

Универзитет Црне Горе
Машински факултет

Видосава Вилотијевић

**Нумеричко симулирање и анализа
података аеродинамичке буке
генерисане радом вјетротурбина**

докторска дисертација

Подгорица, 2025.

University of Montenegro
Faculty of Mechanical Engineering

Vidosava Vilotijevic

**Numerical Simulation and Data Analysis
of Aerodynamic Noise Generated by
Wind Turbine Operation**

Doctoral Dissertation

Podgorica, 2025

Подаци о докторанду

- Име и презиме: Видосава Вилотијевић
- Датум и мјесто рођења: 12. 11. 1993. године, Шавник, Црна Гора
- Назив завршеног
студијског програма: Машинство – енергетика
- Година завршетка: 2018.

Ментор

- др Игор Вушановић, редовни професор,
Универзитет Црне Горе – Машински факултет

Коментор

- др Мики Хонџо, редовни професор,
Универзитет у Минесоти – Грађевински факултет

Комисија за одбрану докторске дисертације

- др Јелена Сворџан, редовни професор
Универзитет у Београду – Машински факултет
- др Урош Караџић, редовни професор
Универзитет Црне Горе – Машински факултет
- др Милан Шекуларац, ванредни професор
Универзитет Црне Горе – Машински факултет
- др Игор Вушановић, редовни професор
Универзитет Црне Горе – Машински факултет
- др Мики Хонџо, редовни професор
Универзитет у Минесоти – Грађевински факултет

Датум одбране

- 26.09.2025.

ЗАХВАЛНИЦА

У овом важном тренутку мог живота, осјећам дубоку потребу да се захвалим свима који су били дио мог академског путовања и на различите начине допринијели да овај рад угледа свјетлост дана. Без њихове подршке, савјета и охрабрења, успјех не би био могућ.

Велику захвалност упућујем свом ментору проф. др Игору Вушановићу, али и коментору проф. др Микију Хонцу, на њиховој професионалној ангажованости, стрпљењу и подршци коју су ми пружали током израде докторске дисертације. Њихова визија и помоћ у обезбјеђивању свих потребних података имала је важну улогу у успјешној реализацији рада. Желим исказати захвалност и због тога што ми је био омогућен боравак на Универзитету у Минесоти у сврху докторских истраживања, без обзира на то што сам, због непредвиђених околности изазваних пандемијом корона вируса, била спријечена да отпутујем. Ипак, подршка и сарадња са проф. др Микијем Хонцом биле су од изузетног значаја за мој рад, на чему сам му неизмјерно захвална.

Посебно се захваљујем проф. др Јелени Сворцан која се појавила у тренутку када је у мојим очима све изгледало безизлазно. Њена несебична помоћ и подршка у тим тренуцима биле су од кључног значаја за наставак мог истраживања. Слободно могу рећи да је и она, поред других, имала менторску улогу у мом раду, пружајући ми ослонац у тренуцима када ми је он био најпотребнији.

Огромну захвалност дугујем проф. др Урошу Караџићу на: очинском односу, помоћи, савјетима и подршци, не само током рада на докторској дисертацији, већ током цијелог мог боравака на Машинском факултету. Од првог часа Механике флуида, када сам као студент закорачила у свијет енергетике, преко менторстава на мом дипломском и магистарском раду, па

све до сарадње коју смо остварили као професор и асистент, проф. Карацић је био и остао неизоставни ослонац у мом стручном и академском усавршавању.

Такође, захваљујем се колегама са Машинског факултета у Подгорици и Београду који су били укључени у рад на овом докторском истраживању, као и свима који су, својим знањем и искуством, допринијели да мој студентски сан постане реалност.

Хвала руководству Машинског факултета у Подгорици, на челу са проф. др Радојем Вујадиновићем, на подршци и помоћи у свим фазама мог рада.

Наравно, захваљујем се свим својим пријатељима на разумијевању, трпљењу и подршци коју су ми пружали током овог дугог и захтјевног процеса.

На крају, али не мање важно, захваљујем се својој породици која ми је увијек била ослонац. Њихова безусловна љубав, разумијевање и подршка дали су смисао свему овоме. Без њих не бих успјела да превазиђем све препреке и начиним овај битан корак у свом животу.

Зато докторски рад посвећујем својим родитељима, који су цио свој живот посветили мојој браћи и мени.

ПОДАЦИ О ДОКТОРСКОЈ ДИСЕРТАЦИЈИ

Назив докторских студија

- Докторске студије Машинства

Наслов докторске дисертације

- Нумеричко симулирање и анализа података аеродинамичке буке генерисане радом вјетротурбина

Резиме

Развој одрживих извора енергије довео је до шире примјене вјетротурбина као ефикасног средства за производњу електричне енергије. Иако представљају обновљив и еколошки прихватљив извор енергије, вјетротурбине производе аеродинамичку буку, која може имати штетне посљедице по животну средину и здравље људи. Стога је разумијевање механизма настанка буке и њених карактеристика од великог значаја, како би се конструкција турбина унапређивала, а ниво буке смањивао.

Дисертација почиње анализом теоријских основа аеродинамичке буке, узимајући у обзир факторе као што су ефекти изазвани турбуленцијом и структурне вибрације. Затим се анализира конструктивни дизајн вјетротурбина и аеродинамика њихових лопатица, уз свеобухватан преглед сила које дјелују на те лопатице. Уведен је математички модел који интегрише различите методе симулације, а добијени подаци су верификовани и валидовани у односу на експерименталне резултате.

Ова дисертација разматра нумеричке симулације и анализу података који се односе на карактеристике струјања флуида и аеродинамичку буку коју производе вјетротурбине у раду. Употријебљене су напредне методологије као што су *Blade Element Momentum Theory* (BEMT), компјутерска механика флуида (CFD) и акустички модели, укључујући *Ffowcs Williams–Hawkings* (FW-H) модел и моделе широкопојасне акустике. Софтверски алати *QBlade* и *ANSYS*

Fluent коришћени су за симулације струјања ваздуха и предвиђање нивоа буке. Кључни резултати показују значајне разлике у тачности предвиђања аеродинамичке буке између метода CFD и BEMT, при чему CFD пружа детаљнији приказ нестационарног струјања око лопатица. Поред тога, истражена је повезаност између буке, брзине вјетра и геометрије лопатица, као и могућности оптимизације дизајна у циљу смањења емисије буке.

