results that different laboratories have different approaches in determination of measurement position, especially in defining the sound field (diffuse or free field at open spaces) correction on the sound level meter, the chosen duration intervals are different (15 or 20 min interval is divided in smaller intervals (1 min, 5 min of time), the procedure averaging and processing data is also vary because the labs do not correct the spectral values due to influence of residual noise, the tonal adjustment determination is different from different labs (especially in Croatia because there is no additional rules defined in bylaw).

ACKNOWLEDGEMENT

This research has been enabled by all participants in Interlaboratory Comparison 2019 which send the obtained measurement results (32/42).

REFERENCES

- ISO 1996-2:2017, Acoustics - Description, measurement and assessment of environmental noise -- Part 2: Determination of sound pressure levels.
- ISO 1996-1:2016, Acoustics -- Description, measurement and assessment of environmental noise -- Part 1: Basic quantities and assessment procedures.
- ISO 17025:2017, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.
- ISO 1996-2:2007, Acoustics -- Description, measurement and assessment of environmental noise -- Part 2: Determination of environmental noise levels.
- Petosić A. 2019. Interlaboratory comparison in the field of environmental noise parameters measurements, noise prediction and sound insulation measurements-ILC2019. <https://www.researchgate.net/project/Interlaboratory-comparison-in-the-field-of-environmental-noise-parameters-measurements-noise-prediction-and-sound-insulation-measurements-ILC2019>
- Bies D.A., Hansen C.H., Howard C.Q.: Engineering Noise Control, CRC Press, 5th edition, 2017.
- Hansen C.H., Doolan C.J., Hansen K.L.: Wind farm noise: measurement, assessment and Control, Wiley 2017.

VETRNE ELEKTRARNE IN MOTENOST OKOLJA Z NJIHOVIM HRUPOM

Ferdinand Deželak

ZVD, Zavod za varstvo pri delu, d.o.o., Chengdujska 25, 1260 Ljubljana

T: +386 1585 51 15, M:+386 41 63 188, F: +386 1585 51 01, Ferdo.dezelak@zvd.si

POVZETEK

Vetrne elektrarne so nameščene na velikih višinah in predstavljajo vir nizkofrekvenčnega hrupa, vključno z infrazvokom. Raziskave kažejo, da kar 85% izpostavljenih prebivalcev jasno zaznava hrup VE že pri ravneh 35 dBA.

Za razliko od visokofrekvenčnega zvoka, ki ga zadržijo oziroma odbijejo že manjše ovire, sta nizkofrekvenčni in infrazvok izredno prodorna, poleg tega se na ovirah močno uklanjata in se posledično širita okrog vogalov raznih objektov in celo preko visokih hribov. Poleg tega pa prodirata tudi v notranjost prostorov, celo tistih, zaščiteneh z masivnimi stenami. Dodatno nevšečnost pri tem predstavlja tudi dejstvo, da se nizkofrekvenčni zvok v zaprtih stanovanjskih prostorih še dodatno ojača zaradi vpliva resonančnih nihanj.

Znano je, da postane približno 30% vseh izpostavljenih prebivalcev močno vznemirjenih, kadar raven hrupa cestno prometnih virov presega 70 dB(A), medtem ko je enak odstotek prebivalcev močno vznemirjen zaradi hrupa VE, katerega raven dosega »komaj« 40 dB(A). Hrup VE je namreč, za razliko od velike večine drugih hrupnih virov, tudi amplitudno moduliran. Takšna vrsta hrupa je invazivna in jo hrup ozadja (na primer ceste) težje zamaskira. Kot pove že samo ime, se pri amplitudno moduliranem hrupu njegova amplituda spreminja s časom, običajno periodično, kot na primer pri sirenah vozil na nujnih vožnjah. Takšen utripajoči hrup močno pritegne našo pozornost, saj izstopa iz ozadja celo v primeru majhnih amplitud oziroma ravni (Perkins and Lotinga, 2017). Običajno nas takšen utripajoč zvok opozarja na previdnost oziroma nevarnost, če pa predolgo traja pa postane nadležen in stresen. Pri vdoru v spalnico lahko takšen hrup onemogoči miren spanec in povzroči druge neprijetnosti prizadetim stanovalcem.

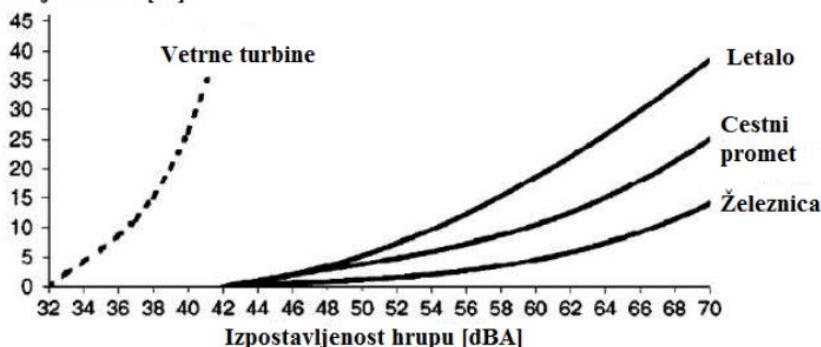
Ključne besede: Vetrne elektrarne, nizkofrekvenčni zvok, infrazvok, amplitudna modulacija, motenost spanja

1 UVOD

Raziskave kažejo, da kar 85% izpostavljenih prebivalcev jasno zaznava hrup VE že pri ravneh 35 dBA. Prav tako je bilo ugotovljeno, da postane približno 30% vseh prebivalcev močno vznemirjenih, kadar raven hrupa cestno prometnih virov presega 70 dBA, medtem ko je enak odstotek prebivalcev močno vznemirjen zaradi hrupa VE, katerega raven dosega »komaj« 40 dBA, še zlasti v nočnem času - slika 1.

Ne glede na to pa trenutno veljavna Uredba, ki omejuje ravni hrupa v okolju, omejuje hrup VE v nočnem času kar na 48 dBA, v dnevnem pa celo na 58 dBA za veliko večino stanovanjskih območij (III. stopnja varstva pred hrupom). Hrup VE je namreč, za razliko od velike večine drugih hrupnih virov, tudi amplitudno moduliran. Takšna vrsta hrupa je invazivna in jo hrup ozadja (ceste) težje zamaskira. Večina razvitih držav ima glede hrupa VE bistveno strožje omejitve, kot pa to velja pri nas.

Močnejše moteni [%]



Slika 1. Primerjava nadležnosti različnih vrst hrupnih virov pri sicer enakih ravneh hrupa

2 METODE

Naloga je zasnovana na osnovi teoretičnih raziskav, upoštevanja fizikalne, še zlasti akustične stroke, veljavnih standardov ter na lastnoročno opravljenih meritvah ob nekaterih pomembnejših VE v Sloveniji in njihovih analizah. Glavne meritve so potekale ob VE Dolenja vas in mala VE Divača.

2.1. Vetrne elektrarne kot vir nizkofrekvenčnega zvoka in infrazvoka

Znano je, da gibanje velikih mas pogosto spremlja hrup, včasih pa tudi zamolklo bobnenje. To se v naravi običajno dogaja ob nevihtah, močnejšem morskem valovanju, ob potresih, izbruhih vulkanov, zemeljskih ter snežnih plazovih in podobno. To bobnenje dejansko predstavlja nizkofrekvenčni zvok in infrazvok (NF in IZV). Čeprav neprijetno in strah vzbujajoče pa nas takšno bobnenje opozarja tudi na prihajajočo nevarnost in s tem v zvezi nosi s seboj tudi koristno informacijo; po drugi strani pa običajno traja le krajši čas. Povsem drugače pa je z velikimi vetrnimi elektrarnami (VE), ki se v zadnjem času postavljajo pri nas. Tudi letala (celo na velikih višinah oziroma oddaljenostih) oddajajo infrazvok in vemo, kako nadležen pojav je to, čeprav običajno traja le kratek čas. O škodljivosti in nadležnosti infrazvoka je pisalo več avtorjev (Perreira and Branco, 2007). Zaradi tega bi morale biti



načrtovanju velikih VE in njihovemu umeščanju v prostor posvečena velika pozornost, kar pa se pri nas žal ne dogaja.

Povprečne stanovanjske stavbe imajo nizko zvočno izolirnost v območju nizkofrekvenčnih in še zlasti infrazvočnih frekvenc, zato so te v primeru nekoliko močnejših hrupnih virov lahko slišne oziroma zaznavne tudi v notranjosti stanovanj. Povprečna zvočna izolirnost stanovanjskih fasad pri zaprtih oknih je v frekvenčnem območju 10 do 25 Hz nižja od 10 dB.

Vendar pa je pri tem potrebno poudariti še eno dodatno značilnost nizkofrekvenčnega hrupa in infrazvoka. Za razliko od visokofrekvenčnega zvoka, ki ga zadržijo oziroma odbijejo že manjše ovire, sta nizkofrekvenčni hrup in infrazvok izredno prodorna, poleg tega se na ovirah močno uklanjata in se posledično širita okrog vogalov raznih objektov in celo preko visokih hribov. Poleg tega pa prodirata tudi v notranjost prostorov, celo tistih, zaščiteneh z masivnimi stenami. Dodatno nevšečnost pri tem predstavlja tudi dejstvo, da se nizkofrekvenčni zvok v zaprtih stanovanjskih prostorih še dodatno ojača zaradi vpliva resonančnih nihanj, podobno kot na primer zvok kitare v njeni votlini (struna kitare pripeta na golo steno bi sama zase namreč proizvedla izredno šibak zvok).

2.2. Ojačanje posameznih nizkofrekvenčnih komponent v prostoru - stoječa valovanja

Raven nizkofrekvenčnega hrupa se lahko občutno spreminja z lego v prostoru. Kadar je geometrija prostora enostavna, na primer pravokotna, in so dimenzije prostora primerljive z valovno dolžino zvoka, lahko pride do izrazitih nihanj zvočnega tlaka v njem. Pri nepravilnih geometrijah prostorov in krajših valovnih dolžinah tovrstni načini nihanj običajno niso izraziti, ker prihajajo do izraza drugi učinki, predvsem difuzija oziroma sipanje.

Spremembe ravni zvočnega tlaka v zaprtih prostorih so sicer lahko znatne in za razliko od visokih frekvenc presegajo 20 dB. Tudi subjektivni občutek glasnosti in še zlasti njegove spremembe so bistveno večje pri nizkih kot pri visokih frekvencah. Prirastek 5 dB pri frekvenci 30 Hz je na primer enakopraven prirastku 10 dB pri 1 kHz, glede na spremembe subjektivnega občutka glasnosti. Ko torej enkrat zaznamo nizkofrekvenčni zvok, postane hitro izredno neugoden. V zaprtih prostorih so prisotni različni načini nihanja zvoka, kar je posledica nastanka stoječih valov, do katerih pride z interferenco med vpadlimi in odbitimi zvočnimi valovi od posameznih sten oziroma raznih ovir v prostoru. Kot rezultat, je lahko raven hrupa kot posledica takšnega stoječega valovanja močno odvisna od lege v prostoru. Načini takšnega nihanja se pojavijo pri določenih frekvencah, ki jih imenujemo resonančne frekvence (eigenfrekvence), pri katerih je oddaljenost med posameznimi amplitudami določena z mnogokratnikom pripadajoče valovne dolžine (Larsen, 1978).

Resonančne frekvence f_0 kvadraste sobe lahko izračunamo s pomočjo enačbe:

$$f_0 = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left[\left(\frac{l}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_z}\right)^2\right]}$$

kjer

f_0 = frekvenca lastnega nihanja Hz

c_0 = hitrost zvoka - 343 m/s pri 20 °C

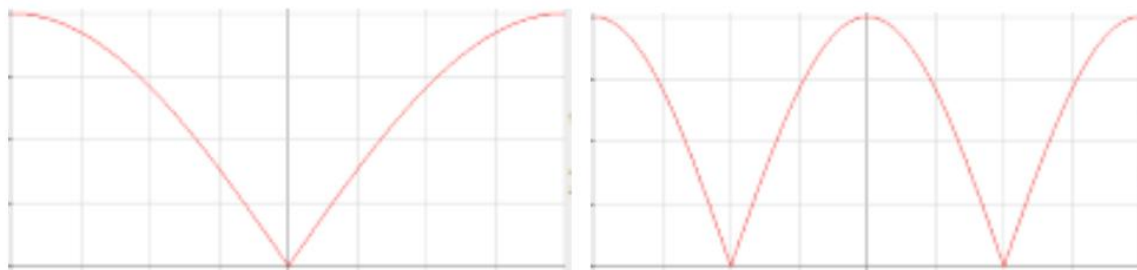
l = način nihanja po dolžini sobe

m = način nihanja po širini sobe

n = način nihanja po višini sobe

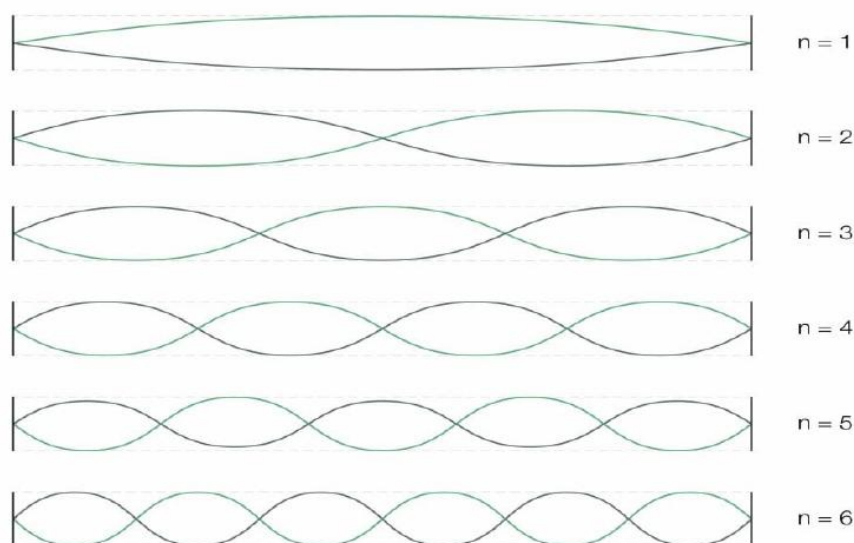
L_x, L_y, L_z = dolžina, širina in višina sobe v metrih

Osnovni način aksialnega nihanja se označi kot način prvega reda, je sinusne oblike in ima ob stenah maksimume zvočnega tlaka, kot je razvidno iz slike 2a, medtem ko ima 2. način nihanja obliko prikazano na sliki 2b



Slika 2. Prvi način nihanja stoječega valovanja (a) in drugi način (b)

Tam kjer so zvočni tlaki največji so hitrosti gibanja delcev najmanjše in obratno. To se običajno dogaja ob stenah oziroma podobnih ravnih ovirah. Slikovito lahko to prikažemo za prvih šest načinov nihanja, z ničelnimi hitrostmi, oziroma maksimalnimi zvočnimi tlaki ob stenah, kot je prikazano na spodnji sliki.

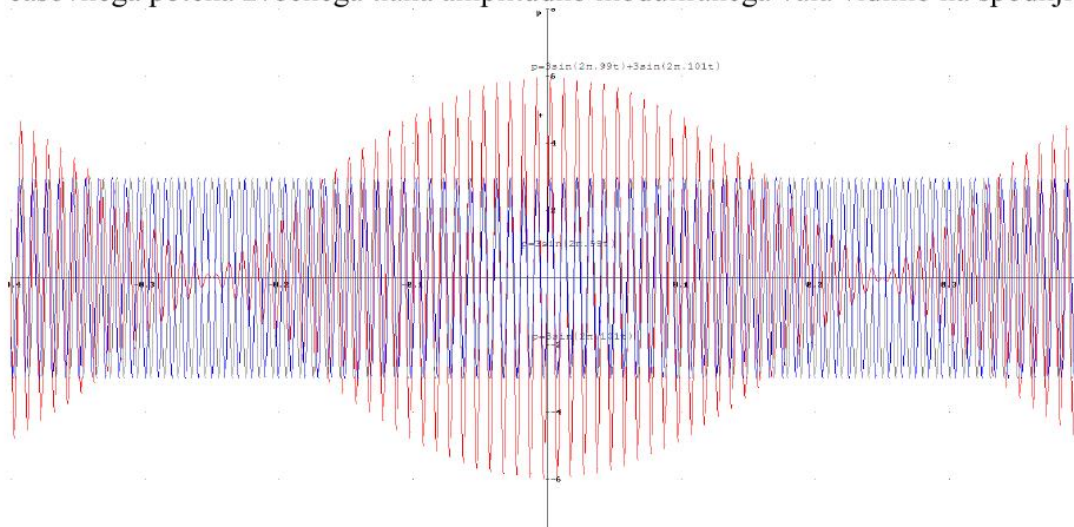


Slika 3. Prvih šest načinov nihanja med dvema vzporednima stenama

2.3. Amplitudna modulacija

Glavni vzrok za motenost okolja s hrupom vetrnih elektrarn pa je predvsem amplitudna modulacija (Kühner, 2016). Med rotacijo njihovih turbinskih lopatic se namreč ustvarja periodični amplitudno moduliran signal, ki ne odstopa bistveno od sinusne oblike. Vzrok za to sta predvsem usmerjenost aerodinamičnega hrupa sproščenega na koncu lopatic ob združitvi tokovnic iz njenega začetka (Lee et al., 2011; Okada, 2016) ter Dopplerjeve ojačitve.

Amplitudna modulacija vetrnih elektrarn ima najpomembnejši vpliv med psihoakustičnimi učinki in s tem povezanimi pritožbami izpostavljenih prebivalcev (Lee et al., 2011). Primer časovnega poteka zvočnega tlaka amplitudno moduliranega vala vidimo na spodnji sliki.



Slika 4. Amplitudnomoduliran val

Kot pove že samo ime, se pri amplitudno moduliranem hrupu njegova amplituda spreminja s časom, običajno periodično. Tipičen primer takšnega hrupa so na primer sirene vozil na nujnih voznjeh. Gre za utripajoči hrup, ki močno pritegne našo pozornost, saj izstopa iz ozadja celo v primeru majhnih amplitud oziroma ravni. Običajno nas takšen utripajoč zvok opozarja na previdnost oziroma nevarnost in v takšnih primerih seveda nosi koristno informacijo. Povsem drugače pa je seveda pri VE, kjer tovrsten hrup neprekinjeno traja, zato postane nadležen in stresen. Pri vdoru v spalnico pa lahko povsem onemogoči miren spanec prizadetim stanovalcem.

2.4. Vpliv stabilnosti atmosfere

Celodnevna nihanja osončenosti vzpostavljajo pogoje za cikle segrevanja in ohlajevanja mejnih atmosferskih plasti, ki se odražajo tudi v spreminjanju dinamičnih vetrnih razmer (Cooper et al., 2014). Ponoči je zrak stabilno porazdeljen, ker je površina tal hladnejša od zraka. Ko prične tekom jasnega dne sonce vzhajati, prične sončno sevanje ogrevati tla hitreje kot zrak. Takoj po sončnem vzhodu prične turbulentni tok prevladovati nad tokom stabilnega nočnega zraka. Z naraščajočo višino se učinek strižnih napetosti na površini, ki vzdržuje turbulenco zmanjšuje, naraščati pa začne vzgonski učinek. Prihaja do živahnega mešanja s toplejšim zrakom.

Debelina plasti s konvektivnim vplivom narašča tekom dneva zaradi nadaljevanja segrevanja površine. Pozno popoldne doseže zrak enako temperaturo kot tla, temperaturni profil postane adiabatni, ker ni več toplotnega toka iz tal. Proti večeru pa temperatura zraka preseže temperaturo tal in rezultirajoč toplotni tok proti tlem povzroči stabilen temperaturni profil. Takšna stabilna plast se tekom noči debeli, podobno kot narašča nestabilna plast tekom dneva.

Vetrni profil, z njim pa tudi pogoji za razširjanje hrupa, je močno odvisen od stabilnosti atmosfere. Van den Berg (2003) je pokazal, da lahko ravni hrupa vetrne elektrarne zaradi

takšnih sprememb tekom dneva nihajo tudi do 15 decibelov, celo pri konstantni hitrosti in smeri vetra na višini 10m.

Atmosferska stabilnost, ki se tekom dneva lahko izrazito spreminja, ima močan vpliv na strižni profil vetra, oziroma na vertikalni gradient njegove hitrosti.

Pogoji za stabilno atmosfero se tako v večini primerov ustvarjajo ponoči, kadar so hitrosti vetra pri tleh nižje kot 2 m/s, hitrosti na višini osi VE pa presegajo hitrosti za obratovanje VE, torej več kot 4 m/s. Stabilna atmosfera nastopi, ko se prično tla ohlajati, to je po sončnem zahodu in so hitrosti vetra pri tleh razklopljene od tistih pri vrhu. Mirni vetrovi pri tleh poskrbijo za tiho ozadje, oziroma hrup drugih nižje ležečih virov. V takšnih razmerah se zvočni žarki lomijo navzdol, kar občutno poveča ravni hrupa pri tleh tistih virov glede na pogoje v nestabilnih tipih atmosfere. Še zlasti tistih virov, ki se nahajajo na velikih višinah, kar seveda v prvi vrsti velja za vetrne elektrarne, kot praktično najvišje vire hrupa (Pedersen, and Berg, 2020).

V takšnih razmerah lahko prihaja tudi do sprememb v geometrijski divergenci upadanja hrupa, še zlasti v nizkofrekvenčnem območju. Takrat se na določeni višini ustvari odbojna plast, zvočno valovanje pa je ujeto v kanal. V tem primeru je upadanje ravni hrupa blizu 3dB/podvojitvev oddaljenosti, namesto 6 dB/podvojitvev, kot se običajno dogaja pri sferičnem razširjanju. V svetu so tako zabeleženi primeri, ko je nizkofrekvenčni hrup vetrnic lahko slišen tudi na razdalje več kilometrov. Zato bi morale tudi meritve hrupa vetrnih elektrarn, še zlasti velikih, zajeti predvsem obdobja ko prevladuje stabilna atmosfera. Torej v ugodnih razmerah razširjanja hrupa, kot narekujejo tudi predpisi. Po drugi strani bi bilo za ugotavljanje lastnosti vetrnega profila na velikih VE primerno opremiti njihove stebre z merilniki hitrosti in smeri vetra na različnih višinah.

Vpliv VE je torej običajno največji pri stabilni atmosferi v nočnem času, v tem času pa je običajno tudi hrup ozadja bistveno nižji, kar še dodatno poveča motenost okolja s hrupom VE.

2.5. Opis preiskovane VE Dolenja vas

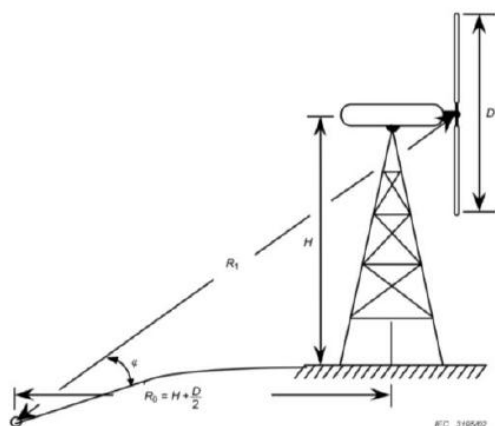


Slika 5 a in b. Posnetka preiskovane VE Dolenja vas

Vetrna elektrarna VE 15 Dolenja vas na Griškem polju pri Dolenji vasi, blizu Senožč v občini Divača, je največja vetrna elektrarna v Sloveniji. Elektrarno sestavlja vetrnica tipa E-70 nazivne moči 2,3 MW nemškega proizvajalca Enercon. Rotor premera 71 m se vrti na 98 m visokem stolpu.

2.6. Načrtovanje meritev

Pri velikih vetrnih elektrarnah opravljamo meritve ravni hrupa praviloma skladno s standardom IEC 61400-11 (EC 61400 11, 2006/11). Glede na zahteve tega standarda morajo biti merilna mesta hrupa locirana na razdali R_0 od vetrne elektrarne, ki je odvisna od višine (H) in premera lopatic (D), način določitve razdalje R_0 pa je prikazan na sliki 6.

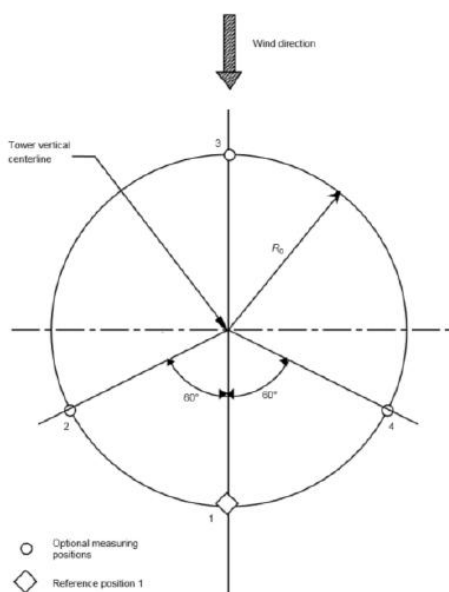


Slika 6. Določitev razdalje merilnih mest od vetrne elektrarne

Meritve hrupa se skladno standardom IEC 61400-11 izvajajo na lokacijah, odvisnih od razsežnosti VE:

- referenčna merilna lokacija 1, v smeri vetra in na oddaljenosti R_0 v različnih smereh
- dodatne merilne lokacije 2, 3, 4 (za določitev usmerjenosti).

Lokacije in njihova razporeditev so prikazane na sliki 7.



Slika 7. Lokacija in razporeditev merilnih mest

V primeru VE Dolenja vas znaša višina stolpa $H=98$ m, premer lopatičnega kroga $D = 71$ m, zato smo v skladu s standardom IEC 61400-11 meritve hrupa opravili na razdalji $R_0 = 134$ m od elektrarne. Poleg tega pa smo opravili več kratkotrajnih meritev tudi pred najbližjim stanovanjskim objektom v Dolenji vasi.

Neposredni vpliv vetra na merilne rezultate smo zmanjšali s pritrditvijo merilnih mikrofonov na trdo odbojno leseno podlago pravokotne oblike (1 m x 1 m) in debeline 12 mm. Alternativno je možna tudi uporaba okroglih podlag s premerom 1m, torej z nekoliko manjšo površino (slika 8).



Slika 8. Pritrditev mikrofona na trdo refleksijsko podlago

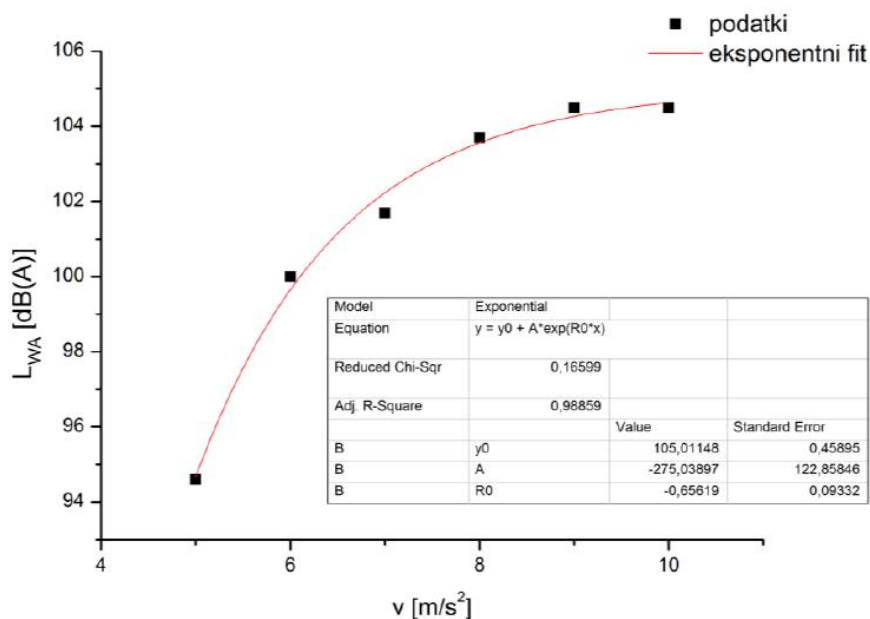
3 REZULTATI

Zaradi preglednosti smo se v tem prispevku omejili le na meritve, opravljene na merilni lokaciji 1, oddaljeni od VE 134 m.

3.1. Rezultati meritev in analiz hrupa VE Dolenja vas na merilni lokaciji 1



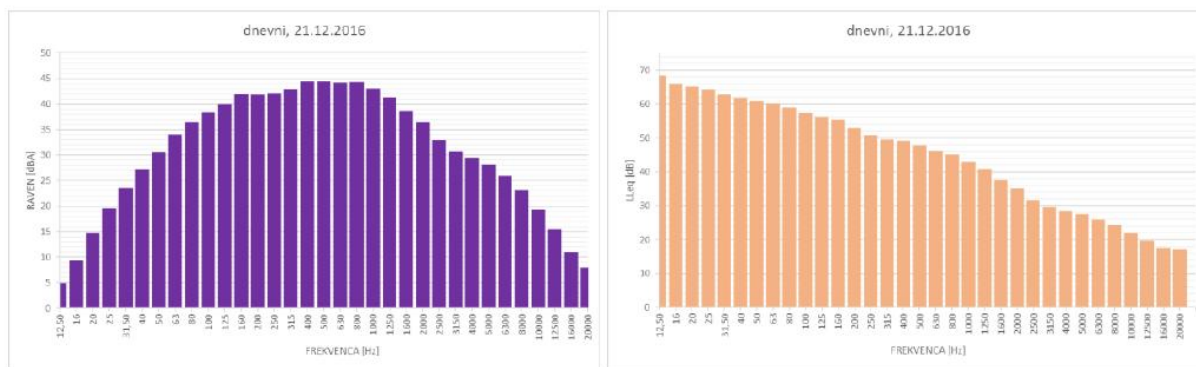
Slika 9. Diagram časovnih sprememb izmerjenih ravni zvočnih tlakov



Slika 10. Diagram odvisnosti ravni zvočne moči od hitrosti vetra na višini 10 m pri 6 diskretnih hitrostih vetra, po podatkih proizvajalca. Rdeča krivulja predstavlja prilagoditveno eksponentno funkcijo, ki se najtesneje prilagaja podanim diskretnim točkam ($R^2=0.99$)

3.2. Spektralne analize

Na spodnji sliki levo vidimo tipičen A vrednoten spekter za večjo VE, na sliki desno pa neutežen spekter. Spekter njenega hrupa pada približno s 4 dB na oktavo.



Slika 11. A vrednotena (levo) ter neutežena (desno) spektralna analiza za dnevne meritve

4 DISKUSIJA

Meritve so trajale le slabe dva dni, zato zgolj na njihovi osnovi ne moremo dajati dolgoročno veljavnih zaključkov. So pa rezultati pokazali, da so VE slišne in da so, še zlasti za občutljivejše stanovalce, problematične. Pritožbe nekaterih stanovalcev so se tako pokazale za utemeljene, kar kaže na potrebo dolgoročnih preiskav in analiz.

Ravni hrupa VE Dolenja vas so pred izpostavljenimi stanovanjskimi objekti kratkoročno tudi tekom dneva presegale 35 dBA. Čeprav takšen rezultat ni dobro koreliran z odzivom človeka na hrup VE in ga obstoječi predpisi ne smatrajo kot prekomernega pa velja opozoriti, da kar 85% izpostavljenih prebivalcev jasno zaznava hrup VE nad tem nivojem. Občasno so bile zabeležene tudi ravni hrupa nekoliko nad 40 dBA.

Kot že omenjeno, postane približno 30% vseh prebivalcev močno vznemirjenih, kadar raven hrupa prometnih virov presega 70 dBA, medtem ko je enak odstotek prebivalcev močno vznemirjen zaradi hrupa VE, katerega raven dosega okrog 40 dBA .

4.1. Odziv izpostavljenih prebivalcev na hrup VE

Ljudje zaznavajo hrup VE bistveno bolj moteč kot druge, sicer enako glasne zvoke, na primer cestni, industrijski in železniški hrup. Raziskave so pokazale, da je hrup velikih VE celo bolj moteč kot letalski hrup, ki je doslej veljal za najbolj motečega pri sicer isti glasnosti teh drugih hrupnih virov. Vzrok za to so predvsem akustične lastnosti VE, kot so prisotnost amplitudne modulacije, nizkofrekvenčnega in infrazvoka, včasih tudi njihove tonske in impulzne karakteristike, kakor tudi prisotnost in ojačitev v nočnem času.

Prebivalci v okolici VE imajo pogostejše fiziološke in psihološke simptome, ki zmanjšujejo kakovost njihovega življenja ter življenjskih pogojev nasplah, njihova bližina pa ima za njih tudi negativne socialne in ekonomske vplive.

Hrup, ki ga oddajajo VE je za najbolj izpostavljene prebivalce v dnevnem času nadležen, v nočnem pa lahko izredno moteč. Še zlasti problematično je njegova prisotnost v nočnem času, ker moti spanec. To pa lahko vodi do nastanka številnih bolezni, predvsem tistih povezanih s stresom. Hrup, še zlasti tisti močno nadležen, ki po drugi strani moti spanec, namreč vodi do nevro endokrinih reakcij in končno do regulacijskih bolezni s težjimi posledicami.

4.2. Dosedanje negativne izkušnje z investitorji VE zaradi neupoštevanja strokovnih dognanj

Dosedanja prepričevanja zagovornikov VE, da zadoščajo samo ene meritve hrupa VE (ali celo ta ne) in da le-tega tako ali tako močno preglasi prometni hrup po okoliških cestah so zavajajoča in neresnična, saj imajo pri razširjanju hrupa meteorološke razmere zelo pomembno vlogo. To seveda ne velja samo za neposreden vpliv vetra v smeri proti oziroma od izpostavljenih stanovanjskih objektov. Pri tem igra dodatno pomembno vlogo še stabilnost atmosfere. V primeru stabilne atmosfere, kar se dogaja večinoma ponoči, so vertikalna gibanja zračnih plasti močno zadušena. Posledično zrak pri tleh skoraj miruje, hitrost vetra pa narašča z višino skoraj konstantno in lahko veter na večjih višinah (na primer na 100 m) dosega precej velike hitrosti. Posledica tega je, da je cestni hrup (katerega izvor je praktično na tleh) pri določenih smereh vetra, še zlasti ponoči bistveno manj slišen in moteč kot hrup iz virov na velikih višinah, kot v primeru vetrnic (Desarnaulds, e et al, 207; Fukushima et al. 2016). Če k temu dodamo še dejstvo, da je gostota cestnega prometa v nočnem času 5 do 10 krat nižja kot podnevi, vidimo da so tovrstni argumenti zagovornikov VE dostikrat neutemeljeni, pritožbe prizadetih stanovalcev (predvsem v nočnem času) pa očitno na svojem mestu. Tovrstnim pritožbam izpostavljenih prebivalcev smo priča tudi pri nas.



5 ZAKLJUČKI

Pri nas trenutno veljavna Uredba o mejnih vrednostih kazalcev hrupa v okolju (Ur. list RS št. 43/2018) eksplicitno ne obravnava vetrnih elektrarn kot problematičnih hrupnih virov. Njena vsebina ni relevantna za vrednotenje hrupa vetrnih elektrarn, saj ne upošteva niti amplitudne modulacije, kot glavnega motilnega faktorja za okolje pri obratovanju vetrnih elektrarn. Prav tako ne upošteva drugih zvočno emisijskih značilnosti VE, kot nizkofrekvenčnega zvoka. Največja napaka Uredbe pa je, da ne glede na tovrstne neugodnosti enači mejne ravni hrupa VE z mejnimi ravni drugih hrupnih virov. Nekoliko naprednejša v tem pogledu je smernica WHO (World Health Organization, 2018), ki v svoji zadnji izdaji priporoča omejitve s hrupom vetrnih elektrarn z A uteženo ravni, vendar na povsem drugačen način, oziroma za povsem drug kazalec kot Uredba. WHO namreč uporablja bistveno strožjo omejitev 45 dBA, kot jo uporablja Uredba za kateregakoli izmed treh najpomembnejših kazalcev hrupa ($L_{dn}=58$ dBA, $L_{večer}=53$ dBA, $L_{noč}=48$ dBA). Po drugi strani se omejitev 45 dBA, ki jo obravnava smernica WHO nanaša na L_{dvn} in za katerega uredba dovoljuje kar za 13 dBA višjo vrednost. Energijsko to predstavlja dvajsetkratno razliko v mejnih ravneh hrupa med Uredbo in WHO smernico, kar je za izpostavljene stanovalce seveda nesprejemljivo. V kolikor bi se želeli držati kriterijev WHO, bi torej v dnevnem času morala omejitev s hrupom vetrnih elektrarn znašati 45 dBA, v večernem 40 dBA in v nočnem 35 dBA, da bi kazalec L_{dvn} ne bil presežen. Alternativno bi v primeru kontinuiranega obratovanja vetrne elektrarne z enakimi emisijami in imisijami hrupa v vseh obdobjih (kar je v praksi zelo težko izvedljivo), imisijska raven njihovega hrupa v nobenem obdobju ne smela presegati 39 dBA. Glede na takšno stanje sodimo med države z najvišjimi dovoljenimi ravni hrupa, ki ga povzročajo VE (Körper and Bauerdorff, 2017; Davy et al., 2018; Thomas and Bertil, 2019).

Pri poskusih postavitve novih VE pa bi bilo med drugim potrebno upoštevati tudi dejstvo, da gre za poskuse umestitve hrupnih virov v mirno, tiho okolje kjer so tovrstna povečanja s hrupom zelo izrazita. Po drugi strani pa zgolj oprijemanje za mejne vrednosti po naši Uredbi ne zagotavljajo varnega in zdravega okolja. Eden glavnih vzrokov za motenost s hrupom vetrnih elektrarn je prisotnost amplitudne modulacije, ki je bila v času meritev v Dolenji vasi jasno zaznavna in ki se je Uredba niti ne dotika.

Ugodni pogoji razširjanja hrupa nastopijo pri stabilni atmosferi oziroma pri toplotni inverziji to je pri vremenskih razmerah, ko se zvočni žarki, ki izhajajo iz VE lomijo navzdol, proti izpostavljenim objektom. Takrat se običajno ravni hrupa občutno povečajo. Zato so kratkotrajne meritve hrupa zgolj v lepem sončnem (čeprav vetrovnem) vremenu, pomanjkljive in nezadostne.

Za ugotovitev maksimalnih ter dolgoročnih obremenitev okolja s hrupom VE je zato potrebno načrtovati meritve tekom daljših obdobjih, znotraj katerih bodo zajeti vsi vetrovi, kakor tudi pogoji stabilne atmosfere. Poseben poudarek je potrebno dati na preiskave v nočnem času, ko poleg stabilne atmosfere lahko pričakujemo tudi nižje ozadje iz drugih hrupnih virov.

REFERENCE

Cooper J., Evans T., Alamshah V.: Influence of non-standard atmospheric conditions on turbine noise levels near wind farms, *Internoise 2014*, Melbourne 2014.

Davy J.L., Burgemeister K., Hillman D.; Wind turbine sound limits: Current status and recommendations based on mitigating noise annoyance; *Applied Acoustics* 140 (2018) 288–295.

Desarnaulds V., Fécelier R., Magnin D.; Influence of background noise and frequency analysis of wind turbine noise; 24th International Congress on Sound and Vibration; 23 – 27 July 2017, London 2017.

EC 61400 11, 2006/11, Wind turbine generating systems; Part 11: Acoustic noise measurement techniques.

Fukushima A., Tachibana H., Nameki M.: Assessment of wind turbine noise and residual noise in immission areas around wind power plants; *Proceedings of the Internoise 2016 Conference, Hamburg 2016*.

Körper S.; Bauerdorff A.; German Environment Agency, Germany
Wind turbine noise – German regulations and further research activities; *Proceedings of the Internoise 2017 Conference, Hong Kong 2017*.

Kühner T.D., Cervus Consult GmbH, Germany: Amplitude modulation of noise from wind turbines due to propagation through the atmosphere; *Proceedings of the Internoise 2016 Conference, Hamburg 2016*.

Lee S., Kim K., Choi W., Lee S.; Annoyance caused by amplitude modulation of wind turbine noise; *Noise Control Engineering Journal* 59 (2011).

Larsen H.: Reverberation Process at Low Frequencies, *Bruel&Kjaer Technical Review* No. 4, 1978.

Okada Y., Uemura T., Yoshihisa K.: Study on empirical formula for the sound directivity around a wind turbine; ; *Proceedings of the Internoise 2016 Conference, Hamburg 2016*

Pedersen E., Berg F.: Why is wind turbine noise poorly masked by road traffic noise, *Internoise 2010, Lisbon 2010*.

Perkins R.A, Lotinga M.J: A method to control amplitude modulation in wind turbine noise within the uk planning regime; 24th International Congress on Sound and Vibration; 23 – 27 July 2017, London 2017.

Perreira M.A., Branco N.A.A.C.: Public health and noise exposure: The importance of low frequency noise; *Proceedings of the Internoise 2007 Conference, Istanbul 2007*.

Thomas L., Persson, B.: Wind Turbine Noise Challenges in Sweden; *Proceedings of the Internoise 2019 Conference, Madrid 2019*.

Uredba o mejnih vrednostih kazalcev hrupa v okolju; *Ur. list RS št. 43/2018*

WHO Regional Office for Europe: *Environmental Noise Guidelines for the European Region*; World Health Organization 2018.

VETRNE ELEKTRARNE V SLOVENSКИH PROSTORSКИH NAČRTIH

Sonja Jeram

Nacionalni inštitut za javno zdravje, Trubarjeva 2, tel.: 12441555, fax: 012441447, sonja.jeram@nijz.si

POVZETEK

Uvod / Ozadje: V Sloveniji nimamo tradicije koriščenja vetrne energije, ki bi bila primerljiva z državami severne Evrope. Zato ni smiselno dosledno slediti praksam postavljanja vetrnih elektrarn v teh državah. Slovenija še ni opravila obsežnejših študij, ki bi pokazale prednosti in pomanjkljivosti koriščenja vetrne energije s trenutno razpoložljivo tehnologijo.

Metode: V prispevku Nacionalnega inštituta za javno zdravje bomo povzeli zakonske določbe in smernice, ki urejajo postavitev vetrnih elektrarn v slovenskem prostoru. Predstavili bomo stališče glede vpliva hrupa vetrnice na zdravje in počutje ljudi, ki smo ga pripravili na podlagi pregleda literature po letu 2014, ker te študije niso bile upoštevane v Smernicah Svetovne zdravstvene organizacije iz leta 2018.

Rezultati: Uredba o posegih v okolje, za katere je treba izvesti presojo vplivov na okolje navaja, da se presoja vplivov na okolje izvede v primeru, ko je načrtovan poseg z najmanj 20 napravami višine nad 30 metrov. Za druge posege z najmanj tremi napravami višine nad 30 metrov ali z vsaj eno napravo moči nad vsaj 1 MW se izvede predhodni postopek ugotavljanja pomembnih vplivov na okolje. Svetovna zdravstvena organizacija svetuje zmanjšanje hrupa vetrnih elektrarn pod 45 dB Lden. Stališče NIJZ za enkrat ostaja enako.

Zaključki: Glede na zadnje raziskave priporočamo, da se hrup zniža v še večji meri in da se ločeno obravnavajo mejne vrednosti za obdobje dneva in noči ter vplivi nizkofrekvenčnega zvoka. Nujno bo določiti primerne metode za meritve hrupa in oceno obremenjenosti okolja. Vplivi infrazvoka zaradi pomanjkljivih dokazov ostajajo predmet razprav in odločanja o uveljavljanju načela previdnosti.

Ključne besede: vetrne elektrarne, hrup, zdravje in počutje ljudi, prostorsko načrtovanje

1 UVOD

Ocena vplivov vetrnih elektrarn na zdravje ljudi je izjemnega pomena zaradi vedno večje potrebe po pridobivanju energije iz obnovljivih virov. Ocena vpliva na zdravje ljudi je zapletena in presega vpliv samega hrupa. Zaskrbljenost zaradi vpliva delovanja vetrnih elektrarn na zdravje in počutje ljudi je bila na zelo odmeven način obravnavana v knjigi Sindrom vetrnih elektrarn (Pierpont, 2009). Ameriška zdravnica Nina Pierpont je v knjigi opisala 37 primerov, ko so se ljudje pritoževali zaradi zdravstvenih težav, ki bi bile lahko posledica delovanja vetrnih elektrarn. Avtorica knjige je sama navedla, da gre v primeru njenega dela za izsledke, ki nakazujejo, da bi bilo treba predvsem vpliv hrupa vetrnih elektrarn na zdravje in počutje ljudi podrobneje preučiti z epidemiološkimi študijami. Torej sama avtorica navaja, da ne gre za epidemiološko študijo, ki bi dokazovala vzročno povezavo, ampak za opažanja, ki kažejo na možnost tveganja za zdravje ljudi, ki živijo v območju hrupa vetrnih elektrarn.

Tehnologija koriščenja vetrne energije se je od takrat spremenila in se stalno razvija. Leta 2018 je Svetovna zdravstvena organizacija objavila Smernice za okoljski hrup, v katerih posebej obravnava vetrne elektrarne (WHO, 2018). Sistematičen pregled literature do leta 2014 je pokazal, da so raziskave potrdile predvsem vpliv hrupa na pojav vznemirjenosti. Izpostavljene se posebne lastnosti hrupa vetrnih elektrarn, to je velik delež nizkofrekvenčnega zvoka in amplitudna modulacija hrupa, ki se je izkazala za še posebej motečo. Strokovnjaki so tudi tokrat navedli, da so potrebne kvalitetne epidemiološke študije, za preveritev vplivov hrupa vetrnih elektrarn predvsem na spanje in na druga zdravstvena stanja.

Namen naše študije je predstaviti postopek presoje vplivov vetrnih elektrarn na zdravje in počutje ljudi v sklopu prostorskega načrtovanja v Sloveniji in stališče Nacionalnega inštituta za javno zdravje. Namen je tudi preveriti nove znanstvene izsledke in ugotoviti ali zaključki le-teh spreminjajo ali dopolnjujejo dosedanje stališče NIJZ.

2 METODE

Informacije o zakonskih določbah in smernicah smo zbrali s pregledom zadnjih objavljenih dokumentov na spletnih straneh Službe Vlade RS za zakonodajo /PISRS (<http://pisrs.si/Pis.web/>), Ministrstva za zdravje /Kriteriji (<http://www.mz.gov.si>), Ministrstva za infrastrukturo /Portal energetika (<https://www.energetika-portal.si/dokumenti/strateski-razvojni-dokumenti/akcijski-nacrt-za-obnovljivo-energijo/>), in Svetovne zdravstvene organizacije / Smernice (<http://www.euro.who.int/en/home>). Pri odločanju uporabljamo tudi interne smernice, ki smo jih izdelali v sodelovanju z Nacionalnim laboratorijem za zdravje, okolje in hrano (NLZOH) in Ministrstvom za zdravje.

Pregled najnovejše literature smo izvedli s pregledom objav v bazi PubMed 6.1.2020 za obdobje 2015 - 2019 z uporabo ključnih besed (wind turbines, noise, health).

3 REZULTATI

Rezultate podajamo v treh poglavjih. V prvem poglavju povzemamo zakonodajo in smernice, ki jih upoštevamo pri pripravi mnenja o sprejemljivosti prostorskega plana ali načrta. V



drugem delu predstavljamo stališče NIJZ o vplivu vetrnih elektrarn na zdravje in počutje ljudi. V tretjem poglavju pa so zbrani izsledki najnovejših študij.

3.1. Zakonodaja in smernice

Odločanje o sprejemljivosti izvedbe prostorskih planov in načrtov poteka skladno z določbami Zakona o urejanju prostora (ZUreP-2, 2017). Nosilci urejanja prostora podajo mnenja s stališča svoje pristojnosti, Za Ministrstvo za zdravje mnenja pripravljata Nacionalni laboratorij, za zdravje, okolje in hrano (NLZOH) in Nacionalni inštitut za javno zdravje (NIJZ). V primeru, da izvedba plana predstavlja nesprejemljivo tveganje, se skladno z Zakonom o varstvu okolja (ZVO-1, 2006) pripravi okoljsko poročilo, ki se z nosilci urejanja prostora oziroma njihovimi podizvajalci uskladi pred potrditvijo plana.

Pri odločanju o sprejemljivosti izvedbe plana upoštevamo določila uredbe o merilih za ocenjevanje verjetnosti pomembnejših vplivov izvedbe plana (Uredba o merilih, 2009) in kriterije za ugotavljanje sprejemljivosti plana (MZ, 2013). Odločamo se skladno z internimi smernicami, ki smo jih pripravili v sodelovanju z NLZOH in MZ (Splošne smernice, 2018).

Uredba o mejnih vrednostih kazalcev hrupa v okolju (Uredba o hrupu, 2019) definira vetrne elektrarne kot vse ostale naprave. Mejni vrednosti za kazalca hrupa $L_{dvn}/L_{noč}$ sta 58 dBA/48 dBA in 52 dBA/42 dBA za območje III. in II, stopnje varstva pred hrupom. Smernice Svetovne zdravstvene organizacije (SZO) (WHO, 2018) pogojno priporočajo, da povprečna izpostavljenost hrupu za kazalec L_{dvn} ne bi smela presežati 45 dBA. Za obdobje noči se SZO ni opredelila zaradi pomanjkanja dokazov. NIJZ pri podajanju mnenja opozarja na to razliko v sprejemljivih obremenitvah s hrupom in svetuje postopno in dolgoročno približevanje priporočilom SZO.

Uredba o posegih v okolje, za katere je treba izvesti presojo vplivov na okolje določa, da se presoja izvede za vetrne elektrarne z najmanj 20 napravami višine nad 30 m, za druge vetrne elektrarne z najmanj 3 napravami višine nad 30 m ali z vsaj 1 napravo moči nad vsaj 1 MW pa se izvede presoja vplivov na okolje le v primeru, če je bilo v predhodnem postopku ugotovi, da bi poseg lahko imel negativne vplive na okolje (Uredba o posegih, 2017).

3.2. Stališče NIJZ o vplivu vetrnih elektrarn na zdravje in počutje ljudi

NIJZ je leta 2016 na podlagi vloge Ministrstva za zdravje izdelal Stališče o vplivu vetrnih elektrarn na zdravje ljudi. Pri izdelavi stališč smo upoštevali takrat najnovejše strokovne izsledke objavljene v znanstvenih revijah in stališča strokovnih organizacij in odborov (Basner s sod., 2015, Guidotti s sod., 2015, Michaud s sod., 2016a, 2016b, 2016c, 2016d, Keith s sod., 2016a, 2016b). Izsledke smo podrobneje opisali v prilogi stališču: Strokovne podlage.