Кључни допринос ове дисертације представља квантификација тачности стандардних нумеричких модела у предвиђању аеродинамичких и аероакустичких перформанси ротора великих вјетротурбина. Она пружа драгоцен увид у механизме настанка аеродинамичке буке код вјетротурбина, препознајући изазове са којима се суочавају они који су јој изложени. Циљ рада је да постави темеље за будућа истраживања усмјерена на побољшање акустичких перформанси вјетротурбина у складу са принципима одрживог развоја, како би се омогућио складнији суживот са животном средином.

Кључне ријечи

- вјетротурбине, аеродинамичка бука, нумеричка симулација, CFD, BEMT, акустички модели, *QBlade*, *ANSYS Fluent*

Научна област

- Машинство

Ужа научна област

- Механика флуида

УДК број

- _____

INFORMATION ON THE DOCTORAL DISSERTATION

Name of Doctoral Program

- Doctoral Studies in Mechanical Engineering

Title of Doctoral Dissertation

- Numerical Simulation and Data Analysis of Aerodynamic Noise Generated by Wind Turbine Operation

Abstract

The advancement of sustainable energy sources has led to the widespread implementation of wind turbines as an effective means of electricity generation. While they are a renewable and environmentally friendly energy option, wind turbines can produce aerodynamic noise, which may have detrimental effects on the environment and human health. Therefore, it is vital to understand the mechanisms of noise generation and its characteristics to improve turbine design and mitigate noise levels.

The dissertation begins with examining the theoretical underpinnings of aerodynamic noise, considering factors such as turbulence-induced effects and structural vibrations. Subsequently, the structural design of wind turbines and the aerodynamics of their blades are analyzed, accompanied by a comprehensive review of the forces acting on these blades. A mathematical model that integrates various simulation methods was employed, and the resulting data were verified and validated against experimental findings.

This dissertation examines the numerical simulation and data analysis related to fluid flow characteristics and the aerodynamic noise generated by wind turbine operations. It utilizes advanced methodologies such as Blade Element Momentum Theory (BEMT), Computational Fluid Dynamics (CFD), and acoustic models, including Ffowcs Williams–Hawkins (FW-H) and broadband acoustic models. The software applications QBlade and ANSYS Fluent were employed for airflow

simulations and for predicting noise levels. The key findings reveal significant differences in the accuracy of aerodynamic noise predictions between the CFD and BEMT methods, with CFD offering a more detailed representation of the unsteady flow around the blades. Additionally, the study investigates the relationship between noise, wind speed, and blade geometry, along with potential design optimizations aimed at reducing noise emissions.

The key contribution of this dissertation is the quantification of the accuracy of standard numerical models in predicting the aerodynamic and aeroacoustic performance of large wind turbine rotors. It offers valuable insights into the mechanisms of aerodynamic noise generation by wind turbines, recognizing the challenges faced by those impacted by this noise. It also aims to lay the groundwork for further studies focused on improving the environmentally sustainable acoustic performance of wind turbines, ultimately fostering a more harmonious coexistence with our environment.

Keywords

- wind turbines, aerodynamic noise, numerical simulation, CFD, BEMT, acoustic models, *QBlade*, *ANSYS Fluent*

Scientific area

- Mechanical Engineering

Specific scientific area

- Fluid Mechanics

UDC

- _____

ПРЕДГОВОР

Развој обновљивих извора енергије припада групи најзначајнијих изазова модерног друштва. Вјетротурбине дају велики допринос одрживој производњи електричне енергије, али њихов рад прате и одређени недостаци, међу којима је аеродинамичка бука један од најзначајнијих. Управо тај аспект чини централну тему овог истраживања, које је усмјерено ка бољем разумијевању механизма настанка буке, као и примјени савремених нумеричких метода у њеној анализи и предвиђању.

Мотивација за овај рад проистекла је из све чешће потребе за смањењем негативних утицаја вјетротурбина на околину, а тиме и за оптимизацијом њиховог дизајна. Прецизно моделирање аеродинамичких и акустичких феномена који се јављају током рада вјетротурбина представља сложен задатак, који захтијева примјену напредних нумеричких техника и мултифизичких приступа.

Ова дисертација је резултат вишегодишњег рада, сарадње са домаћим и међународним стручњацима, као и анализе релевантне литературе и експерименталних података. Истраживање је спроведено уз коришћење савремених софтверских алата, као што су *ANSYS Fluent* и *QBlade*, а његови резултати могу бити од користи како у академском тако и у индустријском контексту.

Надам се да ће рад који је пред вама допринијети даљем развоју истраживања у области аеродинамике вјетротурбина и да ће подстаћи нове генерације истраживача да се заинтересују за унапређивање ове значајне области инжењерства.

ИЗВОД ИЗ ТЕЗЕ

Ова докторска дисертација се бави нумеричким симулирањем и анализом аеродинамичке буке коју генеришу вјетротурбине током рада. Аеродинамичка бука представља један од најзначајнијих изазова у развоју модерних вјетротурбина, јер може утицати на околину, људско здравље и прихватљивост ових система у насељеним подручјима. С обзиром на растући значај обновљивих извора енергије, неопходно је развити методологије које омогућавају прецизну анализу и оптимизацију аеродинамичке буке у циљу смањења њеног утицаја.

У дисертацији су анализирани механизми генерисања буке, при чему су идентификовани кључни извори, као што су: бука изазвана турбулентним струјањем, бука проузрокована граничним слојем на лопатицама и бука која настаје услед структурних вибрација. Примијењене су различите нумеричке методе за симулацију ових феномена, укључујући *Blade Element Momentum Theory* (BEMT), *Computational Fluid Dynamics* (CFD), као и напредне акустичке моделе.

У истраживању су коришћени софтверски алати *QBlade* и *ANSYS Fluent* за детаљну анализу струјања ваздуха око лопатица вјетротурбине и предвиђање емисије буке. У поређењу са BEMT приступом, CFD модели су омогућили прецизније разматрање нестационарног струјања, док је BEMT метод коришћен за једноставнију, али ефикасну процјену аеродинамичких параметара. Такође, примјењени су акустички модели, као што су *Ffowcs Williams–Hawkings* (FW-H) модел и *broadband* акустички модели, за квантификацију буке у фреквенцијском домену.

Добијени резултати су упоређени са експерименталним подацима, чиме је извршена верификација и валидација предложених метода. Анализа је обухватила поређење тачности различитих метода, са фокусом на предности и ограничења CFD и BEMT приступа. Установљено је да CFD модели пружају

детаљнији увид у динамику струјања и утицај турбуленције на буку, док ВЕМТ метод омогућава брже израчунавање са задовољавајућом тачношћу у специфичним случајевима.

Додатно, у дисертацији је испитана зависност емисије буке од радних услова турбине, укључујући брзину вјетра, геометрију лопатица и брзину обртања ротора. Истражени су начини за оптимизацију дизајна лопатица, са циљем смањења нивоа буке без значајног утицаја на ефикасност претварања енергије вјетра у електричну енергију.

Ова дисертација доприноси унапређењу разумијевања механизма настанка аеродинамичке буке код вјетротурбина и развоју метода за њену анализу и предвиђање. Добијени резултати могу се примијенити у индустрији вјетроенергетике за побољшање акустичких карактеристика вјетротурбина, као и у академским истраживањима усмјереним на даљи развој симулационих модела. Оптимизација аеродинамичких и акустичких својстава турбина допринијеће њиховој широј примјени у урбаним и руралним срединама, смањењу негативног утицаја на животну средину и унапређењу квалитета живота у подручјима у којима су инсталиране.

THESIS OVERVIEW

This doctoral dissertation focuses on the numerical simulation and analysis of aerodynamic noise generated by wind turbine operation. Aerodynamic noise is one of the key challenges in the development of modern wind turbines, as it can impact the environment, human health, and the social acceptance of these systems in populated areas. Given the growing importance of renewable energy sources, it is essential to develop methodologies that enable precise analysis and optimization of aerodynamic noise to minimize its impact.

The dissertation analyzes the mechanisms of noise generation, identifying key sources such as noise caused by turbulent airflow, boundary layer interactions on the blades, and noise resulting from structural vibrations. Various numerical methods were applied to simulate these phenomena, including Blade Element Momentum Theory (BEMT), Computational Fluid Dynamics (CFD), and advanced acoustic models.

The research utilized *QBlade* and *ANSYS Fluent* software tools for a detailed analysis of airflow around wind turbine blades and for predicting noise emissions. In comparison with BEMT, CFD models enabled a more precise investigation of unsteady airflow, while the BEMT method was used for a simplified yet efficient assessment of aerodynamic parameters. Additionally, acoustic models such as the Ffowcs Williams–Hawkings (FW-H) model and broadband acoustic models were applied to quantify noise in the frequency domain.

The obtained results were compared with experimental data, ensuring the verification and validation of the proposed methods. The analysis included a comparison of different methodologies, focusing on the accuracy and applicability of CFD and BEMT approaches. It was found that CFD models provide a more detailed insight into the flow dynamics and the influence of turbulence on noise, whereas the BEMT method offers faster calculations with satisfactory accuracy in specific cases.

Furthermore, the dissertation examined the dependence of noise emissions on turbine operating conditions, including wind speed, blade geometry, angle of attack, and rotor speed. Various methods for blade design optimization were investigated to reduce noise levels without significantly affecting the efficiency of wind energy conversion.

This dissertation contributes to the advancement of knowledge regarding the mechanisms of aerodynamic noise generation in wind turbines and the development of methods for its analysis and prediction. The obtained results can be applied in the wind energy industry to improve the acoustic performance of wind turbines, as well as in academic research aimed at further developing simulation models. Optimizing the aerodynamic and acoustic properties of wind turbines will facilitate their wider implementation in urban and rural environments, reduce their environmental impact, and enhance the quality of life in areas where they are installed.

САДРЖАЈ

1. УВОД.....	5
1.1. Мотивација и значај истраживања.....	6
1.2. Циљеви истраживања.....	7
1.3. Преглед литературе	9
1.4. Структура дисертације	18
2. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ АЕРОДИНАМИЧКЕ БУКЕ.....	20
2.1. Типови буке у аеродинамици.....	20
2.2. Бука изазвана турбулентним струјањем	21
2.3. Бука усљед структурних вибрација	23
3. ПРИНЦИП РАДА И СТРУКТУРА ВЈЕТРОТУРБИНА.....	26
3.1. Принцип рада вјетротурбина.....	26
3.2. Структура и дизајн вјетротурбина	27
3.3. Снага вјетротурбине	30
3.4. Ресурс вјетра и његова временска и просторна варијабилност	32
3.4.1. Вјетропотенцијал у Црној Гори.....	33
4. АЕРОДИНАМИКА ЛОПАТИЦА ВЈЕТРОТУРБИНА	36
4.1. Аеродинамичке силе на лопатицама вјетротурбине.....	36
4.2. Коефицијенти отпора и узгона.....	37
4.3. Геометријски модели лопатица.....	37
5. МЕТОДЕ ИСТРАЖИВАЊА	39
5.1. Експериментални подаци	39
5.2. Методе мјерења аеродинамичке буке	40
5.3. Математички модел	44
5.4. Рејнолдсови модели турбуленције.....	47
5.5. Акустички модели	50