Stališče o vplivu hrupa vetrnih elektrarn na zdravje ljudi temelji na izsledkih rezultatov raziskovalnih študij in mnenj ključnih strokovnih organizacij in odborov, ki obravnavajo vplive hrupa na zdravje ljudi do leta 2016. Leta 2013 je bila v Kanadi izvedena obsežna študija o okoljskem hrupu in njegovih vplivih na zdravje ljudi. Rezultati študije so objavljeni v več obsežnih publikacijah. Ravni hrupa so bile v zunanosti ocenjene pri 1.238 bivališčih v bližini 399 vetrnih elektrarn z nazivno močjo od 660 kW do 3 MW. Povprečna moč je bila $2 \pm 0,4$ MW. Vse elektrarne so bile sodobne, z rotorjem s tremi elisami. Obravnavani sta bili dve provinci, v eni je bilo 315 vetrnih elektrarn v drugi pa 84. Vsa bivališča so se nahajala v



ravninski kmetijski pokrajini s posevki soje in koruze. Med polji so bili mejni nasadi dreves ali razpršeni, manjši gozdovi. Višina dreves je segala od 10 do 30 metrov. Promet na večini cest na tem območju ni presegal 1.000 vozil na dan. V študijo je bilo vključenih 1.238 oseb starih do 18 do 79 let. Bivališča so bila od vetrnih elektrarn oddaljena od 0,25 do 11,22 km.

Najvišja dosežena povprečna raven hrupa vetrnih elektrarn pri bivališčih je bila v tej študiji 46 dBA, zato vsi zaključki veljajo le za obremenjenost s hrupom do te ravni.

Hrup vetrnih elektrarn je vzročno povezan s pojavom večje vznemirjenosti pri izpostavljenih prebivalcih. Večja vznemirjenost je bila opažena pri prebivalcih, ki so bili izpostavljeni ekvivalentni letni vrednosti hrupa 35–40 dBA. Hrup vetrnih elektrarn pri enaki ekvivalentni ravni povzroča večjo vznemirjenost kot hrup prometa, kar strokovnjaki razlagajo predvsem z značilno, periodično amplitudno modulacijo hrupa vetrnih elektrarn. Pomembno je razumeti, da na vznemirjenost zaradi hrupa vetrnih elektrarn ne vpliva smo raven hrup temveč tudi že omenjene značilne lastnosti hrupa, utripanje luči, premiki sence, vibracije, občutljivost posameznika, vidna sprememba krajine in osebna stališča (pomen obnovljivih virov energije, vrednost krajine, smotrnost posega ipd.). Poznavanje vseh vplivov je pomembno pri izbiri omilitvenih ukrepov za zmanjševanje vznemirjenosti zaradi hrupa in odločanju o mejnih vrednostih hrupa vetrnih elektrarn v okolju.

Manj trdni so dokazi za vzročno povezanost hrupa vetrnih elektrarn z motnjami spanja, a tega vpliva ne moremo popolnoma izključiti. Avtorji kanadske študije sami opozarjajo, da študija ni bila dovolj občutljiva, da bi te vplive zaznali. Omenjajo predvsem upoštevanje povprečnih ravni hrupa, ki za kakovost spanja niso vedno ključne (amplitudno moduliran zvok ni bil dovolj upoštevan). Omenjajo tudi navado zapiranja oken pri prebivalcih, ki se v dnevnem času s tem zaščitijo pred hrupom in zmanjšajo vznemirjenost, obenem pa je to zaščita tudi v nočnem času.

Izsledki za vpliv hrupa vetrnih elektrarn na stres niso zadostni, da bi dokazali vzročno povezanost. Kljub temu obstaja možnost posrednega vpliva na stres preko večje in trajne vznemirjenosti.

Izsledki za vpliv hrupa vetrnih elektrarn za ostale zdravstvene spremembe in simptome (med drugim vrtoglavica, glavobol, slabost, šumenje v ušesih) niso zadostni, da bi dokazali vzročno povezanost. Zaradi pomanjkljivih dokazov ni možno podati dokončne ocene. Pri izpostavljenosti prebivalcev hrupu sodobnih vetrnih elektrarn ekvivalentne letne ravni do 46 dBA, strokovnjaki navedenih učinkov kljub temu ne pričakujejo.

Rezultati študije kažejo, da hrup sodobnih vetrnih elektrarn, ne vsebuje deležev nizkofrekvenčnega zvoka, ki bi lahko predstavljal resno grožnjo zdravju ljudi. Enako so strokovnjaki v kanadski študij ugotovili, da ravni infrazvoka ne presegajo ravni infrazvoka, ki je sicer prisoten v okolju. Študije mehanizma delovanja nizkofrekvenčnega zvoka vključno z infrazvokom na ljudi se sicer nadaljujejo, saj strokovnjaki preučujejo mehanizem delovanja za katerega domnevajo, da je drugačen od slišne zaznave zvoka. Kljub temu strokovnjaki menijo, da so ravni nizkofrekvenčnega zvoka in infrazvoka bistveno nižje od tistih, ki so jih povzročaje vetrne elektrarne v preteklosti in tudi nižje od ravni za katere je bil prepoznan vpliv na zdravje ljudi.

3.3. Pregled najnovejših znanstvenih izsledkov

Pri pregledu literature v bazi PubMed smo identificirali 59 člankov. Od teh sta dva pregledna članka objavljena leta 2019 (Freiberg s sod., 2019a, 2019b). V pregledu je zajetih 30 člankov,



ki smo jih zbrali pri našem pregledu, zato teh nismo podrobneje pregledovali. Prav tako nismo pregledali ostalih člankov iz obdobja, ki je bilo zajeto v omenjenih pregledih, ker sklepamo, da so jih avtorji poročila izključili. Tako smo izključili nadaljnjih 10 člankov in pregledali preostali 19 objav. V tem prispevku izpostavljamo oba pregledna članka nemških raziskovalcev in zaključke danske kohortne študije.

Freiberg s sodelavci (2019a) v vsebinskem pregledu zaključuje, da obstaja veliko raznolikih objav o vplivih vetrnih elektrarn na zdravje ljudi v bivalnem okolju, katerih število od leta 2010 močno narašča, potrjujejo pa zlasti vplive hrupa na povečano vznemirjenost. Drugih vplivov na zdravje in počutje ljudi niso ugotovili. Avtorji omenjajo številne pomanjkljivosti kot so zapleten pojav vznemirjenosti, pridobivanje klinično preverjenih zdravstvenih rezultatov, objektivno oceno vizualnih vplivov, pomanjkljivo upoštevanje nizkih frekvenc in infrazvoka. V bodoče bi bilo treba izvesti zelo kakovostne epidemiološke študije.

V sistematičnem pregledu literature Freiberg s sodelavci (2019b) ugotavlja, da vznemirjenost zaradi vidnosti vetrnih elektrarn lahko deluje kot mediator med vizualno zaznavo in vplivom na počutje in zdravje lokalnih prebivalcev. Tudi pri tem pregledu avtorji opozarjajo na veliko raznolikost v kakovosti študij in na nujnost potrditve rezultatov z izvedbo bolj kakovostnih študij.

V letih 2018 in 2019 so danski raziskovalci objavili 6 člankov v katerih opisujejo rezultate longitudinalne kohortne študije in različnih vplivov vetrnih elektrarn na zdravje in počutje ljudi (Poulsen s sod., 2018a, 2018b, 2018c, 2018d, 2019a, 2019b).

Študija je pokazala, da je prebivalcem starejšim od 65 let, ki so izpostavljeni višjim ravnem hrupa vetrnih elektrarn, predpisanih več uspaval in v nekoliko manjši meri tudi antidepresivov (Poulsen, 2019a). Rahlo je bilo povečano tveganje za srčni infarkt pri najbolj izpostavljenih prebivalcih (Poulsen, 2019b) ni pa bila ugotovljena povezava s tveganjem za srčno kap. Rezultati, objavljeni v letu 2018 pa ne kažejo povezave med izpostavljenostjo hrupu in hipertenzijo, motnjami delovanja srčno-žilnega sistema (kratkotrajna izpostavljenost), diabetesom in vplivi na novorojene otroke (Poulsen, 2018a, 2018b, 2018c, 2018d). Kohorta je bila v tem primeru sicer velika, vendar je bilo razmeroma malo prebivalcev izpostavljenih večjim ravnem hrupa (nad 42 dBA v zunanosti), kjer bi pričakovali potencialne negativne učinke na zdravje. V primeru, ko je v najbolj izpostavljeni preučevani skupini prebivalcev premalo oseb, se postavlja vprašanje o negotovosti zaključkov. Danska zakonodaja namreč ne dovoljuje postavitve vetrnih elektrarn, kjer bi hrup v bližini bivališč presegal 44 dBA pri hitrosti vetra 8m/s (Poulsen 2019b). Pomanjkljivost te sicer zelo kakovostne študije je, da ne vključuje oseb mlajših od 25 let.

4 DISKUSIJA

Vpliv vetrnih elektrarn na zdravje ljudi se kaže predvsem kot povečana vznemirjenost zaradi hrupa, ki pa je odvisna tudi parametrov kot so značilnosti zvoka in ne-akustični vplivi, na primer vizualna sprememba krajine, odnos do vira hrupa, zaupanje do investitorjev, vladnih organizacij, strokovnjakov, ipd. Zato je jasno, da samo na podlagi kazalcev hrupa kot sta Ldvn in Lnoč ne moremo pričakovati napredka pri razumevanju in ocenjevanju vplivov hrupa na pojav vznemirjenosti. Če obravnavamo vznemirjenost kot kritični učinek hrupa na zdravje in počutje ljudi, lahko predpostavimo, da bo preprečitev vznemirjenosti v veliki meri zmanjšala tudi tveganje za pojav ostalih možnih učinkov na zdravje. Pogosto raziskovalci omenjajo majhno število oseb v najbolj izpostavljeni skupini sodelujočih v študiji. To



predstavlja problem, ker ne moremo z gotovostjo trditi, da bi opazili učinke pri več osebah, če bi bila študija statistično bolj prepričljiva. Zato na podlagi rezultatov študij, ki ne pokažejo negativnih učinkov na zdravje in počutje ljudi, ne moremo zaključiti, da teh učinkov ne bi bilo pri večji izpostavljenosti hrupu. Hrup vetrnih elektrarn vsekakor predstavlja nevarnost za različne negativne učinke na zdravje in počutje ljudi, pomembno pa je v katerih pogojih in pri kakšni izpostavljenosti bo prisotno tveganje za njihov pojav. Zato moramo vedno z veliko mero previdnosti interpretirati rezultate študij z omembo vseh negotovosti in pomanjkljivosti. Prav tako je treba upoštevati, da enaka vetrna elektrarna v različnih pogojih povzroča različno obremenitev okolja s hrupom, zato prenos izsledkov brez lokalnega preučevanja ni mogoč.

5 ZAKLJUČKI

Na podlagi pregleda najnovejših znanstvenih izsledkov zaključujemo, da ostaja stališče NIJZ za postavitev vetrnih elektrarn v Sloveniji nespremenjeno. Predvsem zaradi negotovosti o vplivih na zdravje in počutje otrok predlagamo večjo previdnost. Smiselno bi bilo treba dopolniti slovensko zakonodajo, tako, da bodo mejne vrednosti v Uredbi o mejnih vrednostih kazalcev hrupa v okolju v večji meri ščitile zdravje ljudi. Predpisati je treba primerno metodologijo za opravljanje meritev hrupa oziroma za modelne napovedi pred postavitvijo novih vetrnih elektrarn v našem okolju. Vzpodbudno je, da sta pripravljena osnutek Celovitega nacionalnega energetskega in podnebne načrta Republike Slovenije in osnutek Okoljskega poročila, ki sta usklajena z načeli NIJZ (NEPN, 2020).

REFERENCE

- Basner, M.; Brink, M.; Bristow, A.; de Kluizenaar, Y.; Finegold, L.; Hong, J.; Janssen, S.A.; Klæboe, R.; Leroux, T.; Liebl, A.; Matsui, T.; Schwela, D.; Sliwinska-Kowalska, M.; Sörqvist, P. 2015. ICBEN review of research on the biological effects of noise 2011-2014. *Noise Health*, 17, 57-82.
- Freiberg, A.; Schefter, C.; Girbig, M.; Murta, V.C.; Seidler, A. 2019a. Health effects of wind turbines on humans in residential settings: Results of a scoping review. *Environ Res*, 169, 446-463. doi: 10.1016/j.envres.2018.11.032.
- Freiberg, A.; Schefter, C.; Hegewald, J.; Seidler, A. 2019b. The influence of wind turbine visibility on the health of local residents: a systematic review. *Int Arch Occup Environ Health*, 92 (5): 609-628. doi: 10.1007/s00420-019-01403-w.
- Guidotti, T. L.; Davies, H. W.; Gagnon, Y. G.; Grace, C. S.; Harrison, R. V.; Howe, B.; Roberts, J. D. 2015. *Understanding the Evidence: Wind Turbine Noise: The Expert Panel on Wind Turbine Noise and Human Health*. Council of Canadian Academies, Ottawa, Canada; ISBN 978-1-926522-07-4; pp. 1-154.
- Keith, S.E.; Feder, K.; Voicescu, S.A.; Soukhovtsev, V.; Denning, A.; Tsang, J.; Broner, N.; Richarz, W.; van den Berg, F. 2016a. Wind turbine sound power measurements. *J Acoust Soc Am*, 139(3), 1431-5. doi: 10.1121/1.4942405.



Keith, S.E.; Feder, K.; Voicescu, S.A.; Soukhovtsev, V.; Denning, A.; Tsang, J.; Broner, N.; Leroux, T.; Richarz, W.; van den Berg, F. 2016b. Wind turbine sound pressure level calculations at dwellings. *J Acoust Soc Am*, 139(3), 1436-42. doi: 10.1121/1.4942404.

MZ. 2013. *Kriteriji za ugotavljanje sprejemljivosti planov s stališča pristojnosti varovanja zdravja ljudi pred vplivi iz okolja v postopkih celovite presoje vplivov na okolje*. Verzija 2. Ministrstvo za zdravje. Dostopno na: <http://www.mz.gov.si/> (6.1.2020).

Michaud, D.S.; Keith, S.E.; Feder, K.; Voicescu, S.A.; Marro, L.; Than, J.; Guay, M.; Bower, T.; Denning, A.; Lavigne, E.; Whelan, C.; Janssen, S.A.; Leroux, T.; van den Berg, F. 2016a. Erratum: Personal and situational variables associated with wind turbine noise annoyance [*J Acoust Soc Am*, 139(3), 1455-1466 (2016)]. *J Acoust Soc Am*, 140(4), 2234.

Michaud, D.S.; Feder, K.; Keith, S.E.; Voicescu, S.A.; Marro, L.; Than, J. Guay, M.; Denning, A.; McGuire, D.; Bower, T.; Lavigne, E.; Murray, B.J.; Weiss, S.K.; van den Berg, F. 2016b. Erratum: Exposure to wind turbine noise: Perceptual responses and reported health effects [*J Acoust Soc Am*, 139(3), 1443-1454 (2016)]. *J Acoust Soc Am*, 140(4), 2457.

Michaud, D.S.; Feder, K.; Keith, S.E.; Voicescu, S.A.; Marro, L.; Than, J.; Guay, M.; Denning, A.; Murray, B.J.; Weiss, S.K.; Villeneuve, P.J.; van den Berg, F.; Bower, T. 2016c. Effects of Wind Turbine Noise on Self-Reported and Objective Measures of Sleep. *Sleep*, 39(1), 97-109. doi: 10.5665/sleep.5326. Erratum in: *Sleep*. 41(5).

Michaud, D.S.; Feder, K.; Keith, S.E.; Voicescu, S.A.; Marro, L.; Than, J.; Guay, M.; Denning, A.; Bower, T.; Villeneuve, P.J.; Russell, E.; Koren, G.; van den Berg, F. 2016d. Self-reported and measured stress related responses associated with exposure to wind turbine noise. *J Acoust Soc Am*, 139(3), 1467-79. doi: 10.1121/1.4942402.

NEPN. 2020. *Celoviti nacionalni energetske in podnebni načrt republike Slovenije*. Verzija 4.1, januar 2020. Dostopno na: <https://www.energetika-portal.si/> (10.1.2020).

Pierpont, N.; 2009. *Wind Turbine Syndrom. A report on a natural experiment*. K-Selected books; Santa Fe, USA; ISBN-13:978-0-9841827-0-1; ISBN-10:0-9841827-0-5; pp. 1-294.

Poulsen, A.H.; Raaschou-Nielsen, O.; Peña, A.; Hahmann, A.N.; Nordsborg, R.B.; Ketznel, M.; Brandt, J.; Sørensen, M. 2019a. Impact of Long-Term Exposure to Wind Turbine Noise on Redemption of Sleep Medication and Antidepressants: A Nationwide Cohort Study. *Environ Health Perspect*, 127(3), 37005. doi:10.1289/EHP3909.

Poulsen, A.H.; Raaschou-Nielsen, O.; Peña, A. Hahmann, A.N.; Nordsborg, R.B.; Ketznel, M.; Brandt, J.; Sørensen, M. 2019b. Long-Term Exposure to Wind Turbine Noise and Risk for Myocardial Infarction and Stroke: A Nationwide Cohort Study. *Environ Health Perspect*, 127(3), 37004, 1-10. doi:10.1289/EHP3340.

Poulsen, A.H.; Raaschou-Nielsen, O.; Peña, A.; Hahmann, A.N.; Nordsborg, R.B.; Ketznel, M.; Brandt, J.; Sørensen, M. 2018a. Long-term exposure to wind turbine noise and redemption of antihypertensive medication: a nationwide cohort study. *Environ Int*, 121(1), 207–215. doi:10.1016/j.envint.2018.08.054.



Poulsen, A.H.; Raaschou-Nielsen, O.; Peña, A.; Hahmann, A.N.; Nordsborg, R.B.; Ketznel, M.; Brandt, J.; Sørensen, M. 2018b. Short-term nighttime wind turbine noise and cardiovascular events: a nationwide case-crossover study from Denmark. *Environ Int*, 114, 160–166. doi:10.1016/j.envint.2018.02.030.

Poulsen, A.H.; Raaschou-Nielsen, O.; Peña, A.; Hahmann, A.N.; Nordsborg, R.B.; Ketznel, M.; Brandt, J.; Sørensen, M. 2018c. Long-term exposure to wind turbine noise at night and risk for diabetes: a nationwide cohort study. *Environ Res*, 165, 40–45. doi:10.1016/j.envres.2018.03.040.

Poulsen, A.H.; Raaschou-Nielsen, O.; Peña, A.; Hahmann, A.N.; Nordsborg, R.B.; Ketznel, M.; Brandt, J.; Sørensen, M. 2018d. Pregnancy exposure to wind turbine noise and adverse birth outcomes: a nationwide cohort study. *Environ Res*, 167, 770-775. doi: 10.1016/j.envres.2018.09.011.

NIJZ. 2018. *Splošne smernice za pripravo občinskih in medobčinskih prostorskih načrtov za področje krepitev in varovanje zdravja ljudi – predlog*, verzija: 2920. 098. Nacionalni inštitut za javno zdravje, Nacionalni laboratorij za zdravje, okolje in hrano, Ministrstvo za zdravje. (interni dokument), pp. 1-54.

Uredba o mejnih vrednostih kazalcev hrupa v okolju (Uradni list RS, št. 43/18 in 59/19). Dostopno na: <http://pisrs.si/Pis.web/> (6.1.2020).

Uredba o merilih za ocenjevanje verjetnosti pomembnejših vplivov izvedbe plana, programa, načrta ali drugega splošnega akta in njegovih sprememb na okolje v postopku celovite presoje vplivov na okolje (Uradni list RS, št. 9/09). Dostopno na: <http://pisrs.si/Pis.web/> (6.1.2020).

Uredba o posegih v okolje, za katere je treba izvesti presojo vplivov na okolje (Uradni list RS, št. 51/14, 57/15 in 26/17). Dostopno na: <http://pisrs.si/Pis.web/> (6.1.2020).

ZUreP-2. Zakon o urejanju prostora (Uradni list RS, št. 61/17). Dostopno na: <http://pisrs.si/Pis.web/> (6.1.2020).

ZVO-1. Zakon o varstvu okolja (Uradni list RS, št. 39/06 – uradno prečiščeno besedilo, 49/06 – ZMetD, 66/06 – odl. US, 33/07 – ZPNačrt, 57/08 – ZFO-1A, 70/08, 108/09, 108/09 – ZPNačrt-A, 48/12, 57/12, 92/13, 56/15, 102/15, 30/16, 61/17 – GZ, 21/18 – ZNOrg in 84/18 – ZIURKOE). Dostopno na: <http://pisrs.si/Pis.web/> (6.1.2020).

WHO. 2018. *Environmental noise guidelines*. World Health Organisation, Copenhagen; ISBN: 978 92 890 5356 3; pp. 1-160.



VPLIV HRUPA VETRNIH ELEKTRARN

Mirko Čudina

Pod bukvami 18, 1000 Ljubljana, tel.: 041-770-558, e-mail: mirko.cudina@fs.uni-lj.si

POVZETEK

V primerjavi z nuklearnimi in termoelektrarnami je vpliv vetrnih elektrarn na okolje minoren. Postavljene na kopnem privedejo delno do spremembe videza pokrajine v »industrijsko območje« in izgube habitata, ker lahko povzročajo smrt ptic in netopirjev. Poleg tega vetrne turbine ustvarjajo tudi nekaj hrupa, ki na razdalji do 300 m lahko doseže vrednosti tudi do 45 dB(A). Na razdalji 1,5 km je večina vetrnih turbin praktično neslišna. Spekter hrupa vetrnih elektrarn je širokopasoven s poudarkom na nizkih frekvencah, ki so posledica rotacije rotorskih lopatic in njihovih višjih harmonikov. Ti nizki toni lahko vplivajo tako na organ sluha kot na druge dele organizma, predvsem na ožilje in živce, s posledicami kot so razne psihofizične motnje, travma, motorične motnje, utrujenost, zmanjšanje koncentracije pri delu, študiju in počitku, motnje v krvnem obtoku itn. Nekateri avtorji pripisujejo vplivu hrupa vetrnih elektrarn najrazličnejše posledice, od poškodbe sluha do psihofizičnih motenj in telesnih deformacij, ne da bi za to predstavile znanstvene podlage in dokaze, ki bi eksplicitno dokazovale vpliv hrupa vetrnih elektrarn na prej naštete posledice. Tudi zato ne, ker ni enostavno izločiti druge vire hrupa, katerim je človek dnevno izpostavljen, in druge vplive na njegov organizem. Na zdravstvene in telesne spremembe pri ljudeh (in živalih) vplivajo, namreč, poleg izpostavljenosti hrupu še drugi dejavniki, kot so genetika, staranje, psihofizične preobremenitve, različne bolezni do lažne naglušnosti pri poškodbi sluha. V tem prispevku bo dan poudarek vplivu nizkofrekvenčnega hrupa, ki je značilen za vetrne elektrarne, in vplivu drugih dejavnikov na psihofizične in zdravstvene težave in spremembe pri ljudeh.

Ključne besede: Vetrne elektrarne, hrup, infrazvok, vpliv na okolje in ljudi, drugi vplivi

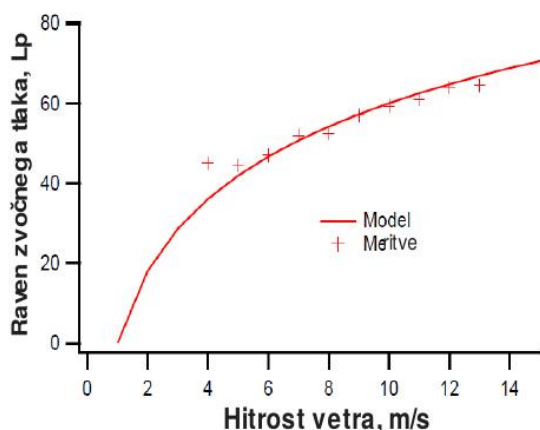
1 UVOD

Vetrna energija se je uporabljala že od nekoč, najprej za pogon večjih ladij na jadra in manjših za športne namene (jadrnice), nadalje za pogon mlinov in žag, ter na sušnih območjih za črpanje vode. V novejšem času pa se vetrna energija izkorišča za pogon vetrnih elektrarn za proizvodnjo električne energije in velja kot alternativni vir energije termoelektrarnam na premog in nuklearnim elektrarnam, ki so za okolje bistveno bolj škodljive in nevarnejše kot vetrne elektrarne. V primerjavi z drugimi alternativnimi viri tim. viri zelene energije, to je vodnimi elektrarnami, ki rabijo jez in akumulacijsko jezero, in solarnimi elektrarnami, ki rabijo ogromno ravno površino in drage solarne celice, so vetrne elektrarne manj moteče, če so postavljene na pravilno izbrani lokaciji. Vendar vetrne elektrarne za svoje obratovanje potrebujejo zadosti močan veter z približno konstantno hitrostjo, vsaj 3 do 5 m/s, pogoje torej, katerim marsikatera lokacija v Sloveniji in drugod ne ustreza. Največje moči in s tem električne energije dajo pri hitrosti vetra med 15 in 20 m/s. Če je hitrost vetra nad 25 m/s se vetrne elektrarne ustavijo, da ne bi prišlo do poškodb. Zaradi tehnične izvedbe se gradijo z maksimalno močjo okoli 2 MW (od naših dveh večjih, tista pri Dolenji vasi ima moč 2,3 MW). To pomeni, da bi kot alternativa Šoštanjski termoelektrarni morali zgraditi 300 vetrnih elektrarn z močjo 2 MW. Za takšno število in moč bi potrebovali ustrezno veliko in visoko ležečo planoto, na kateri piha ves čas veter z zadostno hitrostjo in bi bile zadosti oddaljene od naselij. Njihova umestitev v prostor povzroča spremembo videza pokrajine, pokrajina dobi videz industrijske cone (nekateri uporabljajo izraz »vizualno onesnaženo okolje) in spremembo habitata, ker lahko povzročajo smrt ptic in netopirjev. Zaradi tega in hrupa, ki ga proizvajajo, njihovi gradnji, zlasti v bližini naselij, nasprotujejo razne civilne iniciative. Podobno je tudi v drugih državah, zato je tudi zaradi tega njihov delež v celotni svetovni proizvodnji električne energije trenutno manj kot 1%, je pa kljub temu med najhitreje rastočimi panogami za proizvodnjo električne energije. V Evropi je delež električne energije iz vetrnih elektrarn že 16%, na Danskem 44%. Največ vetrnih elektrarn za pridobivanje električne energije imajo razvite države (Nemčija, Danska, Francija, Nizozemska, Finska, Irska in Litva), največje med njimi so Gemini na Nizozemskem z močjo 600 MW, sledijo ji nemške Gode Wind 1 in 2 z močjo 582 MW, ter nizozemski Westermeerwind z močjo 144 MW. Najprimernejša njihova umestitev je na morju, na ustreznih razdalji od obale, na odročnih hribih ali v skrajni sili ob avtocesti, ki lahko maskira njihov hrup.