5.6.	BEMT (<i>Blade Element Momentum Theory</i>) нумерички модел.....	53
5.7.	Метода коначних запремина (FVM).....	55
6.	НУМЕРИЧКЕ СИМУЛАЦИЈЕ	58
6.1.	Мрежа за нумеричке симулације.....	58
6.2.	Улазни параметри симулације	62
6.3.	<i>QBlade</i> – анализа аеродинамике турбине.....	64
6.4.	<i>ANSYS Fluent</i> – CFD симулације струјања и анализе буке.....	66
6.5.	Верификација и валидација модела	67
7.	РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА.....	69
7.1.	Аеродинамичка анализа вјетротурбина – резултати нумеричких симулација.....	70
7.1.1.	Поређење резултата добијених CFD и BEMT приступима са експерименталним подацима.....	70
7.1.2.	Анализа нестационарног струјања ваздуха око вјетротурбине при промјенљивим брзинама	78
7.2.	Анализа акустичке буке – резултати нумеричких симулација.....	91
7.2.1.	<i>Broadband</i> акустички модел – модел широкопојасног шума .	91
7.2.2.	Процјена акустичких перформанси у <i>QBlade</i> -у.....	95
7.2.3.	FW-N акустички модел	98
7.2.4.	Утицај буке на птице.....	111
8.	ЗАКЉУЧАК.....	113
	ЛИТЕРАТУРА	119
	ПРИЛОГ I – Листа канала система за прикупљање података.....	127
	БИОГРАФИЈА АУТОРА	131
	ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ.....	132
	ИЗЈАВА О ИСТОВЈЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ ДОКТОРСКОГ РАДА	133
	ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ	134

НОМЕНКЛАТУРА

Латиничне ознаке

A [m^2]	површина ротора
c [m]	дужина тетиве локалног сегмента
c_0 [m/s]	брзина звука
c_p [—]	коефицијент снаге
C_D [—]	коефицијент отпора
C_L [—]	коефицијент узгона
C_p [$J/(kg \cdot K)$]	топлотни капацитет при константном притиску
C_v [$J/(kg \cdot K)$]	топлотни капацитет при константној запремини
d [m]	пречник ротора
D [N]	сила отпора
E_k [J]	кинетичка енергија
f [Hz]	фреквенција
f_{ac} [Pa/s]	акустички извор
k [m^2/s^2]	турбулентна кинетичка енергија
L [N]	сила узгона
p [Pa]	притисак
P [W]	снага
r [m]	полупречник ротора турбине
s [J/K]	ентропија
t [s]	вријеме
T [$^{\circ}K$]	температура
$[T_{ij}]$	Лајтилов тензор

u [m/s]	пројекција брзине
U [J]	унутрашња енергија
v [m/s]	брзина вјетра
v_r [m/s]	релативна брзина на лопатици
w [m/s]	локална брзина флуида
x [m]	просторна координата
z [m]	висина

Грчке ознаке

α [–]	коефицијент трења
ε [m ² /s ³]	брзина дисипације енергије
κ [–]	адијабатски коефицијент
λ [–]	коефицијент рада
μ [Pa · s]	динамичка вискозност
μ_t [Pa · s]	турбулентна динамичка вискозност
ν_t [m ² /s]	турбулентна кинематска вискозност
ρ [kg/m ³]	густина
Φ [Pa/m]	укупна промјена неке величине
ω [1/s]	специфична брзина дисипације
Ω [rad/s]	угаона брзина

Оператори

$\cdot$	оператор скаларног производа
∇	Хамилтонов (набла) оператор

Индекси

i, j индекси просторних координата

Симболи

— осредњена вриједност

' флуктуација

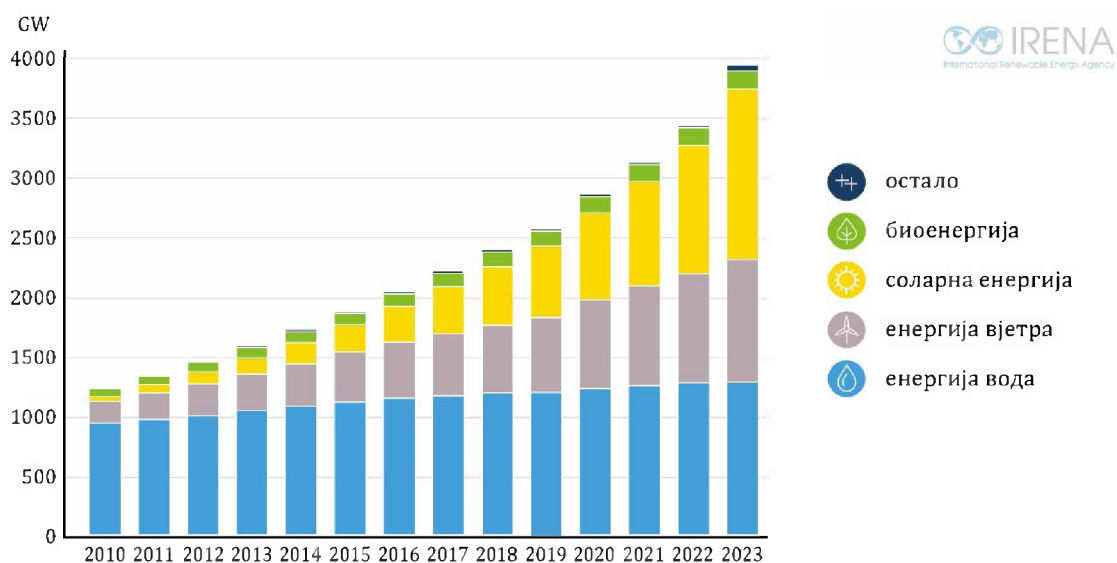
Скраћенице

ABL	атмосферски гранични слој
AM	модулација амплитуде
BEMT	<i>Blade Element Momentum Theory</i>
BNS	<i>Broadband Noise Source</i>
BPM	<i>Brooks, Pope, Marcolini</i>
CAA	компјутерска анализа аероакустике
CFD	компјутерска механика флуида
DES	<i>Detached Eddy Simulations</i>
DU	<i>Delft University</i>
FW-H	<i>Ffowcs Williams–Hawkings</i>
FVM	метода коначних запремина
HAWT	вјетротурбина са хоризонталном осом обртања
IEA	Међународна агенција за енергију
IT	улазна турбуленција
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
MRF	<i>Moving Reference Frame</i>
PDE	парцијалне диференцијалне једначине

RANS	<i>Reynolds–Averaged Navier–Stokes</i>
SPL	јачина звучног притиска
SST	<i>Shear Stress Transport</i>
TBL-TE	<i>Turbulent Boundary Layer – Trailing Edge</i>
TVD	<i>Total Variation Diminishing</i>
UDF	<i>User-Defined Functions</i>
UTRC	<i>United Technologies Research Center</i>
VAWT	вјетротурбина са вертикалном осом обртања
ОИЕ	обновљиви извори енергије

1. УВОД

Енергија вјетра је један од најстаријих облика коришћења обновљивих извора енергије (ОИЕ) и данас представља кључни сегмент глобалног преласка на чисте изворе енергије. Вјетротурбине трансформишу кинетичку енергију вјетра у електричну енергију, при чему се ротација лопатица користи за покретање генератора. Искоришћење енергије вјетра је у сталном порасту јер нуди релативно чист и неисцрпан извор енергије, што може значајно смањити зависност од фосилних горива. Енергија вјетра се у пракси користи кроз инсталацију вјетротурбина на локацијама са повољним условима, било на копну (*onshore*) или на мору (*offshore*). Вјетроелектране на мору постају све популарније због јачих и стабилнијих вјетрова, али и због смањеног утицаја на насељена подручја. Према подацима Међународне агенције за енергију (IEA), вјетар је 2023. године учествовао са око 7% у глобалној производњи електричне енергије (слика 1.1), а очекује се да ће тај удио наставити да расте с обзиром на све веће инвестиције у овом сектору. [1]



Слика 1.1. Капацитет електричне енергије из ОИЕ у свијету [2]

1.1. Мотивација и значај истраживања

Усљед преласка на обновљиве изворе енергије, вјетротурбине имају кључну улогу у смањењу емисије угљен-диоксида и борби против климатских промјена. Њихова способност да производе електричну енергију искориштавањем снаге вјетра чини их једним од најперспективнијих рјешења за одрживи развој енергетског сектора. Међутим, како се све већи број вјетропаркова гради у близини насељених подручја, јављају се нови изазови, а један од њих је генерисање аеродинамичке буке. Ова врста буке, која настаје као резултат интеракције вјетра са лопатицама вјетротурбине, може имати значајан утицај на здравље људи, квалитет живота у заједницама које се налазе у близини вјетропаркова, као и на локалне екосистеме. Бука вјетротурбина може узроковати негативне физиолошке и психолошке ефекте, као што су поремећаји сна, повећани стрес и лошији квалитет живота. Поред утицаја на људе, бука може ометати и природне екосистеме утичући на комуникацију и понашање животиња, посебно птица и слијепих мишева, јер су они осјетљивији од других на звучне промјене у околини.

Мотивација за ово истраживање произлази из потребе за развојем напредних нумеричких модела који омогућавају симулацију и анализу буке, што подразумијева разумијевање прецизних механизма њеног генерисања. Коришћење нумеричких метода, попут BEMT (*Blade Element Momentum Theory*) модела, класичних метода компјутерске механике флуида (CFD) и акустичких модела, пружа прилику за унапређење вјетротурбина како би се смањила бука, а истовремено очувала или повећала њихова енергетска ефикасност. Поред тога, детаљна анализа и симулација буке омогућава прецизнију прогнозу њеног ширења и утицаја у различитим окружењима, што је неопходно за постизање еколошки прихватљивог развоја вјетропаркова.

Поред нумеричког приступа, експериментална анализа је такође важан дио овог истраживања. Лабораторијска испитивања и теренска мјерења могу

помоћи у верификацији и валидацији нумеричких модела, пружајући прецизније податке о емисији буке у различитим условима. Оваква анализа омогућава бољу прогнозу ширења буке и њеног утицаја у различитим окружењима, што је предуслов оптимизације вјетропаркова.

Значај истраживања се налази у могућностима да се унаприједи постојеће разумијевање аеродинамичке буке вјетротурбина кроз комбинацију нумеричке симулације и анализе експерименталних података. Очекује се да ће резултати овог рада помоћи у:

- унапређењу аеродинамичког дизајна вјетротурбина са циљем смањења буке;
- развоју ефикаснијих модела симулације буке, који могу бити примијењени на широк дијапазон конфигурација вјетротурбина;
- оптимизацији вјетропаркова у смислу смањења негативних утицаја на људе и животну средину, што је важно за одрживи развој обновљивих извора енергије.

Ово истраживање доприноси не само научној заједници кроз развој нових метода и модела, већ и индустрији, пружајући алате за побољшање перформанси вјетротурбина уз смањење еколошких и друштвених посљедица. Унапређење технологије вјетротурбина са фокусом на смањење буке може допринијети већем прихватању овог облика обновљиве енергије међу становништвом, чиме се отвара пут ка још бржој енергетској транзицији. С тим у вези, важно је да се ови напори наставе и даље како би се осигурао одржив развој и балансиран однос између технолошког напретка и заштите околине.

1.2. Циљеви истраживања

Циљ ове докторске дисертације је истраживање феномена генерисања нискофреквентне буке која се ствара услед струјања, а током рада

вјетротурбина. Генерално гледано, истраживање се може подијелити у два правца.

Као прво, потребно је фундаментално познавање феномена генерисања турбуленције услед струјања ваздуха око профила лопатица вјетротурбина, а које директно зависи од различитих режима рада турбине са мањим или већим брзинама вјетра. Генерисана турбуленција је основа за формирање нискофреквентне буке која има или може имати утицај на животну средину. У том смислу, један од циљева рада је одабир математичког модела и компјутерског програма помоћу кога ће се анализирати различити профили вјетротурбина, како по питању утицаја нискофреквентне буке на животну средину, тако и по питању ефикасности рада вјетротурбине.