Od vseh negativnih vplivov je za človeka najbolj moteč hrup, ki ga proizvajajo vetrne elektrarne. To pa zato, ker hrup na splošno vpliva na poškodbo sluha in šumenje v ušesih, na kardiovaskularni sistem, na presnovno in spanec, povzroča vznemirjenje in kognitivne okvare. S tem tako prisotnost vetrnih elektrarn poslabša kakovost življenja, dobro počutje in mentalno zdravje. Vendar je dejstvo, da v krogu do 300 m raven hrupa vetrne elektrarne ne preseže vrednosti ca. 45 dB(A), na razdalji 1,5 km je večina vetrnih elektrarn praktično neslišna, kar pomeni, da z vidika izgube sluha ne predstavljajo omembe vreden problem. Vendar učinka nizkofrekvenčnega hrupa ne smemo zanemariti, tudi zato ne, ker se nizke frekvence (infrazvok) širijo na velike razdalje, tudi do 5 km. Raziskave o vplivu infrazvoka niso končane, mnoge sicer podobne študije se razlikujejo v ugotovitvah in sklepih, ali so si celo nasprotujoče, tako da jim še vedno težko pripisujemo odločujoč pomen. Zlasti so zmotne ali boljše nedokazane nekatere trditve, da infrazvok povzroča razne psihofizične motnje, fizične spremembe in deformacije, in hujše zdravstvene težave pri ljudeh in živalih.

2 HRUP VETRNH ELEKTRARN

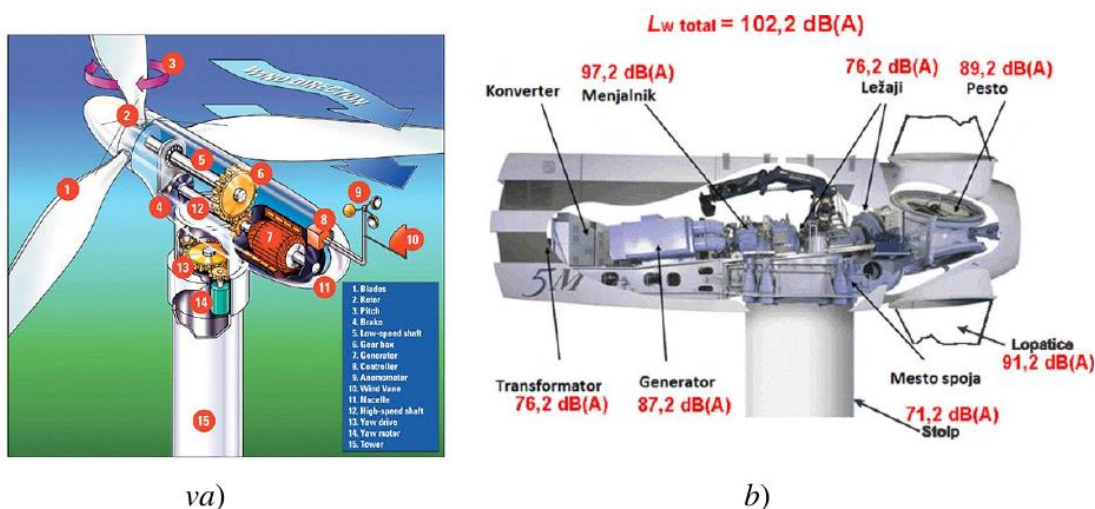
Evropska direktiva iz 2018 priporoča zmanjšanje hrupa vetrne elektrarne na mestu imisije pod 45 dB(A) za celodnevno raven L_{dvn} , ker da je hrup vetrne turbine nad to ravno povezan s škodljivimi vplivi na zdravje, ki jih ne definira. V nasprotnem primeru pa priporoča sprejetje ukrepov za njegovo zmanjšanje na priporočeno raven, ne da bi definirala kako (Environmental Noise Guidelines, 2018). Hrup vetrne elektrarne je odvisen od njene velikosti in zgradbe ter hitrosti vetra, slika 1. Vetrna elektrarna s horizontalno osjo sestoji iz nosilnega stebra (visokega 60 do 100 m) in na njegovem vrhu ohišja za vgradnjo vetrnice oz. rotorja z lopaticami na eni strani in na drugi



Slika 1. Vpliv hitrosti vetra na hrup vetrne elektrarne

strani v ohišju vgrajeni: zavora (za ustavitev turbine v času pregleda, remonta ali prevelike hitrosti vetra), menjalnik (za povečanje vrtljajev počasne vetrnice na vrtljaje generatorja, običajno 1500 min^{-1}), generator (za spremembo rotacije vetrnice v električno energijo), regulator (za sukanje turbine glede na smer in hitrost vetra za doseg maksimalnega izkoristka), ventilator (za hlajenje) in anemometer (senzor za merjenje hitrosti vetra), slika 2a.

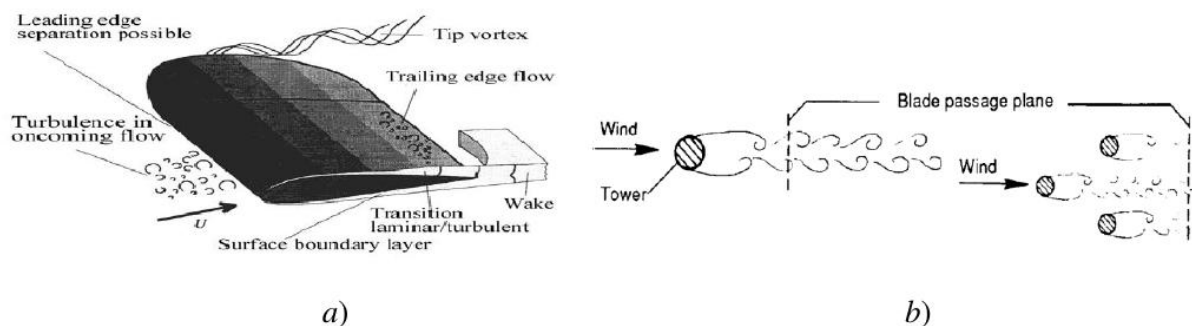
Vsaki od teh sestavnih delov povzroča hrup različne jakosti. Njihovo medsebojno razmerje glede ravni hrupa je prikazano z rdečimi številkami na sliki 2b.



Slika 2. a) Zgradba vetrne elektrarne in b) zvočna moč komponent za 2 MW vetrno turbino

2.1. Mehanizmi nastajanja hrupa pri vetrnih elektrarnah

Hrup vetrnih elektrarn je aerodinamičnega, mehanskega in elektromagnetnega izvora. Aerodinamični hrup je posledica hitrosti vetra pri obtekanju lopatic in sestoji iz rotirajočega hrupa, pretočnega turbulentnega hrupa in hrupa zaradi plapolanja lopatic. Rotirajoči hrup je posledica rotacije rotorja (RR) in rotacije rotorskih lopatic (RRL) in njihovih višjih harmonikov. Pojavi se pri nizkih frekvencah pod 10 Hz. Turbulentni hrup je rezultat interakcije rotorja z zračnim tokom in zastojskih vrtincev na izstopu iz lopatic, nadalje zaradi obtekanja neostrih vstopnih in izstopnih robov lopatic in zaradi razkrajjanja laminarne mejne plasti na lopaticah rotorja, slika 3a. Posamezni prispevki k celotni ravni hrupa so odvisni tudi od hitrosti vetra in njegove spremembe. Turbulentni hrup se pojavi pri frekvencah od 10 do 1000 Hz. Del aerodinamičnega hrupa vetrne turbine je rezultat tudi obtekanja nosilnega stebra vetrnice in zastojskih vrtincev za rotorjem s tokom zraka (vetra), slika 3b. Pojavi se med 750 in 2000 Hz.



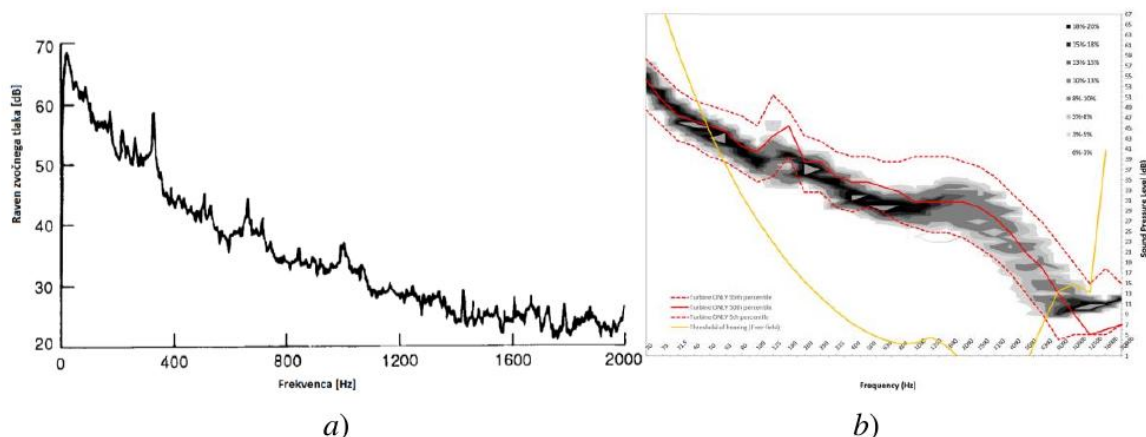
Slika 3. a) Hrup zaradi obtekanja zraka okoli lopatic in b) okrog stebra in zastojskih vrtincev

Mehanski hrup je posledica udarnega hrupa pri vprijetanju zobnikov menjalnika, trenja v zobnikih, ležajih in zaradi vibracij neizbalansiranih rotirajočih delov. Mehanski hrup je odvisen predvsem od vrtilne frekvence, od tipa in velikosti zobnikov, ležajev, tesnil in njihove obrabe. Elektromagnetni hrup je rezultat delovanja Laplaceovih, Maxwellovih in Coulombovih sil ter pojava magnetostrikcije v generatorju, ki povzročijo vibracije elektromagnetnega materiala, statorskega in rotorskega paketa, ko je ta izpostavljen spremembi elektromagnetnega polja. Nastale vibracije povzročajo nihanja strukture (rotora in statora) in posledično sevanje hrupa. Na hrup, ki se širi v okolje, prevladuje aerodinamični hrup.

2.2. Značilnost hrupa vetrnih elektrarn

Hrup definira njegova raven v časovni domeni in spekter hrupa v frekvenčni domeni. Raven hrupa v časovni domeni je odvisna od hitrosti vetra in jo vsakokrat definiramo z njeno zvočno močjo. Zvočna moč vetrne elektrarne je okoli 100 dB(A) in več.

Spekter hrupa vetrnih elektrarn je značilno širokopasoven in poudarjen pri nizkih frekvencah. Zaradi nizkih vrtilnih frekvenc rotorja (10 do 30 min⁻¹) se poudarjeni toni frekvence rotacije rotorja (FRR) in rotorskih lopatic (FRRL) in njuni višji harmoniki pojavljajo v področju infrazvoka, pod 20 Hz, slika 4a.



Slika 4. a) Ozkopasovni spekter hrupa vetrne elektrarne, b) spekter hrupa vetrne elektrarne merjeno na razdalji 500 m od vetrnice proti cesti in vetrom v smeri proti cesti (Žukienė et al., 2011; Ashtiani and Denison, 2015)

Poudarjene tone v področju infrazvoka človeško uho ne zazna (ne sliši). Prav tako ga ne zaznajo niti inštrumenti, saj običajno imajo merilno območje med 20 in 20.000 Hz. Čeprav jih ne slišimo pa nizki toni v spektru hrupa vetrnih elektrarn lahko vplivajo na dele človeškega organizma, predvsem na ožilje in živce, s posledicami kot so razne psihofizične motnje, travma, motorične motnje, utrujenost, zmanjšanje koncentracije pri delu, študiju in počitku, motnje v krvnem obtoku itn. Nekateri avtorji pripisujejo vplivu hrupa vetrnih elektrarn tudi druge posledice, od genetskih sprememb do kasnejših telesnih deformacij (Alves-Pereira, 2018), ne da bi za to predstavile znanstvene podlage in dokaze, ki bi to eksplicitno dokazovale. Pripisovati takšen vpliv nizkofrekvenčnega hrupa vetrnih elektrarn ni znanstveno in je zavajajoče. Tudi zato ne, ker ni enostavno izločiti druge vire hrupa, katerim je človek dnevno izpostavljen, in vse druge vplive na njegov organizem, od zdravstvenih do genetskih in drugih vplivov. Zato take trditve služijo zgolj za zadovoljevanje ozkih partikularnih interesov. Npr. pritegniti pozornost.

3 VPLIVNI PARAMETRI NA MESTU IMISIJE HRUPA

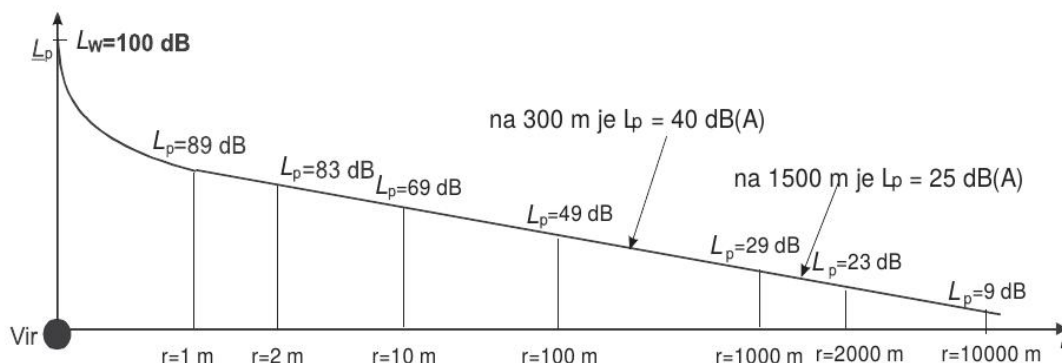
Proizvajalci vetrnih elektrarn podajajo podatek o zvočni moči hrupa, ki ga te proizvajajo. To vrednost potem uporabniki uporabljajo za umeščanje v prostor glede na dane okoliščine. Slabi poznavalci akustike potem navajajo v svojih poročilih, ali predavanjih, namesto zvočne moči (L_w sound power level) jakost hrupa (L_I sound intensity) ali raven zvočnega tlaka (L_p sound pressure level). Čeprav so vse tri vrednosti z enoto decibel (dB) gre za popolnoma različne fizikalne veličine. Za jakost in tlak hrupa, ki ga seva elektrarna, je potrebno navesti razdaljo na katere se te vrednosti nanašajo, medtem ko je moč hrupa, ki jo seva elektrarna, podobna toploti radiatorja, ki z razdaljo pada. Zvočno moč se neposredno ne da meriti, zato je pri izrazoslovju treba biti previden.

3.1. Vpliv geometrijske divergence

Raven zvočnega tlaka L_p od sferičnega (točkastega) vira v prostem zvočnem polju pada za 6 dB za podvojeno razdaljo r , ali po naslednji enačbi (1), glej tudi sliko 5 (Čudina, 2014).

$$L_p = L_w - 20 \log_{10} r - 11 + 10 \log K \quad [\text{dB}] \quad (1).$$

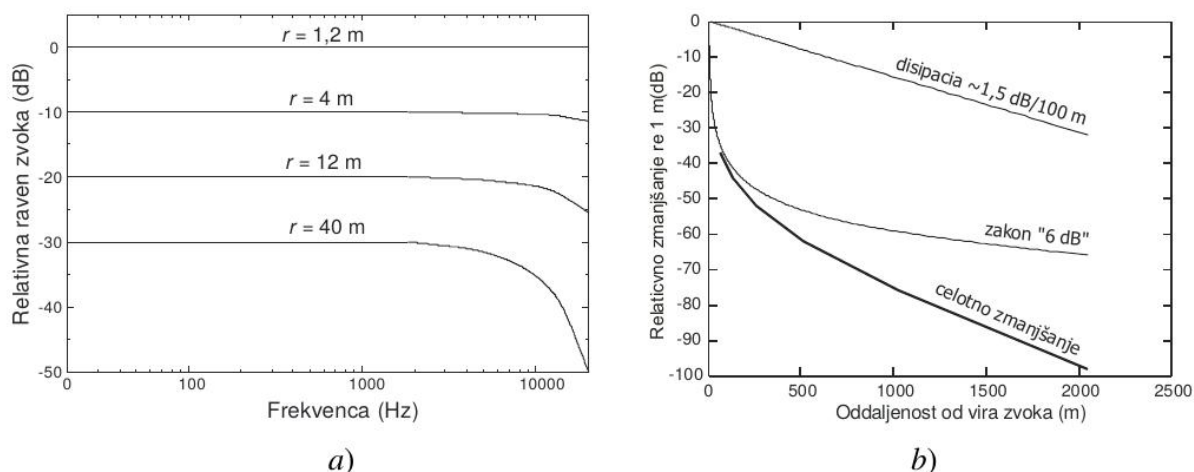
Iz zgornje enačbe vidimo, da je na razdalji $r = 1$ m raven zvočnega tlaka v prostem zvočnem polju za 11 dB manjša od ravni zvočne moči in da se raven zvočnega tlaka L_p zniža za 6 dB, ko se razdalja od vira podvoji, slika 5. Vendar to velja samo v prostem zvočnem polju in ko ni vpliva drugih virov hrupa.



Slika 5. Zmanjšanje ravni z oddaljenostjo od vira hrupa

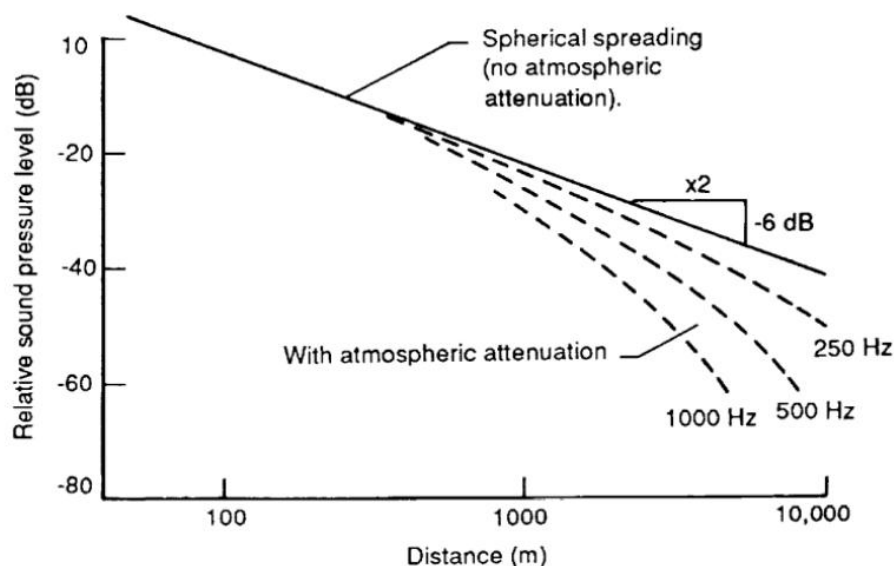
3.2. Vpliv disipacije zvoka v zraku

Pri širjenju zvoka od vetrne elektrarne prihaja do zmanjšanja ravni zvoka tudi zaradi disipacije ali sipanja zvoka v zraku. Disipacija predstavlja izgubo energije zaradi trenja in turbulence zraka, ki se spremeni v toploto. Disipacija zvočne energije v zraku je odvisna od frekvence in razdalje od vira zvoka. Učinek disipacije je tem večji čim večja je razdalja in čim večja je frekvenca zvočnega valovanja, slike 6a. Zaradi disipacije zvoka v zraku jakost zvoka pada za 1,5 dB na 100 m od vira zvoka. Celotno zmanjšanje hrupa je potem vsota zmanjšanja zaradi geometrijske divergence in slabljenja zaradi disipacije zvoka v zraku, slika 6b. Slika 6 kaže, da je delež disipacije tem večji čim večja je razdalja.



Slika 6. a) Vpliv disipacije na zmanjšanje ravni zvoka na različnih razdaljah in frekvenci zvoka, b) zmanjšanje ravni zvoka z oddaljenostjo in z disipacijo zvoka v zraku

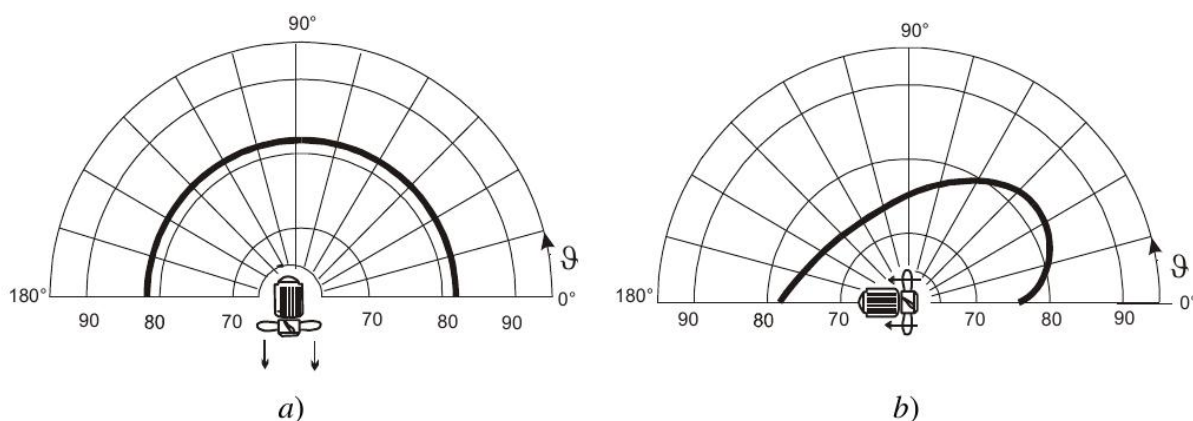
Slika 7 kaže vpliv razdalje in disipacije na zmanjšanje ravni zvoka na različnih razdaljah in pri različnih frekvencah zvoka.



Slika 7. Zmanjšanje hrupa vetrne elektrarne zaradi geometrijske divergence in disipacije

3.3. Vpliv usmerjenosti slike sevanja

Zvočni vir je lahko neusmerjen (sferičen ali točkast), slika 8a, in usmerjen, slika 8b. Slika sevanja neusmerjenega vira je kroglja, na kateri je raven zvočnega tlaka enaka v vseh smereh na istem radiju r , merjeno od vira, ki izseva zvočno moč W . Slika sevanja vetrne elektrarne je usmerjena in je podobna sliki sevanja ventilatorja (slika 8b). To pomeni, da v eno smer seva več zvočne energije kakor v druge smeri.