Као друго, потребно је током рада истражити и како различити профили лопатица утичу на ефикасност рада вјетротурбине, односно на степен претварања кинетичке енергије вјетра у механичку енергију вратила турбине, које се употребљава за производњу електричне енергије.

С обзиром на то да ће се у овом раду користити експериментални подаци са реалне вјетротурбине, развијени модели ће бити тестирани за стварне услове који владају на њима, како би истраживања спроведена у овом раду дала допринос заједницама чији ће предмет истражвања бити ова турбина.

Полазну основу за истраживање наведених феномена чине хипотезе, које би требало дефинисати тако да буду добра стартна основа и усмјере даљи ток рада. Истраживање ће бити засновано на четири хипотезе.

- X1: CFD модели могу да опишу нискофреквентни шум произведен од лопатица вјетротурбина.
- X2: Лопатице вјетротурбине стварају нискофреквентни шум унутар граница осјетљивости птица.

- Х3: Облик и храпавост лопатица турбине контролишу интензитет и пригушење генерисаног нискофреквентног шума у близини турбине.
- Х4: Модели велике тачности и смањене сложености CFD-а су од велике важности за смањење негативног утицаја одрживих енергетских технологија на животињски свијет.

1.3. Преглед литературе

Озбиљнија истраживања вјетротурбина почела су 70-их година прошлог вијека. У посљедње четири деценије фокус је био на развоју што већих турбомашина, са што већом дужином лопатица, а све у циљу што веће производње енергије. Разлози за то су смањивање укупних трошкова производње енергије и омогућавање повећања удјела производње енергије из обновљивих извора, са најмањим могућим бројем вјетротурбина. Развој већих вјетротурбина постао је водећи тренд у индустрији, будући да снага вјетротурбине расте с квадратом пречника ротора [3,4]. Стога је оптимизација вјетротурбина, посебно аеродинамике ротора, постала кључна за повећање производње енергије и смањење енергетских трошкова [5]. У новијим истраживањима велики акценат се ставља на избор материјала за лопатице вјетротурбина. Полимерни композити ојачани влакнима показали су се као оптимални материјали због своје мале масе, добрих механичких својстава и отпорности на корозију [6]. Недавна истраживања фокусирана су и на развој биоматеријала за израду лопатица, као што је PЕCAN смола направљена од биомасе, која омогућава рециклажу лопатица на крају њиховог радног вијека [7].

Основе модерне аеродинамике вјетротурбина могу се пратити од првобитних радова Беца [8] и Жуковског [9], који су поставили теоријске границе ефикасности претварања енергије вјетра. На бази тога, Глауерт [10] је дао значајан допринос развојем теорије момента елемента лопатице

(BEMT), која је од тада постала темељ дизајна и оптимизације хоризонталних вјетротурбина (HAWT). BEMT, која комбинује теорију елемента лопатице с теоријом момента, омогућава ефикасно предвиђање аеродинамичких сила на лопатицама турбине. Упркос својој једноставности, BEMT метода се показала као изузетно прецизна у номиналним радним условима, што је чини неопходним алатом у раним фазама пројектовања вјетротурбина [11–13]. Међутим, претпоставке на којима се заснива BEMT, попут униформног струјања и поједностављене геометрије лопатице, могу ограничити њену прецизност, посебно код модерних, великих вјетротурбина које раде у сложеним условима струјања. Како би се отклонила ова ограничења, појавила се компјутерска динамика флуида (CFD) као софистициранији приступ за анализу аеродинамике вјетротурбина. CFD технике, посебно оне које користе напредне моделе турбуленције попут *Shear Stress Transport (SST) $k - \omega$* модела, нуде детаљнија и прецизнија предвиђања аеродинамичких перформанси. Ови модели могу обухватити сложене феномене струјања, укључујући турбуленцију уз одвајање граничног слоја, што је кључно за пројектовање и оптимизацију модерних вјетротурбина [14–16].

Године 1952. Лајтил (*Lighthill*) је представио свој први рад о аеродинамички генерисаној буци Краљевском друштву Лондона [17]. Како је у том раду Лајтил дефинисао акустичку аналогију, она се данас назива Лајтилова акустичка аналогија. Важан закључак је да Лајтилова теорија омогућавала израчунавање звучног поља у подручју флукутирајућег (турбулентног) струјања рјешавањем аналогног проблема принудних осцилација, под условом да је струјање ваздуха познато. Лајтилова аналогија дефинисала је запремински интеграл Лајтиловог тензора који је показао да Рејнолдсови напони доминирају у звучном пољу. Лајтилов тензор, T_{ij} се примјењује у једначинама континуитета и једначини промјене количине кретања за описивање струјања у граничном слоју.

Пауел (*Powell*) је имао другачији приступ и доказао да формирање и кретање вртлога ствара доминантне изворе буке [18,19]. Извођење у Пауеловој анализи резултира нехомогеном једначином таласа за промјенљиву густину изазвану кретањем флуида.

И Пауелова и Лајтилова теорија изведене су из истих једначина, једначине континуитета и једначина промјене количине кретања, и показало се да су еквивалентне [20].

Вилијам Хевинксова (*Williams-Hawinks*) једначина (FW-H) је једначина која даје одличне резултате код израчунавања буке коју стварају лопатице турбина, под условом да се знају тачне информације о граничном слоју [21]. Ова једначина постала је основа за неке нумеричке кодове предвиђања буке који или израчунавају гранични слој или користе емпиријске податке за уношење информација о граничном слоју у FW-H једначину.

Вегнер (*Wagner*) је утврдио да се механичка бука може у великој мјери смањити правилним обликом кућишта и коришћењем материјала који апсорбују звук и сузбијају вибрације [22]. Ово смањење резултирало је тиме да аеродинамички шум постаје доминантан извор буке у вјетротурбинама.