Slika 8. Slika sevanja: a) neusmerjenega (točkastega) vira in b) slika sevanja usmerjenega vira

Pri usmerjenem zvočnem viru imamo različne ravni na istem radiju r od centra zvočnega vira. Vpliv usmerjenosti za vsakokratni kot ϑ določimo s faktorjem usmerjenosti (DI_{ϑ}) po enačbi:

$$DI_{\vartheta} = L_{p\vartheta} - \bar{L}_{p,ref} \quad [\text{dB}] \quad (2),$$

pri tem sta $L_{p\vartheta}$ - raven zvočnega tlaka, merjena na razdalji r in pri kotu ϑ od vira, ki seva moč W v prosto zvočno polje, in $\bar{L}_{p,ref}$ - prostorsko povprečena referenčna raven zvočnega tlaka,

merjena na isti razdalji r , oziroma krogli površine $4\pi \cdot r^2$, ki obdaja vir od neusmerjenega točkastega vira enake zvočne moči W , v prostem zvočnem polju. Faktor usmerjenosti DI_g je lahko pozitiven ali negativen. Pri usmerjenih zvočnih virih, po sliki 8b, moramo v osnovno enačbo (1) za raven zvočnega tlaka dodati še faktor usmerjenosti DI_g :

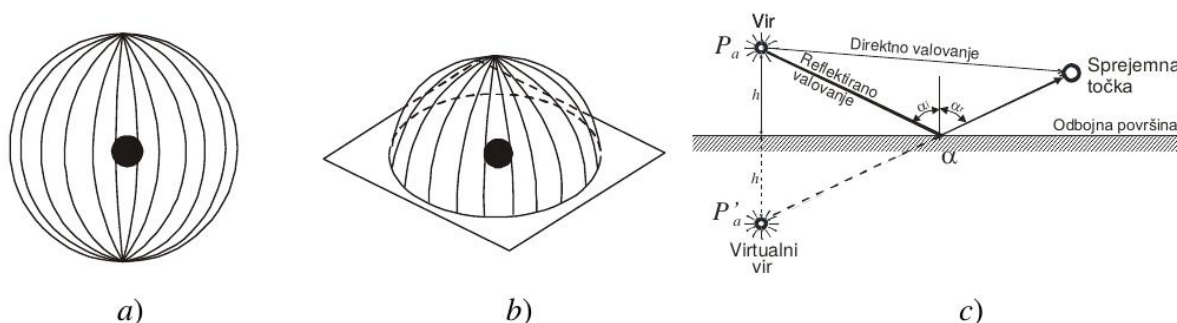
$$L_{p,g} = L_W - 20 \log_{10} r - 11 + 10 \log K + DI_g \quad [\text{dB}] \quad (3).$$

3.4. Vpliv odbojnih površin

Raven zvočnega tlaka na določeni razdalji od vetrne elektrarne je odvisen tudi od odbojnih površin ob katerih se zvok širi. Vetrna elektrarna v bližini seva hrup nemoteno v vse smeri enako, slika 9a. V makro skali pa predstavlja elektrarna vir na tleh, kar pomeni, da se del energije odbije do poslušalca tudi od tal. V tem primeru vetrna elektrarna seva po polkrogli ali samo v dva kvadranta, po sliki 9b, s prostorskim kotom $Q = 2$. Indeks usmerjenosti ali odboja izračunamo s pomočjo naslednje enačbe (4).

$$DI_Q = 10 \cdot \log_{10}(Q) = 10 \cdot \log_{10}(2) = 3 \text{ dB} \quad (4).$$

Raven hrupa na radiju r je torej večja za 3 dB, če vir seva po polkrogli, kakor pa po krogli. To pomeni, da vsebuje zvočno polje zvočno energijo, ki jo seva zvočni vir direktno k opazovalcu, in še zvočno energijo reflektirano od tal, slika 9c.



Slika 9. Vpliv odbojne površine na indeks usmerjenosti zvočnega vira: a) neusmerjen vir, b) usmerjen vir in c) prispevek odbitega zvoka od tal oz. indeksa usmerjenosti DI_Q

Vrednosti faktorja odboja DI_Q prištejemo enačbi (1) oz. (3) po enačbi (5):

$$L_p = L_W - 20 \log_{10} r - 11 + 10 \log K + DI_g + DI_Q \quad [\text{dB}] \quad (5),$$

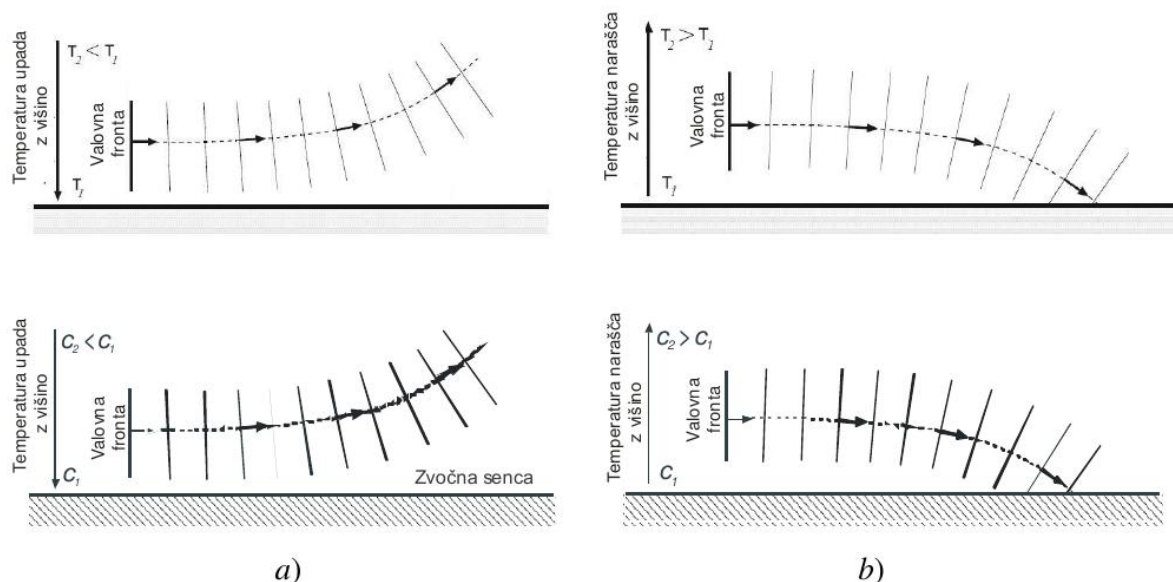
Indeks odboja Q dejansko ni 2, ker vetrnica ni na tleh in ker tla pod elektrarno niso popolnoma reflektirajoča, pa tudi ne čisto ravna. Zaradi lege vira 100 m nad tlemi in zaradi neravne konfiguracije terena in absorpcije zvoka v tleh, travi in grmičevju, je ta indeks odboja Q manjši in znaša lahko tudi le 1,3 in manj, tako da je faktor odboja DI_Q le dober decibel in manj. V takih primerih se odbijejo le nizke frekvence, medtem ko se višje in zalsti visoke frekvence absorbirajo v tleh in ne vplivajo bistveno na hrup na mestu imisije.

3.5. Vpliv refrakcije ali ukrivljanja zvočnega valovanja zaradi vremenskih prilik

Zvočno valovanje se samo v idealnih pogojih širi premočrtno v vse smeri. Zaradi nehomogenosti (različne gostote) zraka skozi katerega se širi zvočno valovanje in posledično različnih hitrosti širjenja zvočnega valovanja prihaja do refrakcije ali uklona zvočnega valovanja. Hitrost zvoka, namreč, narašča s temperaturo po enačbi (6):

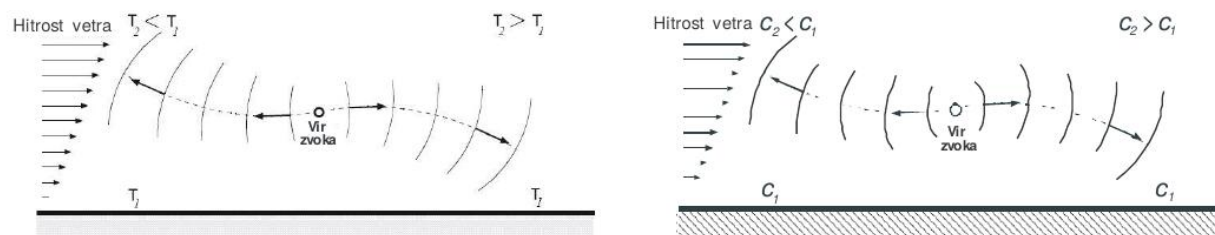
$$c = \sqrt{\kappa \cdot R \cdot T} = 20,05\sqrt{T} \quad (6),$$

pri čemer je κ razmerje specifičnih toplot (c_p/c_v), R je plinska konstanta v J/kgK in T absolutna temperatura v K. Običajno temperatura zraka pada z višino, zato z višino prihaja do uklona zvoka navzgor, slika 10a. Če temperatura narašča z višino, v primeru temperaturne inverzije, se zvočno valovanje v smeri širjenja valovanja ukloni navzdol, slika 10b. Pri višjih temperaturah se premaknejo tudi piki poudarjenih frekvenc rotacije in rotorskih lopatic proti višjim frekvencam.



Slika 10. Pojav refrakcije: a) zaradi padanja in b) zaradi naraščanja temperature z višino

Podobno spremembi temperature prihaja do nehomogenosti zraka tudi zaradi gradienta hitrosti vetra. Hitrost vetra ob tleh je nič in narašča do svojega maksimuma na ustrezni višini od tal. Če veter piha v smeri širjenja valovanja se njegova smer ukloni navzdol in obratno, če piha proti smeri širjenja valovanja pa se valovanje ukloni navzgor, slika 11. Pri umeščanju v prostor je treba upoštevati optimalno smer hitrosti, razen v primeru, če vetrna elektrarna ima regulacijski sistem za njeno usmerjanje v smeri maksimalne hitrosti vetra.

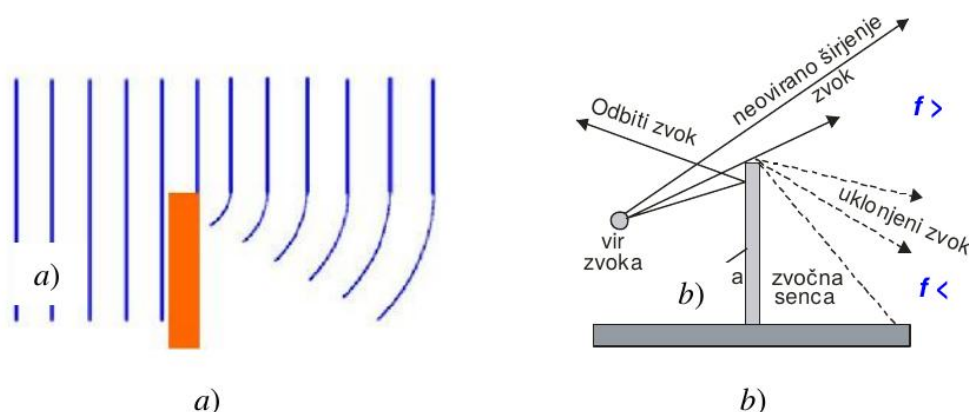


Slika 11. Pojav refrakcije zaradi hitrosti vetra

3.6. Vpliv difrakcije ali uklona zvočnega valovanja

Če pa se merilno mesto nahaja za oviro ali za hribom oz. v senci glede na vetrno elektrarno, potem je treba upoštevati tudi difrakcijo oz. uklon zvočnega valovanja, zlasti pri analizi zvočnega spektra, slika 12. Visoke frekvence se, namreč, ne uklonijo in jih ne zaznamo v spektru hrupa za hribom.

Zaradi vsega zgoraj navedenega je treba pri umeščanju v prostor upoštevati zgornje zakonitosti in v poročilih o meritvah hrupa natančno popisati mesto meritev, razdaljo od stebra vetrnice in smer glede na os turbine (vetrnice). Poleg tega je potrebno opisati tudi konfiguracijo terena in njegovo odbojnost oz. absorptivnost, temperaturo okolice in seveda hitrost vetra in njegovo smer in časovno dinamiko.



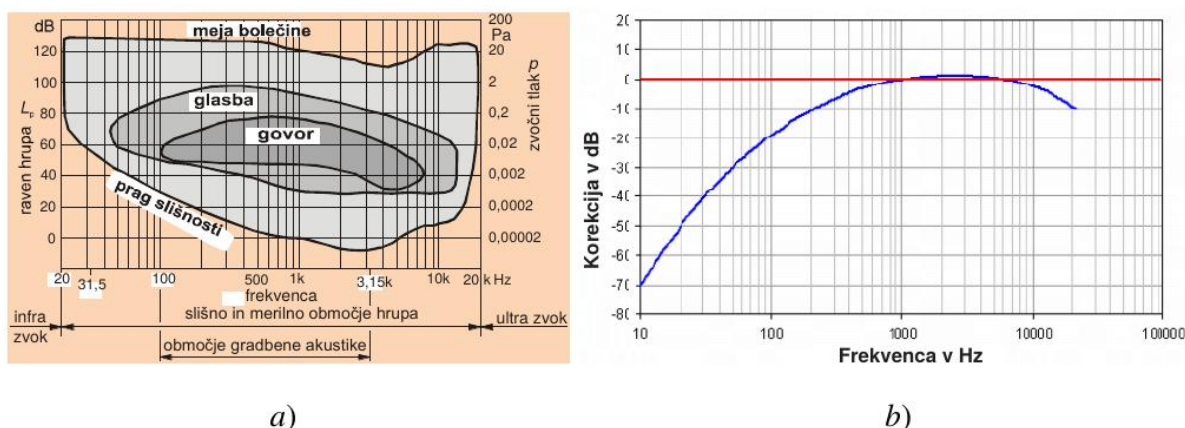
Slika 12. a) Pojav difrakcije oz. uklona zvoka in b) uklon zvoka z različnimi frekvencami

4 VPLIVI HRUPA NA LJUDI

Kakšen je vpliv hrupa na ljudi (in živali) je odvisno predvsem od njegove jakosti, časa trajanja in njegove sestave v časovni in frekvenčni domeni. V časovni domeni je važna prisotnost impulzov, v frekvenčni domeni pa prisotnost poudarjenih tonov. Pri vetrnih elektrarnah je hrup brez impulzov, a spekter hrupa značilno širokopasoven s izrazitimi toni pri zelo nizkih frekvencam pod 400 Hz, slika 4. Poudarjeni toni, zaradi FRR in FRRL ter njihovih višjih harmonikov, so v območju infrazvoka in zato izven merilnega območja in Uredbe o hrupu.

4.1. Vplivi ravni in spektra hrupa

Slika 4a predstavlja spekter hrupa v dB(lin) oz. v linearni skali. Človeško uho takega spektra ne sliši v celoti. Zlasti to velja za nizke frekvence pod 1 kHz. Na pragu slišne frekvence 20 Hz človeško uho ne sliši jakosti hrupa do 70 dB. Podobno velja za zgornji prag slišne frekvence pri 20 kHz, slika 13a. Območje praga slišnosti človeškega ušesa je na sliki 4b prikazano z rumeno krivuljo. Zaradi tega se z merilniki meri korigirana ali utežena vrednost zvočnega tlaka oz. hrupa, po tim. A-vrednoteni skali, ki prilagodi izmerjeno vrednost hrupa tisti, ki jo ki jo človek sliši to je krivulji praga slišnosti na sliki 13a. Krivulja praga slišnosti je poenostavljena in prikazana na sliki 13b in predstavlja vrednost, ki jo moramo odšteti ali prišteti od izmerjene linearne ravni hrupa. To pomeni, da nizkih frekvenc na sliki 13 sploh ne slišimo. S tega vidika je hrup vetrnih elektrarn skoraj nenevaren.



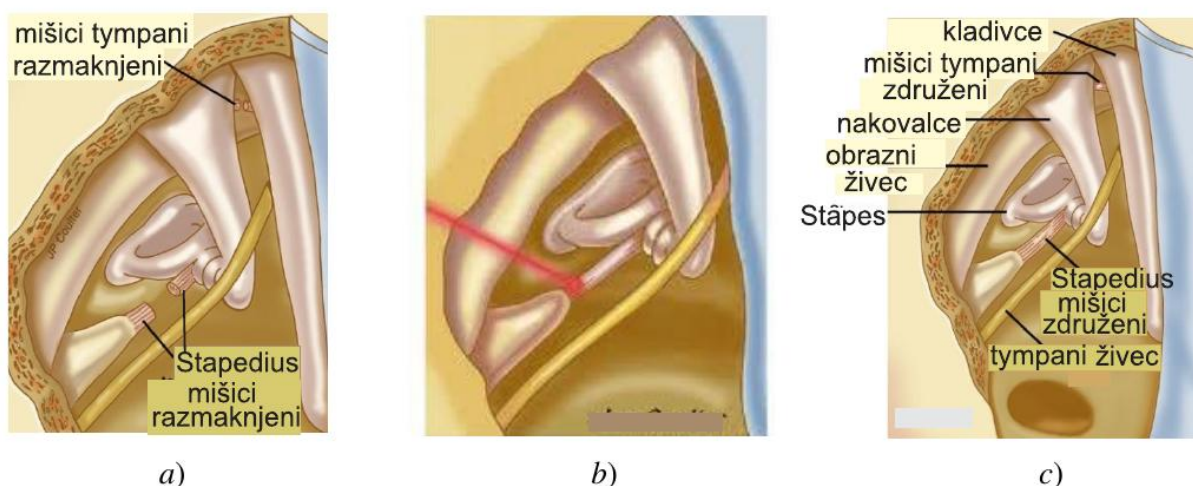
Slika 13. a) Slišno območje človeškega ušesa in b) A-vrednotena krivulja za korekcijo

Slika 4a kaže primer spektra hrupa pri manjši hitrosti vetra, če so hitrosti večje, proti 20 m/s in več, so spektri hrupa bistveno višji, z višjimi amplitudami, tudi pri nizkih frekvencah, slika 4b. Pri vrtilni frekvenci rotorja 22 obratov na minuto je frekvenca rotacije (FRR) 0,37 Hz in frekvenca rotacije treh rotorskih lopatic (FRRL), pa 1,1 Hz, kar pomeni, da sta ti dve frekvenci globoko v področju neslišnega infrazvoka, slika 13. Tudi njuni prvi, drugi in tretji harmoniki, ki praviloma izstopajo iz spektra, so v področju infrazvoka in tako neslišna. A to ne pomeni, da jih človeški organizem ne zazna, nasprotno, prenašajo se preko kosti in s pritiskom zvoka v zraku na notranje dele telesa in lahko povzročajo tresljaje ali dražljaje.

Vetrna elektrarna povzroča hrup tudi v slišnem delu spektra v glavnem v spodnjem delu spektra kot nizkofrekvenčni hrup. V tem frekvenčnem območju so občutljive votle strukture telesa, kot so prsni koš, glava in očesna votlina, katerih je resonančna frekvenca približno (odvisno od velikosti in konstrukcije človeka) 5 Hz za prsni koš, 20 Hz za glavo in 80 Hz za očesno votlino. Vendar bi do poškodb lahko prišlo le v primeru, če bi bili izpostavljeni tem frekvencam dalj časa in na istem nepremičnem položaju, na primer pri ležečih bolnikih in starejših, ki so ujeti v krogu svojega doma. Drugi mlajši se običajno stalno premikajo, selijo se iz kraja v kraj in povrh so bolj odporni, saj se njihov organizem hitreje prilagodi novim spremembam, posebej pri otrocih. Problem je tudi ta, da infrazvok in nizkofrekvenčni hrup ima velike valovne dolžine, ki so zelo prodorne in segajo na velike razdalje, celo do 5 km.

Človeški organizem nasploh, tako tudi uho, ima sposobnost relativno hitre adaptacije, to je prilagoditve novi situaciji in tako tudi hrupu. Običajnim ravnem hrupa do 65 dB(A) se prilagodimo v par tednov ali mesecev, višjim ravnem do 85 dB(A), pa se prilagodimo v nekaj mesecih ali letu. Pri še višjim ravneh hrupa, nad 85 dB(A), se prilagodimo v nekaj letih, vendar na račun izgube sluha in drugih zdravstvenih težav.

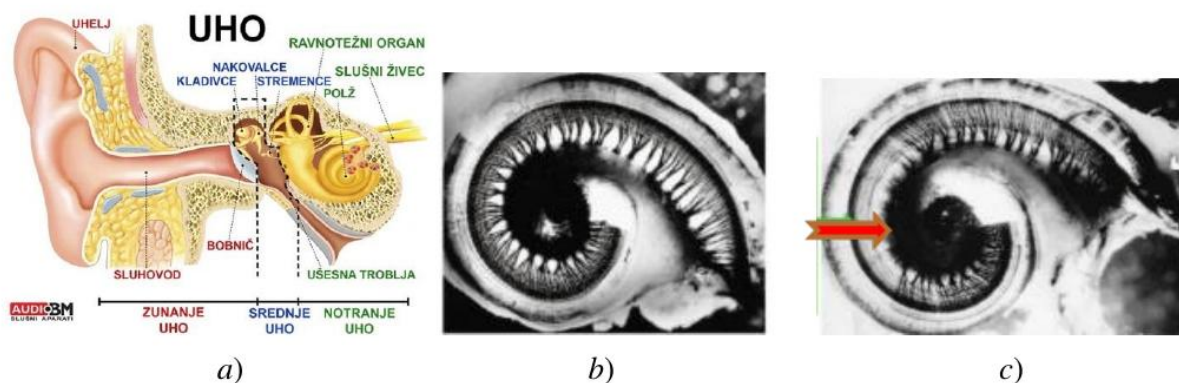
Pri višjih ravneh in višjih frekvencah hrupa človeško uho ima tudi svoj lastni zaščitni mehanizem, s pomočjo koščice stapediusa, slika 14, ki je del stremenca in predstavlja najmanjšo skeletno mišico v človeškem telesu, slika 14a. Deluje na principu refleksa na povišane amplitude zvočnega valovanja, oziroma na principu iztegovanja na vratu te kosti. To preprečuje odvečno gibanje stremenca (stapesa) oziroma duši njegove vibracije, kar pomaga nadzorovati amplitude zvočnih valov, ki prihajajo iz zunanega okolja v notranje uho. Na ta način ščiti notranje uho pred visokimi ravnmi hrupa. V prisotnosti zvočnih dražljajev visoke intenzitete se stapedius in tenzor tympani mišice zožita in raztegneta tako, da se spojita (združita), slika 14a-c.



Slika 14. Stapedius za varovanje sluha pred čezmernim hrupom: *a)* stapedius koščici (kiti) razmaknjene, *b)* deformacija koščic stapediusa v prisotnosti hrupa v fazi zraščanja in *c)* stapedius koščici v prisotnosti hrupa združeni

Pride do akustičnega refleksa (dušilnega refleksa), ki nastane kot posledica nehotenega krčenja mišic v srednjem ušesu, kot odgovor na zvočne dražljaje visoke intenzitete. Ta refleks zmanjša prenos vibracijske energije od stremenca do polža za približno 20 dB, kar povzroči dejansko znižanje hrupa, ki doseže notranje uho, slika 15a.

Če je hrup čezmeren dalj časa, pride do poškodbe ali celo izgube sluha. Pri čezmernem hrupu se dejansko poškodujejo dlačnice v polžu, slika 15b. Poškodujejo se tem bolj čim dalj časa so izpostavljene hrupu. Po dolgotrajnem »bombardiranju« dlačnic s čezmernim hrupom se te postopoma »utrujajo«, dokler na koncu popolnoma ne odmrejo, slika 15c, in povzročijo izgubo sluha delno ali popolno. Stopnja izgube sluha je odvisna od tega, koliko dlačnic je poškodovanih in v katerem delu polža.



Slika 15. *a)* Zgradba ušesa, *b)* nepoškodovan polž in *c)* močno poškodovan polž

Poškodba dlačnic v polžu je hitrejša v prisotnosti impulzov in poudarjenih tonov, zaradi tega zakonodaja takšen hrup sankcionira s ponderjem, za impulzni hrup s 5 do 12 dB in za poudarjeni ton s 4 dB. Postopek določanja ponderja je odvisen od stopnje intenzivnosti pulza in od tega v katerem delu spektra je poudarjeni ton (Čudina, 2014).



4.2. Vpliv drugih dejavnikov na izgubo sluha in psihofizične motnje

Poškodba in izguba sluha ni vedno posledica izpostavljenosti čezmerni ravni hrupa. Na izgubo sluha lahko vplivajo še drugi dejavniki, kot so geni, bolezni in staranje. Tu so še psihofizične preobremenitve (izgorelost) in lažna naglušnost. Pogosto velja, da če so bili stari starši ali starši popolnoma gluhi ali delno naglušni obstaja velika verjetnost, da se bo ta prenesla na potomce v podobni ali milejši obliki, tako kot nekatere druge bolezni. Zato zdravniki vedno sprašujejo, kakšne bolezni so prestajali vaši starši?

Poleg genov na izgubo sluha vpliva prebolela ali akutna bolezen. Značilni primer je meningitis in tumor v glavi. Pri meningitisu postaja skotom v slišnem spektru čedalje globlji, običajno pri določeni frekvenci (npr. 4 kHz) (Jerman and Čudina, 2001). Pri tumorju v glavi, če se pojavi v bližini slušnega živca, ga ta kmalu popolnoma neutralizira in živec svojo funkcijo prenosa električnih signalov od polža do možganov kmalu trajno izgubi. Na to uho dotični postane gluhi.

Izguba sluha je pogosto posledica tudi staranja, zlasti po 70 letu starosti. Do skotoma prihaja v širšem delu spektra, zlasti pri višjih frekvencah nad 4 kHz, ker bobnič in drugi deli prenosnega sistema, slika 15a, postajajo čedalje bolj okorni in neelastični, kar je predpogoj za dobro sluhnost. Občutljivejša dlačnice s staranjem postanejo neobčutljive na zvočne dražljaje.

In nenazadnje je tu še lažna naglušnost znana kot otoakustična emisija, ki predstavlja spontano zvočno sevanje ušesa jakosti 20 dB, največkrat v območju 1-2 kHz. Zvočno sevanje ušesa ali otoakustična emisija se pojavi v zunanjem sluhovodu v odsotnosti zunanjih zvočnih dražljajev pri 50 do 60 % zdravih ušes. Če pa je izguba sluha večja od 30 dB je ni in jo tudi ne moremo izzvati niti z zunanjim dražljajem. Če pa jo lahko izzovemo z zunanjim vzbujanjem lahko izključimo težjo okvaro sluha (Vatovec et al., 1998).

5 ZAKLJUČKI

Hrup vetrnih elektrarn ne predstavlja večji okoljski problem, če so postavljene na razdalji večji od 500 m od prvega naselja, saj so njihove ravni že na razdalji 300 m večinoma manjše od 45 dB(A). Problem je z nizkofrekvenčnim hrupom in infrazvokom, ki se pojavljata pri nizkih frekvencah z dolgimi valovnimi dolžinami, ki segajo daleč tudi do 5 km, in ga uho in merilni inštrument ne zaznata. Mnogi eksperti zatrjujejo, da nizkofrekvenčni hrup in infrazvok imata določen (škodljiv) vpliv na človeški organizem, ker se prenaša v obliki vibracij preko kosti in kot pritisk zvoka v zraku na površino telesa, ki povzročata pri ljudeh (in živalih) tresljaje in nezaželene dražljaje. Ti pojavi so lahko vsaj neprijetni, če ne škodljivi, za določene dele organizma. Škodljivi so lahko zlasti v primeru, če pride do koincidence s resonanco nekaterih delov telesa (npr. očesne votline, glave ali prsnega koša) in smo izpostavljeni tem vplivom dalj časa. Lahko negativno vplivajo tudi na sprostitvev, koncentracijo in sposobnost (pri otrocih) za učenje. V tem prispevku sem želel opozoriti, da je vse te ugotovitve treba jemati z rezervo in jih ne posploševati za vse čase in na vse primere, ker smo izpostavljeni vsakodnevno tudi drugim vplivom, ki nas spremljajo v življenju. To pomeni, da je tendenciozno nizkofrekvenčnemu hrupu in infrazvoku pripisovati vsemogoče psihofizične motnje ali fizične spremembe in deformacije pri ljudeh in živalih. Vsak od nas nosi svoj gen, vsak od nas je izpostavljen samo svojim okoljskim vplivom in vsak od nas je za nečim bil bolan (on ali njegovi starši) in nenazadnje nismo vsi enako dnevno psihično in fizično obremenjeni. In občutljivi. Zato je vsaka motnja, bolezen ali sprememba individualna i značilna za posameznika, samo njemu lastna, ker je vzrok lahko vsakič drugačen, dokler se ne ugotovi, da je to splošen problem, »epidemija«, ki sloni na statistiki.

REFERENCE

Alves-Pereira M., Rapley B., Bakker H. and Summer R. *Infrasound and Low Frequency Noise: Public Health Nightmare*, Vabljeno predavanje, Ljubljana 25. 5. 2018.

Ashtiani P. and Denison A. *Spectral discrete probability density function of measured wind turbine noise in the far field*. *Frontiers in Public Health*, 7 April 2015, pp. 1-9 <https://doi.org/10.3389/fpubh.2015.00052>.

Čudina M. *Tehnična akustika*, II. predelana izdaja, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, Slovenija, 2014.

Environmental Noise Guidelines for the European Region. WHO Regional Office for Europe, UN City, Marmorvej 51, DK-2100 Copenhagen Ø, Denmark, Available online: URL accessed on 6. 1. 2018. http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0008/383921/noise-guidelines-eng.pdf?ua=1

Jerman A., Čudina, M. *Poškodbe sluha - vzrok in posledice = Hearing impairment - causes and consequences*, *EGES*, *Energ. gospod. ekol. Slov.*, jun.-jul.-avg. 2001, letn. 5, 3, str. 98-103.

Vatovec J., Žargi M., Alčin B. and Ponikvar B. *Otoakustična emisija in lažna naglušnost*, Prvi kongres Slovenskega društva za akustiko, 7.-8. Oktober 1998, Potrož, pp. 365-368.

Žukienė L., Kanapickas A. and Žukas S. *Spectrum analysis of wind turbine noise in Vydmantai*. *Ekologija*. 2011. T. 57. Nr. 2. pp. 81-85.



STRATEGIES TO IMPROVE WIND FARM NOISE COMPLIANCE ASSESSMENT

Kristy L. Hansen^{1*} and Branko Zajamsek²

¹*College of Science and Engineering, Flinders University, Tonsley, 5042, Australia*

²*Adelaide Institute for Sleep Health, College of Medicine and Public Health, Flinders University, Bedford Park, 5042, Australia*

*Corresponding author:

E-mail address: kristy.hansen@flinders.edu.au (K.L. Hansen)

ABSTRACT

Despite compliance with local guidelines, there have been widespread global complaints regarding wind farm noise. A possible reason for this is that current methodologies used to assess compliance are inadequate. The main challenge with attempting to assess the long-term exposure of residences surrounding wind farms is to separate the wind farm noise contribution from ambient sound. Typically, wind farm compliance with allowable noise limits is assessed using short-term on/off measurements or using long-term measurements taken during continuous wind farm operation. The first approach is not preferred by operators due to the associated costs whereas the second approach is prone to error as the highest measured noise levels are disregarded. Aside from these factors, there are other disadvantages with current techniques that will be explored in more detail in this paper. Moreover, this paper will present some of the latest techniques that are being developed to separate wind farm noise from background noise. In addition, this paper will discuss special acoustic characteristics of wind farm noise that can contribute to annoyance and review some of the latest research on assessment procedures. Further refinement of the methods for background noise removal and methods for assessing special acoustic characteristics will result in more reliable and realistic compliance testing procedures.

Key words: wind farm noise, compliance, background noise removal, special acoustic characteristics



1 INTRODUCTION

Whenever a wind farm development is proposed, noise levels at all noise-sensitive locations are calculated and the resulting values are compared to allowable limits. These calculations are usually performed using a noise prediction model such as the international standard, ISO 9613-2 (1996), which has proven effective for a wide range of environmental noise sources. However, there are limitations to using the ISO 9613-2 (1996) model for the specialized application of wind farm noise (Kalapinski & Pellerin, 2009) and hence, the calculated values should be interpreted with caution (Öhlund & Larsson, 2015; Søndergaard & Plovsing, 2009). While ISO 9613-2 (1996) states uncertainty estimates, these are rarely provided when wind farm noise predictions are made. In fact, in Australia there have been cases where the predicted values were equivalent to the allowable limit for an approved wind farm development. This allows no leeway for uncertainty in predictions.

Post-construction compliance measurements provide an opportunity to verify predictions and confirm that a new wind farm development adheres to allowable noise limits. They are a requirement of some regulatory authorities and a form of reassurance for the local community that wind farm noise emissions do not exceed predicted values. However, assessing wind farm compliance is challenging due to the relatively low noise levels involved and the presence of numerous other noise sources. To overcome these issues, compliance assessment procedures seek to reduce the influence of the background noise contribution. However, current methods used to achieve this goal are not scientifically justified, and there is no evidence to suggest that they are protecting the amenity of people who are living near wind farms.

Despite wind farm compliance with overall A-weighted allowable limits, the number of complaints can still exceed the expected amount due to the presence of special acoustic characteristics such as low-frequency noise, tonality, amplitude modulation and possibly infrasound (Kelley, 1987; Persson-Waye, Clow, Edwards, Hucklebridge, & Rylander, 2003; Salt & Hullar, 2010; Schaffer et al., 2016). Currently, special acoustic characteristics are not included in noise prediction models and there are no standard assessment procedures for typical residential locations.

This paper will investigate the limitations of current approaches used to predict wind farm noise levels and to assess compliance with allowable limits. The potential for future improvements will be discussed, with reference to the latest research in this area.

2 LIMITATIONS OF ISO 9613-2

The ISO 9613-2 (1996) prediction model is popular due to its simplicity and proven effectiveness for modelling environmental noise propagation (Kalapinski & Pellerin, 2009). However, for the specific application of predicting wind farm noise at receivers located more than 1 km from a wind farm, there are some limitations that increase the uncertainty of the predicted values. These limitations are listed below (C. H. Hansen, Doolan, & Hansen, 2017):

- Although it is stated that downwind propagation is assumed, it is not clear how meteorological conditions are modelled. There is certainly no evidence that actual worst-case meteorological conditions, such as atmospheric temperature inversions, wind inversions, and low-level jet streams, have been considered (Kalapinski & Pellerin, 2009).



- ISO 9613-2 has only been validated for source heights of less than 30 m above the ground and for distances between source and receiver of less than 1 km.
- Only wind speeds between 1 m/s and 5 m/s (measured between 3 m and 11 m above the ground) are valid.
- The method for calculating the ground effect is applicable only to ground which is approximately flat, either horizontally or with a constant slope.
- No allowance is made for the attenuation effects of scattering due to atmospheric turbulence.
- As for all models, the ISO model assumes that the wind turbine sound power levels as a function of wind speed at rotor height are accurate. In most cases, turbine sound power levels are derived from measurements made on flat ground with a smooth horizontal air flow into the turbine rotor. These conditions deviate considerably from those generally found in practice. Even if these factors are ignored, sound power measurements have an associated uncertainty of approximately 2 dBA (Institute of Acoustics, 2014a).

Even when modelling ‘worst-case’ downwind conditions using ISO 9613-2 (1996), instances have been reported for which measured wind farm noise levels exceeded predicted noise levels by up to 6 dBA overall (Kock, Cruz, & Trautsch, 2017; Öhlund & Larsson, 2015) and 5-6 dBA in one or more octave bands (Schillemans, van Caillie, Courret, & Le Bourdat, 2017; Søndergaard & Plovsing, 2009). Additionally, Öhlund and Larsson (2015) observed that improved agreement between predictions and measurements could be achieved by using a harder ground factor than the actual ground factor. Uncertainties are also expected to increase for source-receiver separation distances greater than 1.7 km (Stephen E Keith, Daigle, & Stinson, 2018). Moreover, for a concave topography between the source and receiver, Tom Evans and Cooper (2012) found that ISO 9613-2 underpredicted noise levels by 2 - 5 dBA. On the other hand, Tom Evans and Cooper (2012) also reported that the ISO 9613-2 model over-predicted noise levels at sites with flat topography or steady downward slopes. However, these sites were also typically located less than 1.2 km from the nearest wind turbine. ISO 9613-2 (1996) provides an estimated uncertainty of the predictions over the range that it was intended to be used (see above), which is at least ± 3 dBA (ISO 9613-2, 1996), although ± 4 dBA is probably more realistic when uncertainties in the turbine sound power levels are taken into account (K. L. Hansen, Zajamsek, & Hansen, 2018).

3 LIMITATIONS OF COMPLIANCE ASSESSMENT METHODS

Typically, wind farm compliance with allowable noise limits is assessed either by taking short-term on/off measurements or by taking long-term measurements and determining the average noise level at each hub-height wind speed. The limitations associated with both approaches will be discussed below.

3.1. On/off testing

This approach is specified in the AS 4959 (2010) and NZS 6808 (2010) standards on wind farm noise. Measurements of the $L_{Aeq,10min}$ (AS 4959, 2010) or $L_{Aeq,2min}$ (NZS 6808, 2010) are obtained when the wind farm is both operational and shutdown (‘on/off’ testing) during worst-case conditions at the receiver of interest. Worst-case conditions are selected based on either a range of hub-height wind speeds considered ‘critical’ (AS 4959, 2010) or based on



the wind turbine/farm power output data (NZS 6808, 2010). The good practice guide to application of ETSU-R-97 (Institute of Acoustics, 2014b) reserves ‘on/off’ testing for situations of non-compliance and it is not generally the preferred method for the following reasons:

- For large grid-connected wind farms, turning multiple turbines off and back on over relatively short time frames can result in large power variations from the wind farm, which need to be managed within the electricity system (NZS 6808, 2010).
- Worst-case conditions correspond to periods when the wind power output is relatively high and thus wind farm shutdowns result in lost revenue for wind farm operators.
- Wind turbines make noise even when turned off, due to the generator left running and wind blowing past the blades.
- Meteorological conditions can change significantly between measurements.

3.2. Long-term measurements

This approach is described in the AS 4959 (2010) and NZS 6808 (2010) standards on wind farm noise, the SA EPA guidelines (EPA, 2009) and the good practice guide to application of ETSU (Institute of Acoustics, 2014b). To obtain the required number of data points, 10-14 days of continuous measurements are required, depending on the relevant procedure. Realistically, measurements take approximately 1 month, when factoring in extraneous noise contamination and downwind data requirements.

To minimize the influence of transient noise events such as wind gusts, dogs barking, aircraft flyovers and so on, the noise level exceeded for 90% of the time, $L_{A90,10\text{min}}$ is measured instead of the $L_{Aeq,10\text{min}}$, which is used to specify allowable limits. This measurement of the $L_{A90,10\text{min}}$ contains the combined contribution of wind farm and background noise. Regardless of this, the AS 4959 (2010) standard assumes that the $L_{A90,10\text{min}}$ represents the wind farm only contribution due to the commonly assumed difference between the $L_{A90,10\text{min}}$ and $L_{Aeq,10\text{min}}$ of 1.5 – 2.5 dB (ETSU, 1996). The NZS 6808 (2010) standard and good practice guide (Institute of Acoustics, 2014b) specify logarithmic subtraction of the average background $L_{A90,10\text{min}}$ noise levels from the average operational $L_{A90,10\text{min}}$ levels at each integer hub-height wind speed. To determine compliance with allowable limits, the ‘wind farm only’ $L_{A90,10\text{min}}$ is plotted against the hub height wind speed and a line of best fit is drawn through the data. Some of the issues associated with the methodology described above are as follows (K. L. Hansen et al., 2018):

- The $L_{A90,10\text{min}}$ and $L_{Aeq,10\text{min}}$ quantities are not equivalent for wind farm noise. This assumes that wind farm noise is a continuous noise source, which is not consistent with the literature (Bray & James, 2011; Large & Stigwood, 2014).
- There is no evidence to suggest that the background noise contribution is high enough to result in a 1.5 – 2.5 dB contribution to the overall level as assumed by the AS 4959 (2010) standard.
- The commonly assumed difference between the $L_{A90,10\text{min}}$ and $L_{Aeq,10\text{min}}$ of 1.5 – 2.5 dB is ignored by many standards and guidelines (EPA, 2009; Institute of Acoustics, 2014b; NZS 6808, 2010), which recommend an additional procedure to remove background noise.
- Logarithmic subtraction is an invalid operation for percentile data (that is, $L_{A90,10\text{min}}$) (Nelson, 1973).



- Subtracting averaged data (EPA, 2009; Institute of Acoustics, 2014b; NZS 6808, 2010) is not equivalent to subtracting the simultaneously existing background noise from individual measurements and then calculating an average of the results.
- Background noise levels at a residence are usually correlated with the wind speed at the residence, but the wind speed at the residence is not necessarily correlated with the wind speed at hub height.
- Background noise levels are subject to change on a seasonal basis due to changes in farming activity, vegetation, surf size and river flow, etc. Therefore, the background regression curve may not be representative of all times of year.
- The ‘average’ noise level as defined by the regression curve does not necessarily represent the level of wind turbine noise. In fact, in the worst-case scenario, where the wind farm noise regression curve was the same as the allowable limit curve, the wind farm would be allowed to exceed the allowable limit for 50% of the time.

3.3. Special acoustic characteristics

Several criteria for low-frequency noise have been published with a focus on outdoor or indoor overall C-weighted levels, overall low-frequency A-weighted levels and allowable levels in each 1/3-octave band as follows:

- N Broner (2011) recommended that a desirable level is 60 dB(C) for a low-frequency noise source that operates continuously (24/7) and/or at night-time. This criterion was incorporated into the NSW guidelines on wind farm noise (NSW EPA, 2016).
- The overall C-weighted minus A-weighted (dBC - dBA) value is no more than 15 dB (Kjellberg, Tesarz, Holmberg, & Landström, 1997) or 20 dB (Norman Broner & Leventhall, 1983).
- The Danish guidelines specify an allowable indoor noise of 20 dBA for 1/3-octave bands from 10 Hz to 160 Hz.
- The DEFRA criteria (Moorhouse, Waddington, & Adams, 2011) specify allowable limits of indoor 1/3-octave band L_{eq} levels in the frequency range, 10 Hz to 160 Hz.
- The Japan Ministry of Environment criteria state allowed outdoor 1/3-octave band L_{eq} levels in the frequency range, 5 Hz to 80 Hz (Japanese Ministry of Environment, 2004).

A limitation of the methods presented above is their use in isolation. For instance, considering the overall C-weighted level or dBC – dBA exclusively will result in false positives in the results. On the other hand, comprehensive spectral analysis can be complex for compliance assessment purposes (Downey & Parnell, 2017).

A simplified method of tonality assessment is provided in Annex D of ISO1996-2 (2007). This method involves comparison between the 1/3-octave band where the possible tone exists and the adjacent 1/3-octave bands. However, this procedure does not always identify tones that are found to be audible using other methods (T. Evans & Cooper, 2015), possibly due to wind farm amplitude modulation and the associated sidebands (C. H. Hansen et al., 2017). More reliable methods are outlined in international standards (IEC 61400-11 Ed.3.0, 2012; ISO1996-2, 2007) and German standards, (DIN 45680, 2013; DIN 45681, 2005). However, limited information is provided on how to assess tonality at a residence. According to measurements of tonality at seven different wind turbines carried out by T. Evans and Cooper (2015), it was found that for each turbine, an audible tone occurred that may not have been detected through assessment carried out in strict accordance with IEC 61400-11 (2012).



A considerable amount of research has been recently undertaken to quantify the extent of amplitude modulation and to suggest an appropriate penalty (Bass et al., 2015, 2016). However, a scientifically validated method is still not available for assessing amplitude modulation, and agreement has not been reached regarding how to include an amplitude modulation metric into wind farm noise regulations (Bowdler, Cand, Hayes, & Irvine, 2018).

Regarding infrasound, levels produced by wind farms are relatively low and below the hearing threshold for all but the most sensitive people. However, some current work is being undertaken to determine if people can detect these levels while sleeping and if their presence causes any sleep disruption (Micic et al., 2018). To evaluate infrasound audibility, a threshold of 85 dBG is commonly used, although 2.5% of the population are expected to have a hearing threshold lower than this (C. H. Hansen et al., 2017).

4 NEW APPROACHES FOR PREDICITONS

The discrepancy between measured and predicted noise levels has resulted in several researchers working on more accurate models that include topography and more accurate calculations of ground and meteorological effects (including atmospheric turbulence). One such approach is described as ‘ray tracing’, where ray paths from each turbine source to each receiver are calculated, based on downwind or temperature inverted atmospheric conditions (Franck Bertagnolio, 2016; F. Bertagnolio, Madsen, & Fischer, 2017; Bigot, Economou, & Economou, 2017; K. L. Hansen, Zajamšek, & Hansen, 2019; McBride & Burdisso, 2017). Current research is directed at model validation as well as extending the models to include multiple ground reflections and atmospheric turbulence effects.

More complex theoretical models, including the parabolic equation (PE) and fast-field program (FFP) have also been developed and applied to wind farm noise propagation predictions (Emre Barlas, Wu, Zhu, Porté-Agel, & Shen, 2018; E. Barlas, Zhu, Shen, Dag, & Moriarty, 2017; Stephen E Keith et al., 2018; S.E. Keith et al., 2016; Sessarego, Shen, & Barlas, 2019). These models avoid some of the drawbacks of ray-tracing approaches such as inaccuracies at low-frequencies and issues related to modelling cases that include strong upward refraction (Ostashev & Wilson, 2016). However, as mentioned by West, Sack, and Walkden (1991), the FFP model has its own drawbacks which include errors at large range and inability to model propagation through an unstratified atmosphere or over a ground with a spatially varying impedance. Kelly, Barlas, and Sogachev (2018) have used the PE method to develop a statistical model to predict the long-term noise level statistics at residential locations up to several kilometers from the turbine noise source. As with ray tracing, the PE method can model arbitrary terrains and atmospheric conditions.

Current research is directed towards making the computations using the PE method more efficient, especially at longer distances and for frequencies above a few hundred Hz. Work is also directed towards making the PE model applicable to a wider range of atmospheric sound speed profiles, as well as using it together with an aeroacoustic noise source model to predict AM amplitudes (Cotté, 2019). Additionally, research is directed towards developing more accurate prediction models as well as providing appropriate uncertainty analyses for calculated noise levels (Ecotièrre et al., 2019). Research also includes developing procedures for estimating the wind farm noise reduction from outside to inside various dwelling



constructions with and without open windows (K. Hansen, Hansen, & Zajamšek, 2015; Keränen, Hakala, & Hongisto, 2019; Thorsson et al., 2018).

5 NEW APPROACHES FOR COMPLIANCE MEASUREMENTS

Given the practical issues surrounding on/off measurements, the following section will focus on possible improvements to long-term monitoring of wind farm noise.

5.1. Minimizing background noise contamination

The uncertainties associated with background noise contamination can be reduced by selectively plotting data to maximise the chance that wind farm noise is the dominant contributor to the measured noise. Hence, the following criteria can be applied to selectively filter the data:

- Only include data measured between the hours of 11pm and 4am when ambient noise is expected to be at a minimum (Institute of Acoustics, 2014b).
- Only include downwind ($\pm 45^\circ$ relative to the nearest wind turbine) data unless there is a specific requirement to measure in other wind directions (i.e. complaint during crosswind conditions) (Institute of Acoustics, 2014b).
- Only include data corresponding to all wind turbines being operational and nearest turbine power output greater than 70% of its rated power (value calculated based on Vestas V90-3 MW specifications (Vestas, 2006) – may differ for other models) such that ‘worst-case’ noise levels are expected.
- Ensure that the wind speed at the residence where compliance testing is being done was less than 2 m/s to minimise wind-induced noise.
- Set a trigger level equal to the allowable limit and measure for a 2-minute interval following the trigger. Alternatively, measure audio recordings for 2 out of every 10 minutes (Institute of Acoustics, 2014b).

It is then recommended that an acoustic technician or engineer listens to the audio recordings corresponding to exceedances of the allowable limit and that data points containing obvious extraneous noise are excluded (de Beer, 2017). The resulting data set should be reasonably representative of worst-case wind farm noise. At this point, it is up to the relevant regulatory authority to determine an acceptable percentage of time (if any) that the allowable noise limit can be exceeded.

5.2. Removing extraneous noise

The methods described below involve either removing extraneous noise from an affected audio recording or identifying contaminated 10-minute recordings that can be removed from the data set, as follows:

- Use of an Ai-weighting instead of an A-weighting (Brush, Barnes, Newmark, & Yoder, 2017; Schomer, Slauch, & Hessler, 2010), which is the overall A-weighted value calculated using 1/3-octave bands from 10 Hz to 1250 Hz. This excludes insect and bird noise as well as wind rustling leaves in trees, whilst retaining wind farm noise. However, use of an Ai-weighting does not exclude environmental noise in the frequency range of 10 Hz to 1250 Hz and may not to be very reliable.



- Use of a proxy site, or an average of multiple proxy sites (Hessler, 2011), to monitor background noise simultaneously with compliance measurements. The proxy site(s) should be in a similar environment but sufficiently far from any wind farm that wind farm noise is not detectable. However, there is no guarantee that the environmental noise levels will be identical to those at the compliance measurement site.
 - Use of statistical methods to determine wind farm noise contributions. This approach is described in Chapter 6 of C. H. Hansen et al. (2017) and was first suggested by (Ashtiani, 2013, 2015). However, more research is needed to properly validate the suggested procedures, which are quite complex.
 - Use of two microphones to determine the difference in noise level at two locations for each 1/3-octave band and each wind speed segment of interest (Buzduga & Buzduga, 2017). The difference in noise levels between the two microphones is then used to determine whether the dominant noise in each 1/3-octave band and 1 m/s wide wind speed bin is due to the wind farm or to some other source. This method has not yet been validated and may be problematic when the wind turbines closest to a residence are in different directions.
 - Use of iterative machine learning which consists of a learning and validating phase to develop a preliminary model and then a testing phase to isolate ambient noise from wind turbine noise in new data sets (Bigot & Hochard, 2019). This work is in a very preliminary stage and considerably more development is needed before it can be applied.
 - Use of signal analysis to identify transient ambient noise events by their spectral content and rate of change in level, followed by automatic rejection of non-wind-farm noise from the noise sample prior to further analysis. No research in this area has been reported to date.
- Once background noise has been removed from each data point, regression analyses that consider ‘average’ data at each hub height wind speed will not protect the amenity of people living near the wind farm as the allowable limit would be exceeded 50% of the time by wind farm noise. Therefore, as mentioned above, the relevant regulatory authority needs to decide how often (if at all) the allowable noise limit can be exceeded.

5.3. Special acoustic characteristics

Downey and Parnell (2017) proposed a new approach that uses a three-stage assessment of low-frequency noise:

- Simple initial screening so that assessment proceeds only if the C-weighted level minus the A-weighted level (dBC – dBA) exceeds 15 dB.
- Comparison of 1/3-octave band levels between 10 and 160 Hz with allowed 1/3-octave band levels.
- Assignment of a penalty to the measured A-weighted level, depending on the extent by which the measured 1/3-octave band levels exceed the allowed levels.

Cooper, Evans, and Petersen (2015) proposed a new approach for measuring tonal noise at a residence, which is as follows:

- Continuous measurement of outdoor noise at a residence and at a wind turbine in 2-minute intervals over 10 days and 1 day, respectively.
- Identification of wind turbine tones from close-range data.
- Removal of data containing other tones not related to wind farm operation from data measured at the residence.
- Listening to remaining audio files to confirm that the tones are wind farm related. For ambiguous cases, a spectral analysis can be used.