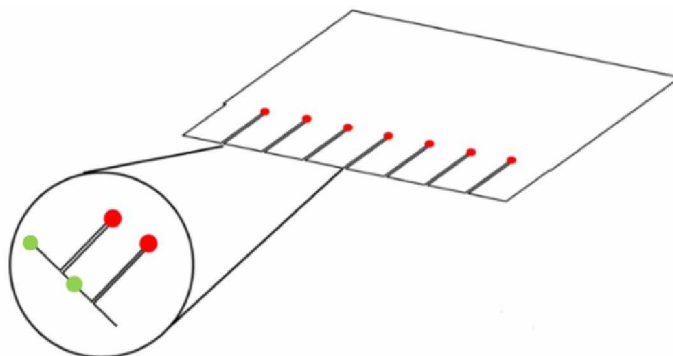
Бука улазне турбуленције (IT) настаје услед интеракције површине лопатице, посебно улазне ивице, са атмосферском турбуленцијом. Ова интеракција турбулентних вртлога са лопатицом ствара широкопојасни шум који се налази у нискофреквентном спектру (до 1000 Hz) и веома зависи од интензитета атмосферске турбуленције и величине турбулентног појаса. Допринос IT буке укупној буци вјетротурбина још увијек није у потпуности истражен, посебно због њене зависности од атмосферске стабилности и структуре турбуленције. Према мјерењима акустичког поља, удио буке преко улазне ивице најзначајнији је у близини врха гдје је брзина струјања велика [23]. Тупа задња ивица узрокује Вон Карманове вртлоге што резултира

емисијом тоналне буке. Овај извор буке зависи од облика улазне ивице, Рејнолдсовог броја и односа δ^*/t^* , гдје је δ^* дебљина граничног слоја, а t^* дебљина слоја улазне ивице.

Бука улазне турбуленције, која зависи од атмосферске турбуленције, не може се ублажити. Међутим, доказано је да промјене облика носећих ивица значајно утичу на стварање буке [24]. На основу овога, предложено је много различитих облика носећих профила за ублажавање ИТ буке.

Биомиметичко истраживање за смањење шума модификацијом носећих ивица било је занимљиво многим истраживачима. Експериментални рад Хансена (*Hansen*) базиран је на концептима каверни код репова китова, јер они на реповима и перајима имају синусоидалне ивице за смањење компоненти тоналне буке [25]. Утврђено је да су израслине са великом амплитудом и малом таласном дужином ефикасне у смањењу тоналне буке. На механизам утичу парни вртлози произведени из корита каверни јер појачавају размјену замаха у граничном слоју и на тај начин мијењају његове карактеристике, као што су стабилност и учесталост флукуација брзине у близини крајње ивице. Такође, како локација раздвајања варира због водеће синусоидне ивице, линија раздвајања ће се пореметити, што доводи до промјене стабилности слоја смицања и учесталости промјене брзине.

Недавна експериментална истраживања буке која је спровео Паручури (*Paruchuri*) на различитим профилима предњег руба, истакла су значајну улогу водећих прореа сматрајући их супериорним код профила са једном моноталасном дужином за смањење буке ниске фреквенције (слика 1.2) [26]. Нови профили имају два доминантна нивоа буке и високо кохерентан компактни извор буке по изрецакој ивици. Она ствара сметње којима се ублажава бука са водеће ивице. Смањење буке за чак 15 dB постигнуто је с предњим ивицама, док је конвенционалним приступима постигнуто смањење од свега 7 dB.



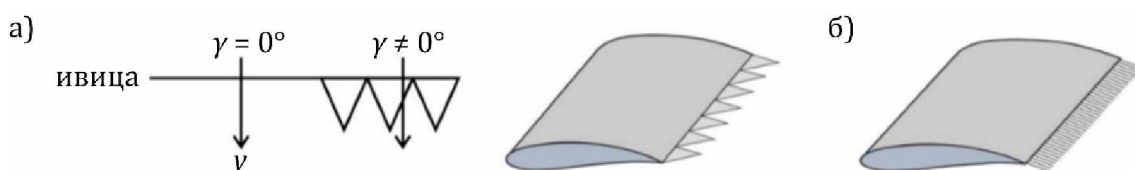
Слика 1.2. Скица прореа на предњој ивици [26]

Студије су показале да се додавањем структура попут назубљених ивица или „чешљева“ на предњи дио аеропрофила може значајно смањити бука изазвана интеракцијом са турбулентним улазним струјањем. Ове модификације помажу у смањењу турбуленција и самим тим аероакустичке емисије буке, без великог губитка у аеродинамичкој ефикасности. Експерименти са различитим геометријама „чешља“ показали су смањење буке при одређеним нападним угловима [27,28]. Такође, нумеричке симулације које истражују утицај интензитета улазне турбуленције на турбине дале су важне увиде у ове феномене. Студије су показале да повећан интензитет турбуленције може спријечити одвајање слојева струјања на површини лопатица, смањујући тиме губитке узроковане одвајањем. Међутим, повећани интензитет улазне турбуленције може довести и до повећаних секундарних губитака у турбинама, што представља компромис између буке и перформанси [29,30].

Ови радови доприносе бољем разумијевању интеракције турбуленције и аероакустичких ефеката, што омогућава даље унапређење метода за смањење буке у авионским моторима и турбомашинама.

Будући да је тзв. *Turbulent Boundary Layer – Trailing Edge (TBL-TE) Noise* доминантан извор буке за већину вјетротурбина, развијене су бројне технике ублажавања и њене контроле. Баронова техника смањења ТЕ-а пружа преглед

неколико метода осмишљених за ублажавање ТЕ буке. Бука од задњих ивица је директно пропорционална трећем степену угла γ под којим ваздух наилази на лопатицу (видјети слику 1.3) према аналитичком извођењу, користећи полу-бесконачну апроксимацију равне плоче [31]. Ова зависност од $\cos^3 \gamma$ показује да се бука распршује најефикасније када је пут турбулентних вртлога нормалан на задњу ивицу. Модификације излазних ивица омогућавају да се смањи угао између вртложне путање и ивице испод 90° , чиме се смањује расипање звука. Међутим, будући да их није увијек могуће ускладити са правцем струјања због промјенљиве брзине, оне доводе до повећања нивоа звука на већим фреквенцијама [24]. За превазилажење проблема усклађивања струјања са ивицама, представљен је концепт репних четкица (слика 1.3.а). У експерименталном раду Хера (*Herr*) и Финеза (*Finez*) потврђена је предност примјене репних четкица за редукцију аеродинамичке буке [32,33]. Изрецкане репне ивице (слика 1.3.б) на сличан начин као репне четкице смањују нагле промјене у акустичкој импеданси које се јављају у близини излазне ивице профила [34]. Студија Гејера (*Geyer*), као и Кинзиа (*Kinzie*), показала је потенцијал ових технологија за смањење аеродинамичке буке [35,36].