- Determine trends in tonal audibility and occurrence with wind speed and direction, time of day, and combinations of these variables.
- K. L. Hansen, Nguyen, Zajamšek, Catcheside, and Hansen (2019) proposed a new approach for assessing tonal amplitude modulation at a residence that could be extended to other types of amplitude modulation:
- Continuous measurement of outdoor noise at a residence in 10-minute intervals.
 - Constructing a receiver operating curve (ROC) to determine the appropriate parameters to use in the IOA amplitude modulation detection algorithm (Bass et al., 2016).
 - Excluding data where noise in the amplitude-modulated 1/3-octave band is below the normal hearing threshold in ISO389-7 (2005).
 - Adjusting the calculated modulation depth where necessary, with reference to the tonal audibility threshold (IEC 61400-11 Ed.3.0, 2012).

6 CONCLUSIONS

This paper reviewed current methods used to determine whether a proposed or existing wind farm is expected to comply with allowable limits. Several disadvantages of current techniques were highlighted, and possible improvements were suggested. The ISO 9613-2 propagation model, which is commonly used to predict wind farm noise, has some limitations, particularly when used to predict noise levels at receivers located more than 1 km from a wind farm. Therefore, predicted values should always be accompanied by uncertainty limits. Compliance testing can be used to verify predictions, but current methods have substantial drawbacks that limit their effectiveness. These are mainly related to identifying the actual contribution of wind farm noise, which is challenging due to the relatively low noise levels involved and the presence of numerous extraneous noise sources. Compliance testing is also useful for identifying special acoustic characteristics that cannot be modelled using ISO 9613-2. However, the current assessment methods for these characteristics are not well-developed and as a result, they are omitted from many standards and guidelines. Future work in this area should focus on improving accessibility to more accurate propagation models, such as the PE model, to the acoustic community; removing background noise from wind farm noise; and developing more refined assessment procedures for special acoustic characteristics.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors gratefully acknowledge financial support from the Australian Research Council, Projects DP120102185 and DE180100022 and the National Health and Medical Research Council, Project 1113571.

REFERENCES

AS 4959. (2010). Acoustics - measurement, prediction and assessment of noise from wind turbine generators.



Ashtiani, P. (2013). Generating a better picture of noise immissions in post construction monitoring using statistical analysis. In *5th International Meeting on Wind Turbine Noise*. Denver, Colorado.

Ashtiani, P. (2015). Spectral discrete probability density function of measured wind turbine noise in the far field. In *6th International Meeting on Wind Turbine Noise*. Glasgow, UK.

Barlas, E., Wu, K. L., Zhu, W. J., Porté-Agel, F., & Shen, W. Z. (2018). Variability of wind turbine noise over a diurnal cycle. *Renewable energy*, 126, 791-800.

Barlas, E., Zhu, W., Shen, W., Dag, K., & Moriaty, P. (2017). *Investigation of amplitude modulation noise with a fully coupled noise source and propagation model*. Paper presented at the 7th International Conference on Wind Turbine Noise, Rotterdam, Netherlands.

Bass, J., Cand, M., Coles, D., Davis, R., Irvine, G., Leventhall, G., . . . Shelton, J. (2015). *Discussion Document: Methods for Rating Amplitude Modulation in Wind Turbine Noise*. Retrieved from London:

Bass, J., Cand, M., Coles, D., Davis, R., Irvine, G., Leventhall, G., . . . Shelton, J. (2016). *A method for rating amplitude modulation in wind turbine noise*. Retrieved from London, UK:

Bertagnolio, F. (2016). *A noise generation and propagation model for large wind farms*. Paper presented at the 22nd International Congress on Acoustics International Congress on Acoustics.

Bertagnolio, F., Madsen, H. A., & Fischer, A. (2017, 20-23 April). *Coupled wind turbine noise generation and propagation model: A numerical study*. Paper presented at the 7th International Meeting on Wind Turbine Noise, Rotterdam, Netherlands.

Bigot, A., Economou, P., & Economou, C. (2017). *Wind turbine noise prediction using olive tree lab terrain*. Paper presented at the 7th International Conference on Wind Turbine Noise, Rotterdam, Netherlands.

Bigot, A., & Hochard, G. (2019). *Is it possible to predict background noise levels from measured meteorological data with machine learning techniques?* Paper presented at the 8th International Conference on Wind Turbine Noise, Lisbon, Portugal.

Bowdler, D., Cand, M., Hayes, M., & Irvine, D. (2018). Wind turbine noise amplitude modulation penalty considerations. *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 40.

Bray, W., & James, R. (2011). Dynamic measurements of wind turbine acoustic signals, employing sound quality engineering methods considering the time and frequency sensitivities of human perception. In *Proceedings of Noise-Con* (pp. 25-27).

Broner, N. (2011). A simple outdoor criterion for assessment of low frequency noise emission. *Acoustics Australia*, 39(1), 7-14.

Broner, N., & Leventhall, H. (1983). Low frequency noise annoyance assessment by low frequency noise rating (LFNR) curves. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2(1), 20-28.

Brush, E., Barnes, J., Newmark, M., & Yoder, B. (2017, 20-23 April). *The Challenges and Benefits of Long-Term Sound Monitoring of Wind Farm Sites*. Paper presented at the 7th International Meeting on Wind Turbine Noise, Rotterdam, Netherlands.



- Buzduga, V., & Buzduga, A. (2017, 20-23 April). *Characterizing the acoustic noise from wind turbines by using the divergence of the sound pressure in the ambient*. Paper presented at the 7th International Meeting on Wind Turbine Noise, Rotterdam, Netherlands.
- Cooper, J., Evans, T., & Petersen, D. (2015). Method for assessing tonality at residences near wind farms. *International Journal of Aeroacoustics*, 14(5/6), 903-908.
- Cotté, B. (2019). Extended source models for wind turbine noise propagation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 145(3), 1363-1371.
- de Beer, E. H. A. (2017, 20-23 April). *Using long term monitoring for noise assessment of wind farms*. Paper presented at the 7th International Meeting on Wind Turbine Noise, Rotterdam, Netherlands.
- DIN 45680. (2013). Measurement and assessment of low-frequency noise immissions.
- DIN 45681. (2005). Acoustics - Determination Of Tonal Components Of Noise And Determination Of A Tone Adjustment For The Assessment Of Noise Immissions.
- Downey, G., & Parnell, J. (2017). *Assessing low frequency noise from industry—a practical approach*. Paper presented at the 12th IC BEN Congress on Noise as a Public Health Problem.
- Ecotiére, D., Gauvreau, B., Cotté, B., Roger, M., Schmich-Yamane, I., & Nessi, M. C. (2019). *PIBE : a new French project for predicting the impact of wind turbine noise*. Paper presented at the 8th International Conference on Wind Turbine Noise, Lisbon, Portugal.
- EPA, S. A. (2009). *Wind farms environmental noise guidelines*. Retrieved from
- ETSU. (1996). *ETSU-R-97 Assessment & rating of noise from wind farms*. Retrieved from
- Evans, T., & Cooper, J. (2012). COMPARISON OF PREDICTED AND MEASURED WIND FARM NOISE LEVELS AND IMPLICATIONS FOR ASSESSMENTS OF NEW WIND FARMS. *Acoustics Australia*, 40(1).
- Evans, T., & Cooper, J. (2015). Tonal noise from wind turbines. In *6th International Meeting on Wind Turbine Noise*. Glasgow, UK.
- Hansen, C. H., Doolan, C. J., & Hansen, K. L. (2017). *Wind farm noise: measurement, assessment, and control*: John Wiley & Sons.
- Hansen, K., Hansen, C., & Zajamšek, B. (2015). Outdoor to indoor reduction of wind farm noise for rural residences. *Building and Environment*, 94, 764-772.
- Hansen, K. L., Nguyen, P., Zajamšek, B., Catcheside, P., & Hansen, C. H. (2019). Prevalence of wind farm amplitude modulation at long-range residential locations. *Journal of Sound and Vibration*, 455(1), 136-149.
- Hansen, K. L., Zajamšek, B., & Hansen, C. H. (2018). Wind Farm Noise Uncertainty: Prediction, Measurement and Compliance Assessment. *Acoustics Australia*, 46(1), 59-67.
- Hansen, K. L., Zajamšek, B., & Hansen, C. H. (2019). Investigation of a microphone height correction for long-range wind farm noise measurements. *Applied Acoustics*, 155, 97-110.
- Hessler, D. (2011). Accounting for background noise when measuring operational sound levels from wind turbine projects. In *Fourth International Meeting on Wind Turbine Noise*. Rome, Italy.

IEC 61400-11 Ed.3.0. (2012). Wind turbines - Part 11: Acoustic noise measurement techniques.

Institute of Acoustics. (2014a). *A good practice guide to the application of ETSU-R-97 for the assessment and rating of wind turbine noise. Supplementary guidance note 3: sound power level data*. Retrieved from

Institute of Acoustics. (2014b). *A good practice guide to the application of ETSU-R-97 for the assessment and rating of wind turbine noise. Supplementary guidance note 5: post completion measurements*. Retrieved from

ISO389-7. (2005). Acoustics: Reference zero for the calibration of audiometric equipment - Part 7.

ISO1996-2. (2007). Acoustics: Description, measurement and assessment of environmental noise-Part 1: Determination of environmental noise levels.

ISO 9613-2. (1996). Acoustics: Attenuation of sound during propagation outdoors.

Japanese Ministry of Environment. (2004). *Evaluation Guide to Solve Low Frequency Noise Problems*. Retrieved from

Kalapinski, E. J., & Pellerin, T. (2009). Wind Turbine Acoustic Modeling with the ISO 9613-2 Standard: Methodologies to Address Constraints. In *Third International Meeting on Wind Turbine Noise*. Aalborg, Denmark.

Keith, S. E., Daigle, G. A., & Stinson, M. R. (2018). Wind turbine low frequency and infrasound propagation and sound pressure level calculations at dwellings. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 144(2), 981-996.

Keith, S. E., Feder, K., Voicescue, S. A., Soukhofteev, V., Denning, A., Tsang, J., . . . van den Berg, F. (2016). Wind turbine sound pressure level calculations at dwellings. *Journal of the Acoustical Society of America*, 139(3), 1436-1442.

Kelley, N. D. (1987). *A proposed metric for assessing the potential of community annoyance from wind turbine low-frequency noise emissions*. Retrieved from

Kelly, M., Barlas, E., & Sogachev, A. (2018). Statistical prediction of far-field wind-turbine noise, with probabilistic characterization of atmospheric stability. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 10(1), 013302.

Keränen, J., Hakala, J., & Hongisto, V. (2019). The sound insulation of façades at frequencies 5–5000 Hz. *Building and Environment*, 156, 12-20.

Kjellberg, A., Tesarz, M., Holmberg, K., & Landström, U. (1997). Evaluation of frequency-weighted sound level measurements for prediction of low-frequency noise annoyance. *Environment international*, 23(4), 519-527.

Kock, U., Cruz, I. A., & Trautsch, A. (2017). *Comparison of measured and calculated noise levels in far distances of wind turbines*. Paper presented at the 7th International Conference on Wind Turbine Noise, Rotterdam, Netherlands.

Large, S., & Stigwood, M. (2014). The noise characteristics of 'compliant' wind farms that adversely affect its neighbours. In *Internoise 2014*. Melbourne, Australia.

McBride, S., & Burdisso, R. (2017, 20-23 April). *A comprehensive Hamiltonian ray tracing technique for wind turbine noise propagation under arbitrary weather conditions*. Paper presented at the 7th International Meeting on Wind Turbine Noise, Rotterdam, Netherlands.



- Micic, G., Zajamsek, B., Lack, L., Hansen, K., Doolan, C., Hansen, C., . . . Chai-Coetzer, C. L. (2018). A review of the potential impacts of wind farm noise on sleep. *Acoustics Australia*, 46(1), 87-97.
- Moorhouse, A., Waddington, D., & Adams, M. (2011). *Procedure for the assessment of low frequency noise complaints*. Retrieved from
- Nelson, P. M. (1973). The combination of noise from separate time varying sources. *Applied Acoustics*, 6, 1-21.
- NSW EPA. (2016). *Wind energy: noise assessment bulletin*. Retrieved from Sydney:
- NZS 6808. (2010). Acoustics - wind farm noise.
- Öhlund, O., & Larsson, C. (2015). Meteorological effects on wind turbine sound propagation. *Applied Acoustics*, 89, 34-41.
- Ostashev, V. E., & Wilson, D. K. (2016). *Acoustics in moving inhomogeneous media, Second Edition*: CRC Press.
- Persson-Waye, K., Clow, A., Edwards, S., Hucklebridge, F., & Rylander, R. (2003). Effects of nighttime low frequency noise on the cortisol response to awakening and subjective sleep quality. *Life sciences*, 72(8), 863-875.
- Salt, A. N., & Hullar, T. E. (2010). Responses of the ear to low frequency sounds, infrasound and wind turbines. *Hearing research*, 268(1), 12-21.
- Schaffer, B., Schlittmeier, S. J., Pieren, R., Heutschi, K., Brink, M., Graf, R., & Hellbrück, J. u. (2016). Short-term annoyance reactions to stationary and time-varying wind turbine and road traffic noise: A laboratory study. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 139(5), 2949-2963.
- Schillemans, L., van Caillie, M., Courret, S., & Le Bourdat, C. (2017). *Assessment of the error between measured and predicted noise levels from wind farms*. Paper presented at the 7th International Conference on Wind Turbine Noise, Rotterdam, Netherlands.
- Schomer, P., Slauch, I., & Hessler, G. (2010). *Proposed 'Ai'-weighting; a weighting to remove insect noise from A-weighted field measurements*.
- Sessarego, M., Shen, W. Z., & Barlas, E. (2019). *Wind turbine noise propagation in flat terrain for wind farm layout optimization frameworks*. Paper presented at the 8th International Conference on Wind Turbine Noise, Lisbon, Portugal.
- Søndergaard, B., & Plovsing, B. (2009). *Validation of the Nord2000 propagation model for use on wind turbine noise*. Retrieved from
- Thorsson, P., Persson Waye, K., Smith, M., Ögren, M., Pedersen, E., & Forssén, J. (2018). Low-frequency outdoor–indoor noise level difference for wind turbine assessment. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 143(3), EL206-EL211.
- Vestas. (2006). *General Specification V90 – 3.0 MW VCRS*. Retrieved from
- West, M., Sack, R., & Walkden, F. (1991). The Fast Field Program (FFP). A second tutorial: Application to long range sound propagation in the atmosphere. *Applied Acoustics*, 33(3), 199-228.

JE VETRNA ENERGIJA PRAVA IZBIRA ZA SLOVENIJO ?

Diego Loredan

Civilna iniciativa za zaščito Senožških Brd, koordinator

POVZETEK

Izkoriščanje obnovljivih virov energije ima v nacionalni energetske politiki Republike Slovenije (RS) pomembno mesto, saj podnebne spremembe predstavljajo globalni problem, ki naj bi se ga lotile reševati prav vse države. V zadnjih letih se v naši državi interesi na tem področju povečujejo. Temeljni namen energetske politike RS je zagotoviti trajnostno ravnanje z energijo, zato ta okvir opredeljuje tri vidike trajnosti: **podnebno sprejemljivost, zanesljivost oskrbe ter konkurenčnost**. V članku podprem, da bodo morali biti spoštovani vsi trije vidiki, da bodo odločitve države na področju energetike štejele kot trajnostne in torej sprejemljive. To predstavim na področju problematike umeščanja vetrnih elektrarn v naš občutljivi prostor.

Na prvi pogled se zdi, da so najboljša rešitev za rastoče podnebne in energetske krize prav vetrne elektrarne. Trdim in v pričujočem članku argumentiram, da vetrna energija ni tako popolna, kakor bi pričakovali. Problematiziram mainstreamovski (ponekod že ideološki) pogled na reševanje podnebnih sprememb s pomočjo vetrnih elektrarn in predstavim, čemu VE niso prava rešitev za naslavljanje tega globalnega problema. Podrobnejši pregled pokaže, da sta za rabo potenciala vetra, poleg omejitev **vplivov na okolje in naravo**, omejitvi tudi **dostopnost lokacij za postavitve vetrnih elektrarn in dostopnost elektro-energetskega omrežja**.

Ključne besede: podnebne spremembe, vetrne elektrarne, zanesljivost oskrbe, vpliv na okolje in naravo, energija, hrup

1 UVOD

Proizvodnja električne energije je danes ključnega pomena za človeštvo. Dandanes je okolje vedno bolj onesnaženo, glavni krivec pa je človeški faktor, ki proizvaja razne naravi neprijazne produkte za zadovoljitev njegovih potreb. Vendar pa se vplivi na okolje že kažejo kot odgovor narave – spremembe podnebnih razmer, onesnaženosti zraka, toplogredni plini itd..

Izkoriščanje obnovljivih virov energije ima v nacionalni energetske politiki Slovenije pomembno mesto. V zadnjih letih se ambicije na tem področju tudi še povečujejo. Temeljni namen energetske politike je zagotoviti trajnostno ravnanje z energijo, zato bo ta okvir opredeljeval tri vidike trajnosti – **podnebno sprejemljivost, zanesljivost oskrbe ter konkurenčnost**. Vsi trije vidiki bodo morali biti spoštovani, da bo odločitev štela kot trajnostna in torej sprejemljiva.



Slika 1: Podnebna sprejemljivost – zanesljivost oskrbe – konkurenčnost = trajnost (vir: Energetika portal, 2020. <https://www.energetika-portal.si/dokumenti/strateski-razvojni-dokumenti/energetski-koncept-slovenije/>, 17. 2. 2020)

2 AKCIJSKI NAČRT 2010-2020

Na podlagi Direktive 2009/28 Evropskega parlamenta in Sveta mora Slovenija do leta 2020 doseči 25 % delež obnovljivih virov energije v bruto rabi končne energije. V ta namen je vlada že sprejela **Akcijski načrt** za obdobje 2010-2020, s katerim je določila cilje, kako doseči ta delež. Ministrstvo za infrastrukturo navaja, da smo se **zavezali** EU, kar je napačno in zavajajoče. Slovenija je dolžna na dve leti poročati o napredku uresničevanja te Direktive, na podlagi česar je ob neizpolnjevanju zadanih ciljev dolžna spremeniti Akcijski načrt. Torej Slovenija **lahko spremeni svoje cilje** uresničevanja te Direktive.

Prav tako se naša država **ni zavezala Evropski uniji** za izgradnjo vetrnih elektrarn, temveč za doseg 25% deleža obnovljivih virov energije v bruto rabi končne energije do leta 2020 – in se **sama odloči**, na kakšen način bo to naredila in katere obnovljive vire bo uporabila (!). Po podatkih **Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO)** je siceršnji delež obnovljivih virov energije v bruto rabi končne energije leta 2014 znašal 21,9 % - torej nam manjka za doseg cilja do leta 2020 le še 3,1 % (ARSO, 2020).



3 VETRNA ENERGIJA – PROBLEM ALI REŠITEV?

Mnoga znanja, ki izhajajo iz dolgoletnih raziskav, potrjujejo, da je pri proizvodnji električne energije potrebno premakniti človeško zavedanje v smeri čisto novih dognanj o tem, kako in iz česa pridobivati električno energijo. Žal še vedno naletimo na okostenela prepričanja o tem, kako bomo z vetrnimi elektrarnami (VE) rešili Zemljo. Na prvi pogled se zdi, da so najboljša rešitev za naše rastoče podnebne in energetske krize prav vetrne elektrarne. In vendar, vetrna energija ni tako popolna, kakor bi pričakovali. Podrobnejši pregled pokaže, da sta za rabo potenciala vetra poleg omejitve **vplivov na okolje in naravo**, omejitvi tudi **dostopnost lokacij za postavitev vetrnih elektrarn in dostopnost elektro-energetskega omrežja**.

Tudi brez okoljskih in naravovarstvenih omejitev se ne splača **graditi vetrnih elektrarn predaleč stran od (gozdnih) cest in možnosti priključitve na že obstoječe električno omrežje**. Če pa k temu prištejemo še omejitve zaradi varovanja narave in okolja, kakršnekoli gradnje VE na področjih, ki so pod naravovarstvenim režimom Natura 2000, pa je potencial za gradnjo večjega števila velikih vetrnih polj v Sloveniji precej omejen. Za primer: 100 velikih vetrnih elektrarn bi lahko zagotovilo med 3% in 5% električne energije, ki jo v Sloveniji porabimo danes. Razvoj novih tehnologij in spremembe vetrovnosti lahko sicer ob nizki stopnji rasti porabe električne energije poveča njen delež, vendar ne moremo pričakovati, da bi v Slovenij lahko velik delež električne energije pridobili z izkoriščanjem energije vetra.

Vetrna energija obljublja čist in brezplačen vir elektrike, ki naj bi zmanjšali našo odvisnost od uvoženih fosilnih goriv in proizvodnjo toplogrednih plinov ter drugih virov onesnaževanja. **Ali je to res?**

Velike VE, ki se v zadnjem času pojavljajo pri nas, predstavljajo nov vir hrupa. Tovrstni zelo visoki objekti, ki že vizualno kvarijo izgled krajine in ogrožajo nekatere živalske vrste, zaradi svojih višin predstavljajo praktično nezaslonjene vire hrupa, ki se lahko nemoteno razširja na velike oddaljenosti. Obratovanje velikih VE ima za posledico seveda poganjanje in vrtnčenje velikih zračnih mas, kar kot že povedano ustvarja nizkofrekvenčni (NF) in infrazvok (IZV) (Knopper et al., 2014; The Danish Environmental Protection Agency, 2020; Syte.fi, 2019), ki pa za razliko od naravnih virov ne prenaša nobenih koristnih, temveč izključno škodljive informacije; običajno pa trajajo tudi daljši čas in se pogosto ponavljajo. Zaradi tega bi morala biti načrtovanju velikih VE in njihovemu umeščanju v prostor posvečena velika pozornost, kar pa se pri nas žal še ne dogaja.

V novi Uredbi o mejnih vrednostih kazalcev hrupa v okolju (Ur. l. RS, št. 43/18 in 59/19) so na zelo pomanjkljiv način kot vir hrupa omenjene tudi vetrne elektrarne. Vetrne elektrarne namreč predstavljajo specifičen in najbolj moteč vir hrupa za okolje. Okolje se namreč ne odziva enako na vse vire hrupa. Pri enaki jakosti oziroma sproščeni energiji je za okolje najmanj moteč železniški hrup, sledita mu industrijski (v kolikor ni izrazito impulznega ali tonskega značaja) in hrup cestnega prometa. Med najbolj moteče vire sodi letalski hrup, medtem ko je hrup vetrnih elektrarn na samem vrhu. Znanstvene raziskave kažejo, da kar 85 % izpostavljenih prebivalcev jasno zaznava hrup vetrne elektrarne že pri ravneh 35 dBA. Številnim povzročiteljem hrupa po novi Uredbi ne bo več potrebno zagotavljati niti monitoringa hrupa, kaj šele protihrupnih ukrepov za zavarovanje zdravja okoliškega prebivalstva. Tako smo priča postavitvi in načrtovanju večjega števila velikih VE, ne da bi odgovorni predhodno poskrbeli za primerne študije in seznanili prebivalce z morebitnimi nevarnostmi in negativnimi vplivi, katerim so oziroma bodo zaradi njih izpostavljeni.

Na svetu se preko 2000 civilnodružbenih gibanj (npr: www.epaw.org ipd.) bori proti postavitvi le-teh, prav tako zagovarjajo trdna in dokazljiva načela o tem, da **VE NISO sprejemljive** z vidika reševanja podnebnih sprememb. V državah kot so Irska, Nizozemska in Nemčija danes z dokazi trdijo, da so VE izgubljen in propadel posel.



Slika 2: Je to naša prihodnost?

(vir: <https://www.flickr.com/photos/amanderson/17525497549/in/photostream/>, 17. 2. 2020)

Opazujemo lahko navdušenje nad vetrom, vendar je potrebno odgovoriti na vprašanja kdaj, kje, koliko in čemu? Kakšna so dejstva? Naj navedem nekaj dejstev, ki govorijo o neprimernosti izkoriščanja vetrne energije:

- **Hitrost vetra se spreminja ves čas** - na ta način je stopnja izkoriščenosti zelo nizka (Wan et al., 2015; MNRE.GOV.IN, 2020).
- **VE ne proizvajajo velikega deleža energije** - vedno potrebujejo drage državne subvencije, kar ima za posledico visoke cene električne energije za potrošnike (Shellenberger, 2018).
- **Cena elektrike je višja, kakovost elektrike, ki jo proizvajajo pa nižja** - mi pa smo tisti, ki bomo plačevali višjo ceno elektrike – pri tem pa ne bomo ohranjali okolja, ampak ga degradirali (The Conversation (UK) 2020; Shellenberger, 2018). Vidite v tem smisel?
- **Nobena vetrna elektrarna ni sposobna sama zagotoviti potrebe po električni energiji** - vedno jo je potrebno dopolniti z drugimi viri proizvodnje električne energije (Graham Richard, 2020).
- **VE negativno vplivajo tudi na vrednost nepremičnin, glede na bližino posameznega objekta do vetrnih elektrarn** – v petih različnih študijah se strinjajo, da je ta padec med 11% in 40% za stanovanja, ki se nahajajo do 2 km od vetrnih elektrarn (Sunak and Madlener, 2015).

Glavni argument za vetrnice naj bi bilo **zmanjševanje CO₂**. Na osnovi raziskav o podnebnih spremembah (Rostami, 2019a, 2019b; NASA, 2019; White, 2004; Energy Central, 2011) se je ugotovilo naslednja zanimiva dejstva.

Prvič: zvišanje koncentracije CO₂ v preteklosti je sledilo globalnemu segrevanju, ne pa obratno (Rostami, 2019a, 2019b; NASA, 2019).

Drugič: največja količina toplogrednih plinov ni plin CO₂, ampak vodna para s faktorjem najmanj 30. Gre za povsem naraven proces milijonov let obstoja zemlje (New Scientist, 2007).



Trenutna raven CO₂ v ozračju je 400 ppm, za razliko od 280 ppm pred industrijsko revolucijo.

Vprašanje: Zakaj ta lov na čarovnice proti emisijam CO₂? Mogoče zaradi prodaje dovoljenj oz. zelenih kuponov ogljika?

Odgovor: gre za velike poslovne interese proizvajalcev vetrnih elektrarn in lastnikov zemljišč, ki prejemajo subvencije za njihovo postavljanje.

Nemčija je, kot vodilna država pri umeščanju VE, zgrešila večino svojih ciljev na področju energetske politike, vključno s cilji varovanja podnebja. To kažejo rezultati študije, ki jo je opravil [Inštitut za nemško gospodarstvo \(IW\)](#). V letih 2015 in 2016 so število vetrnih elektrarn povečali za neverjetnih 10 odstotkov ter za 2,5 odstotka sončnih elektrarn, vendar so ustvarili manj kot en odstotek več električne energije iz vetra in en odstotek manj električne energije iz sončne.

Neuspeh ...! Sto milijard evrov v nič v obliki znižanja CO₂ stagnira skoraj 10 let! Ne samo, da sonce in veter nista nadoknadila drastičnega zmanjšanja jedrskih elektrarn v letu 2016, ampak **se je proizvodnja električne energije iz sonca in vetra drastično zmanjšala**. To pomeni, da Nemčija nima nobenega napredka glede znižanja izpustov CO₂ v zadnjem desetletju. Leta 2016 so se emisije CO₂ v Nemčiji povečale na 912 milijonov ton in so na prebivalca med najvišjimi na svetu.

4 PRIKRITA DEJSTVA

4.1. Zakonodaja

Aktualna zakonska ureditev postavitve VE je zelo toga in pomanjkljiva, predvsem z vidika vpliva na okolje, ki ni niti omenjen. Po večletnih izkušnjah se je predvsem v tujini pokazalo, da imajo VE zelo velik vpliv na okolje – na naravo, živali in na zdravje ljudi. Zaradi teh ogromnih negativnih vplivov na okolje, so se povsod po Evropi, kjer so postavljene VE, ustanovile skupine in organizacije, ki opozarjajo na ta problem in zahtevajo podrobnejšo zakonsko ureditev.

Nekatere Evropske države so temu sledile in so zakonodajo že podrobneje uredile, druge so še v fazi sprejemanja, tretje, oz. pristojni organi le-teh, pa se te pravne luknje ne zavedajo, oz. se je ne želijo in ne delajo potrebnih korakov k ureditvi tega področja. Med njimi je tudi Slovenija.

4.2. Učinkovitost vetrnih elektrarn

Vetrne elektrarne še vedno ne morejo zagotavljati električne energije po predvidljivih časih. Proizvodnja vetrnih elektrarn je zelo spremenljiva v daljšem časovnem obdobju, vendar čas, ko vetrna elektrarna proizvede največ električne energije ne sovпада s časom, ko je moč najbolj potrebna. Razpoložljivost elektrarn nam pove, kako zanesljivo lahko računamo na energijo elektrarne. Majhna razpoložljivost pomeni, da mora imeti energetski sistem 100% rezervo v drugih oblikah energije. Vedeti moramo, da vetrna elektrarna doseže svojo nazivno moč komaj pri hitrosti vetra 16 m/s – 58 km/h, pri hitrosti vetra 4 m/s – 14 km/h se priklopi na omrežje, pri hitrosti vetra 25 m/s – 90 km/h pa se izključi (podatki so odvisni od tipa vetrnice). Razpoložljivost je odstotek časa, ko elektrarna daje energijo v omrežje.

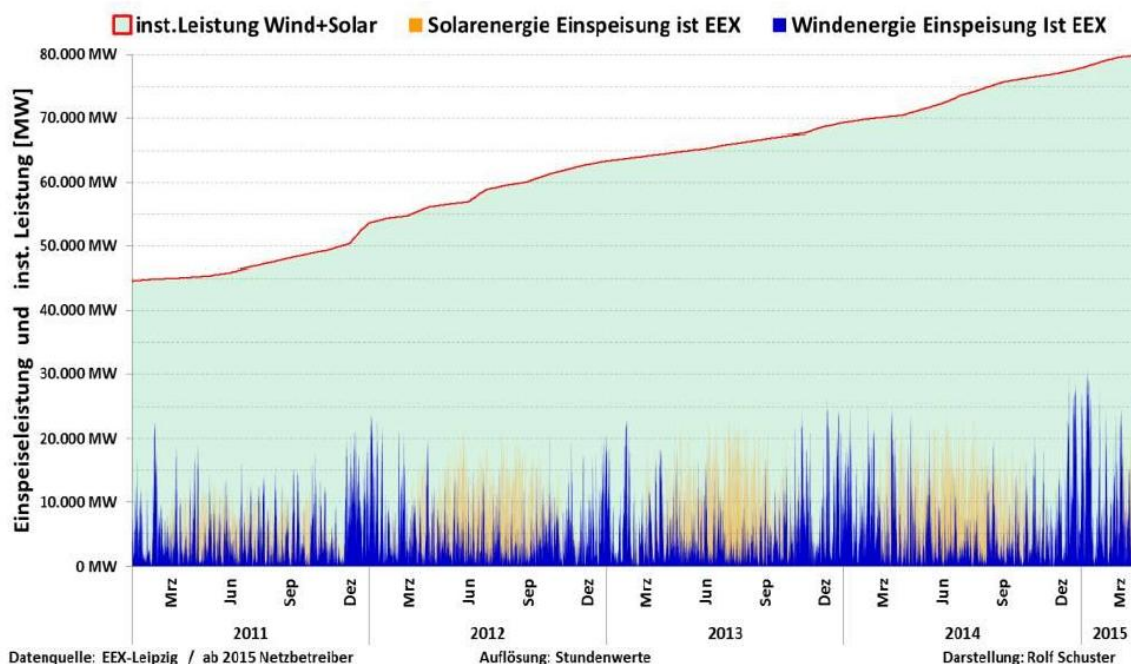
Razpoložljivost vetrnih elektrarn je približno 15 do 20% (International Renewable Energy Agency, 2012; ENERCON GmbH, 2016; MNRE.GOV.IN, 2020).

Za primerjavo: pri jedrski elektrarni je razpoložljivost približno 92% (Office of Nuclear Energy, 2018). Zaradi vetrnih elektrarn skupna potrebna zmogljivost ostalih energetskih objektov ne bo nič manjša. Razen klasične hidroenergije teh energetskih virov ne poganjajo toliko sonce, veter in organski odpadki, temveč v **največji meri subvencije – ali denar.**

Analiza skoraj 3000 kopenskih vetrnih elektrarn - največja tovrstna študija do sedaj je pokazala, da se nameščene VE obrabijo hitreje, kot je navedeno s strani proizvajalcev. **Prava doba delovanja je 12 do 15 let!** Vlade in proizvajalci VE izračune delajo na predpostavki, da imajo VE življenjsko dobo od 20 do 25 let (Cohen, 2012).

Avtor poročila, prof. Gordon Hughes (Renewable Energy Foundation, 2012), ekonomist na Univerzi v Edinburghu in nekdanji energetski svetovalec Svetovne banke, je odkril, da se "obremenitveni faktor" - ocena izkoristka VE, ki temelji na deležu proizvedene električne energije, dejansko zmanjša z 24 odstotkov v prvih 12 mesecih delovanja na samo 11 odstotkov, po 15 letih.

Dr. John Constable, direktor REF (fundacija za obnovljivo energijo), je dejal: "Ta raziskava potrjuje sum, da kljub desetletnim velikodušnim subvencijam vetrni industriji ni uspelo spodbuditi inovacije, ki so potrebne, da bi bil ta sektor konkurenčen« (Mendick, 2012).



Slika 3: Proizvodnja obnovljivih virov v Nemčiji

(vir: <https://stopthesethings.com/2017/05/12/germanys-wind-power-debacle-worsens-too-much-power-one-day-none-the-next/>, 17. 2. 2020)

4.3. Ekonomičnost vetrnih elektrarn

V Nemčiji trenutno stane zelena energija 56 milijonov € vsak dan, oziroma 20 milijard € na leto. Za tako količino električne energije bi na trgu plačali okoli 2 milijardi €.



Zapravijo 18 milijard €, torej sprašujem: koliko moči so dobili za milijarde €, ki so jih »zmetali« - in še naprej »mečejo« v veter in sonce ? **Odgovor – za nepomembnih 3,3%: NI VELIKO.**

Končna maloprodajna cena elektrike za povprečno slovensko gospodinjstvo je v zadnjem lanskem četrtletju znašala 158,86 EUR/MWh in je bila tako za 0,3 odstotka višja kot v enakem obdobju leta 2014.

Če gledamo samo strukturo končne cene, pa je bila razporeditev naslednja: za dobavo energije je konec leta povprečno gospodinjstvo brez DDV dalo 56,41 EUR/MWh (3 odstotka manj kot leto prej), strošek uporabe omrežja pa je znašal 53,67 EUR/MWh (2 odstotka manj). Dajatve so v skupnem seštevku znašale 17,08 EUR/MWh in so se zaradi višjega prispevka za energetske učinkovitost od 1. januarja 2015 in višjega prispevka za zagotavljanje podpor proizvodnji električne energije iz obnovljivih virov energije ter v soproizvodnji z visokim izkoristkom, ki je začel veljati 1. avgusta, v opazovanem obdobju enega leta zvišale skupaj kar za 20 odstotkov (Janjič B, 2016).

- **22 EUR/MWh**- toliko znaša cena megavatne ure elektrike na nemški borzi
- **150 EUR/MWh** v povprečju plača država za vsako megavatno uro elektrike, ki pride iz zelenih elektrarn.

Glede same donosnosti naložbe vetrnih elektrarn v energetiko pa moram spomniti, da to naložbo plačujemo davkoplačevalci z višjo ceno električne energije. Tukaj gre za odliv ogromnih dobičkov v zasebne roke nekaj posameznikov, medtem ko primanjkuje denarja za razvoj v gospodarstvu in odpiranje novih delovnih mest!

5 DOKAZI S SVETA

Ob koncu leta 2015 se je po vsem svetu vrtelo **314.000** vetrnih elektrarn, ki so proizvedle le **3.7%** svetovne električne energije (Global Wind Energy Council, 2020).

Anglija ni dovolj vetrovna, da bi opravičila vlaganje v gradnjo novih kopenskih vetrnih elektrarn. »Ekonomika projekta ne bi delovala«, pravi Hugh McNeal, izvršni direktor vetrne industrije (Gosden, 2016). V Sloveniji pa nas prepričujejo, kakšne vetrne kapacitete imamo. Če pogledamo evropske podatke ugotovimo, da smo po prevetrenosti na predzadnjem mestu.

Danska vlada je opustila načrte za izgradnjo petih vetrnih polj na morju, ker bi s tem proizvedena električna energija postala predraga za danske potrošnike.

Ugotovili so, da Danci ne morejo prenesti stalnega povečanja cen električne energije. Cena električne energije je na skandinavskem trgu padla iz 31 EUR na 1 MWh (2012) na 21 evrov za 1 MWh (2015).

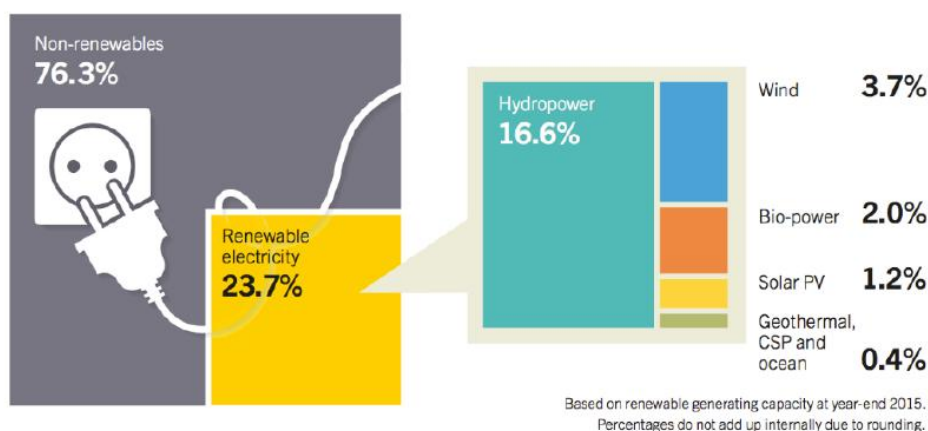
Razliko v ceni so pokrili s povečanjem subvencij in strošek prenesli na končne porabnike.

Ocena vlade je, da bi v prihodnjih letih Danci porabili za nakup energije iz novih vetrnih elektrarn do 10,6 milijarde dolarjev - cena za potrošnike bi bila previsoka, saj se že sedaj soočajo z najvišjimi cenami električne energije v Evropi. "Ne moremo sprejeti tega, ker že sedaj zasebni sektor in gospodinjstva plačujejo preveč. Danska politika obnovljivih virov se je izkazala za predrago," je dejal okoljski minister Lilleholt (Bastach, 2016).

Nemčija: Po izračunih nemškega gospodarskega inštituta (IW) se bo strošek energetskega prehoda letos spet precej povečal, in sicer na okoli 31 milijard. Očitno bo potrebno umestiti še nekaj tisoč vetrnic več, da bodo razumeli kaj delajo narobe (Epoch Times Europe GmbH, 2020).

Irska: zavrnjeno gradbeno dovoljenje za 240 milijonov € vreden projekt vetrnih elektrarn (Edwards, 2016).

Avstrija: stroški zelene električne energije v Avstriji so se v letu 2016 povečali za skoraj 17%. Leta 2012 so gospodinjstva plačala 40 € kot dajatev za zeleno električno energijo, leta 2013 že 65 €, leta 2014 pa več kot 80 €, letos malo več kot 100 €. Povprečno gospodinjstvo, ki je porabilo približno 3.500 KWh na leto, je v letu 2016 plačalo 103 €. V letošnjem letu pa bo plačalo 120 €. Razlog za take cene dajatev je v subvencijah za zeleno električno energijo.



Slika 4: Stanje obnovljivih virov v svetovnem merilu (vir: www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/, 17. 2. 2020)

6 ZAKLJUČEK

V prispevku je podan pogled na problematiko uvajanja obnovljivih virov električne energije (v konkretnem primeru vetrnih elektrarn) iz druge perspektive.

Glede na uvodna razmišljanja in prikazane probleme bi si bilo mogoče ustvariti vtis, da je pot, ki so si jo začrtali v Evropi in za katero upamo, da ji ne bodo sledili tudi drugod po svetu, napačna. Seveda namen članka v nobenem primeru ni bil takšen. Osnovni namen je pojasniti drugo plat zgodbe, ki se ji zlasti »druga stran« prevečkrat izogiba. V javnosti to zbuja lažna pričakovanja, kar pa je odlično gojišče za različna špekulativna razmišljanja, uveljavljanje parcialnih interesov na lokalni ravni, politično promocijo ali preprosto za opozarjanje posameznikov, ki čutijo potrebo po pozornosti. Neredko gre za grobo zavajanje javnosti. Verjamem, da pometanje problemov pod preprogo na dolgi rok ne more obroditi sadov, zato je potrebno problematiko oskrbe z energijo vedno obravnavati celovito, saj je le na ta način moč zagotoviti, da bodo odločitve blizu optimalnim glede na potrebe ljudi, ekonomiko in ohranjanje naravne in kulturne dediščine.

REFERENCE

- ARSO. 2020. Kazalci okolja v Sloveniji. Dostopno na: http://kazalci.arso.gov.si/?data=indicator&ind_id=721 (17. 2. 2020)
- Akcijski načrt za obnovljive vire energije za obdobje 2010-2020. Dostopno na: <https://www.energetika-portal.si/dokumenti/strateski-razvojni-dokumenti/akcijski-nacrt-za-obnovljivo-energijo/> (17. 2. 2020)
- Bastach, M. 2016. Windswept Denmark says wind energy has become too expensive. Dostopno na: <http://dailycaller.com/2016/05/13/windswept-denmark-says-wind-energy-has-become-too-expensive/> (17. 2. 2020)
- Cohen, T. 2012. Wind turbines 'only lasting for half as long as previously thought' as study shows they show signs of wearing out after just 12 years. Dostopno na: <https://www.dailymail.co.uk/news/article-2254901/Wind-turbines-half-long-previously-thought-study-shows-signs-wearing-just-12-years.html> (10. 3. 2020)
- Direktiva 2009/28/ES Evropskega Parlamenta in Sveta z dne 23. aprila 2009 o spodbujanju uporabe energije iz obnovljivih virov, spremembi in poznejši razveljavitvi direktiv 2001/77/ES in 2003/30/ES
- Edwards, E. 2016. Planning permission for €240m wind farm in CO Meath rejected. Dostopno na: <http://www.irishtimes.com/news/environment/planning-permission-for-240m-wind-farm-in-co-meath-rejected-1.2523783#.VrSFO1C5FJQ.twitter> (17. 2. 2020)
- Energy Central. 2011. Wind Energy Does Little to Reduce CO2 Emissions. Dostopno na: <https://www.energycentral.com/c/ec/wind-energy-does-little-reduce-co2-emissions> (10. 3. 2020)
- ENERCON GmbH. 2016. ENERCON Technology. Dostopno na: <https://www.enercon.de/en/products/ep-8/e-126/> (10. 3. 2020)
- Energetika portal. 2020. Energetski koncept Slovenije. Dostopno na: <https://www.energetika-portal.si/dokumenti/strateski-razvojni-dokumenti/energetski-koncept-slovenije/> (17. 2. 2020)
- Epoch Times Europe GmbH. 2020. Energiewende kostet 2016 laut IW rund 31 Milliarden Euro Dostopno na: <https://www.epochtimes.de/politik/welt/energiewende-kostet-2016-laut-iw-rund-31-milliarden-euro-a1325870.html> (6. 2. 2020)
- Global Wind Energy Council. 2020. Wind in numbers. Dostopno na: <https://gwec.net/global-figures/wind-in-numbers/>
- Graham Richard M, 2020. Why Can't We Generate All Our Energy From Wind Power? Dostopno na: <https://science.howstuffworks.com/environmental/energy/why-cant-we-generate-all-our-energy-from-wind-power.htm> (10. 3. 2020)
- Gosden, E. 2016. England not windy enough, admits wind industry chief. Dostopno na: <http://www.telegraph.co.uk/business/2016/06/04/england-not-windy-enough-admits-wind-industry-chief/> (17. 2. 2020).

International Renewable Energy Agency. 2012. Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series. June 2012. Wind Power. Issue 5/5. International Renewable Energy Agency IRENA. Volume 1: Power Sector. Dostopno na:

https://www.irena.org/documentdownloads/publications/re_technologies_cost_analysis-wind_power.pdf.

Janjič, B. 2016. Delež dajatev v končni ceni elektrike se povečuje. Naš stik. Dostopno na:

<http://www.nas-stik.si/1/Novice/novice/tabid/87/ID/3798/Delez-dajatev-v-koncni-ceni-elektrike-se-povecuje.aspx> (17. 2. 2020).

Knopper, L.D., Ollson, C. A., McCallum, L.C., Whitfield Aslund, M.L., Berger, R.G., Souweine, K., McDaniel, M. 2014. Wind Turbines and Human Health. *Front Public Health*, 2: 63. doi: [10.3389/fpubh.2014.00063](https://doi.org/10.3389/fpubh.2014.00063). Dostopno na:

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4063257/> (10. 3. 2020).

MNRE.GOV.IN 2020. Wind Power Programme. Dostopno na:

https://mnre.gov.in/sites/default/files/uploads/faq_wind.pdf (10. 3. 2020).

Mendick, R. 2012. Wind farm turbines wear sooner than expected, says study. Dostopno na:

<https://www.telegraph.co.uk/news/earth/energy/windpower/9770837/Wind-farm-turbines-wear-sooner-than-expected-says-study.html> (17. 2. 2020).

NASA. 2019. Effects of Changing the Carbon Cycle. Dostopno na:

<https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle/page5.php> (10. 3. 2020).

New Scientist. 2007. Climate myths: Carbon dioxide isn't the most important greenhouse gas. Dostopno na:

<https://www.newscientist.com/article/dn11652-climate-myths-carbon-dioxide-isnt-the-most-important-greenhouse-gas/#ixzz6GHpKZzFA> (10. 3. 2020).

Office of Nuclear Energy, 2018. Nuclear Power is the Most Reliable Energy Source and It's Not Even Close. Dostopno na: <https://www.energy.gov/ne/articles/nuclear-power-most-reliable-energy-source-and-its-not-even-close> (10. 3. 2020).

REN21 Renewables now. 2020. Renewables Status Report. Dostopno na:

<https://www.ren21.net/reports/global-status-report/> (17. 2. 2020).

Renewable Energy Foundation. 2012. Analysis of Wind Farm Performance in UK and Denmark The Performance of Wind Farms in the United Kingdom and Denmark. Dostopno na:

<https://www.windaction.org/posts/49259-the-performance-of-wind-farms-in-the-united-kingdom-and-denmark#.XmNX46j0mUI> (10. 3. 2020).

Rostami, M. 2019a. Global Warming (Part 2): A growing threat or nothing to worry about? An effect of greenhouse gases or a natural climate change? Dostopno na:

https://www.researchgate.net/post/Global_Warming_Part_2_A_growing_threat_or_nothing_to_worry_about_An_effect_of_greenhouse_gases_or_a_natural_climate_change (10. 3. 2020).

Rostami, M. 2019b. Global Warming (Part 1): Causes and consequences of global warming, a natural phenomenon, a political issue, or a scientific debate? Dostopno na:



https://www.researchgate.net/post/Global_Warming_Part_1_Causes_and_consequences_of_global_warming_a_natural_phenomenon_a_political_issue_or_a_scientific_debate (10. 3. 2020)

Sunak, Y., Madlener, R. 2015. The impact of wind farm visibility on property values: A spatial difference-in-differences analysis. *Energy Economics* 55: 79-91. DOI: 10.1016/j.eneco.2015.12.025. Dostopno na: https://www.researchgate.net/publication/292950535_The_impact_of_wind_farm_visibility_on_property_values_A_spatial_difference-in-differences_analysis (10. 3. 2020).

Shellenberger, M. 2018. If Solar And Wind Are So Cheap, Why Are They Making Electricity So Expensive? Dostopno na: <https://www.forbes.com/sites/michaelshellenberger/2018/04/23/if-solar-and-wind-are-so-cheap-why-are-they-making-electricity-more-expensive/#70ee6481dc66> (10. 3. 2020).

Stop These Things. 2020. Germany's Wind Power Debacle Worsens: Too Much Power One Day, None the Next. Dostopno na: <https://stopthesethings.com/2017/05/12/germanys-wind-power-debacle-worsens-too-much-power-one-day-none-the-next/> (17. 2. 2020).

Syte.fi. 2019. Pilottitutkimus osoittaa infraäänihaitan vähenevän merkittävästi vasta yli 15 kilometrin päässä tuulivoimaloista. Dostopno na: <https://syte.fi/2019/01/10/pilottitutkimus-osoittaa-infraaanihaitan-vahenevan-merkittavasti-vasta-yli-15-kilometrin-paassa-tuulivoimaloista/> (10. 3. 2020).

The Danish Environmental Protection Agency. 2020. Low frequency noise from wind turbines. Dostopno na: <https://eng.mst.dk/air-noise-waste/noise/wind-turbines/low-frequency-noise-from-wind-turbines/qa-low-frequency-noise-from-wind-turbines/> (10. 3. 2020).

The Conversation (UK). 2020. Wind costs more than you think due to massive federal subsidies. Dostopno na: <https://theconversation.com/wind-costs-more-than-you-think-due-to-massive-federal-subsidies-38804> (10. 3. 2020).

Ur. l. RS, št. 43/18 in 59/19. 2019. Uredba o mejnih vrednostih kazalcev hrupa v okolju (Uradni list RS, št. 43/18 z dne 22. 6. 2018), Uredba o spremembah Uredbe o mejnih vrednostih kazalcev hrupa v okolju (Uradni list RS, št. 59/19 z dne 4. 10. 2019) Dostopno na: <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=URED7531> (17. 2. 2020).

Ur. l. RS, št. 43/18 in 59/19. Uredba o mejnih vrednostih kazalcev hrupa v okolju.

Wan, S. Cheng, L., Sheng, X. 2015. Effects of Yaw Error on Wind Turbine Running Characteristics Based on the Equivalent Wind Speed Model. *Energies* 8(7):6286-6301. DOI: [10.3390/en8076286](https://doi.org/10.3390/en8076286). Dostopno na: https://www.researchgate.net/publication/282925488_Effects_of_Yaw_Error_on_Wind_Turbine_Running_Characteristics_Based_on_the_Equivalent_Wind_Speed_Model (10. 3. 2020).

White, D. 2004. Reduction in carbon dioxide emissions: estimating the potential contribution from wind-power. A report. Renewable Energy Foundation. Dostopno na: <https://www.ref.org.uk/Files/david.white.wind.co2.saving.12.04.pdf> (10. 3. 2020).