Слика 1.3. Облик излазних ивица: а) репне четкице; б) изрецкана ивица [24]

Свеукупна истраживања показала су неопходност спровођења тзв. потпуног експеримента на турбинама. Такође, истраживања су показала да употреба финлета, малих структура постављених дуж струјних линија на ивици лопатице, значајно смањује буку изазвану турбулентним вртлозима. Финлети стварају локализовану брзинску дефицитарну зону, што спречава генерисање вртлога на крајевима и доприноси смањењу шума за око 10 dB на одређеним фреквенцијама [37,38].

Бука на врху лопатица турбине је доминантан извор буке вјетротурбина на високим фреквенцијама. Мадсен (*Madsen*) и Фугелзан (*Fuglsang*) су најприје идентификовали јачину вртлога на врху, проширење и сепарацију турбулентног региона у близини врха лопатице и предложили нераздвајајући вртлог на врху као могуће рјешење проблема [39]. Флајг (*Fleig*) и његови сарадници су извршили нумеричку анализу облика врха користећи акустичку аналогију и дошли до смањење буке од 5 dB за фреквенције веће од 4 kHz [40]. У каснијем експерименталном раду Кинзиа истраживана је ефикасност ових облика врхова у ублажавању буке са врха преко тупих, витких врхова [36]. Одабрани облици врхова дизајнирани су тако да минимизују дужину вртлога и интеракцију вртлога и бочне ивице. Меизијева (*Maizi*) скорошња нумеричка истраживања имала су за циљ смањење буке од врха лопатице. Она су показала да се коришћењем референтног врха и тзв. ајкулиног врха може остварити смањење буке од 7%, али истовремено и смањење снаге турбине за 3% [41]. Ове компјутерске анализе аероакустике (CAA) користиле су тзв. технику *Detached Eddy Simulations* (DES) за рјешавање струјног поља и FW-N једначине, што је изискивало значајне компјутерске ресурсе. У раду Дејшмука (*Deshmukh*) имплементирана је тзв. проширена ануларна домен методологија, која у анализу укључује регион око врха лопатице, да би се урадила параметарска анализа мјешовитих крилаца за побољшање аеродинамичких и аероакустичких перформанси [42]. Утврђено је да одређене модификације могу смањити буку на високим фреквенцијама, док истовремено побољшавају покретање турбине при ниским брзинама вјетра [43]. Истраживање показује да различите структуре врха могу побољшати путању вртлога и смањити разлику притисака између горње и доње површине лопатице, што доводи до смањења аеродинамичке буке [44].

Ова методологија пружа начин да се значајно смање рачунски трошкови (до 75%) и резултира смањењем буке од око 25% на средњим и високим фреквенцијама, заједно са побољшаним излазним моментом. Такве рачунски

ефикасне САА методологије могу отворити пут опсежној оптимизацији дизајна облика врхова за смањење буке и побољшање снаге.

Иако су вјетротурбине све популарније као извор обновљиве енергије, један од њихових највећих недостатака је висок ниво буке који генеришу током рада. Ова бука није само непријатна за људе који живе у близини вјетротурбина, већ може имати и негативан утицај на животну средину. Зато је разумијевање механизма који доводе до настанка буке и развој техника за њено смањење кључни фактор за даљи напредак у овом сектору. Преглед различитих аеродинамичких механизма који утичу на извор буке, као и технике за смањење буке у вјетротурбинама, пружају увид у основну природу аероакустике вјетротурбина. Основни механизми који генеришу буку у вјетротурбинама су комплексни и укључују неколико аеродинамичких појава као што су: турбуленција, одвајање струје флуида и вибрације које настају услед интеракције лопатица турбине са ваздухом. Заостали шум и бука услед турбуленције су доминантни у области ниске фреквенције, што чини овај проблем изузетно сложеним за контролу. Бука која се генерише на врху лопатица турбине, као и на задњој ивици, чини значајан дио укупне буке која се генерише током рада турбине. Облик врха контролише снагу и дужину раздвајања вртлога врха, што утиче на буку која се ту ствара. Из претходних истраживања је познато да већи дио буке која се генерише на задњој ивици долази од излазног дијела лопатица турбине, гдје је брзина струјања већа. Ова турбуленција ствара додатне вибрације и оштре ударе ваздуха који се преносе као бука. За разлику од тога, бука која се генерише на тупим дјеловима руба, као и она која потиче из граничног слоја ваздуха, мање је значајна и лако се регулише. Због тога су фокуси истраживања и развоја нових технологија за смањење буке углавном усмјерени на задњу ивицу лопатица. Данас је у оптицају више техника којима се описује митигација (простирање) буке. Методе зарубљивања задње ивице лопатице за смањење буке већ се користе на неким турбинама, али неке ефектније методе су неопходне у будућем

периоду. Ивице у облику четкица и тзв. изрецкани задњи рубови лопатица су потенцијалне технологије које могу обезбиједити додатно смањење буке која се генерише радом турбине. Ове иновације имају за циљ да побољшају аеродинамичке особине лопатица и да смање турбуленцију која се јавља на критичним мјестима, као што је задња ивица. Написан је до сада значајан број радова који се односе на препознавање буке као посљедице долазног струјања.

Коришћење искустава из природе везаних за живе организме, један је од начина који могу значајно помоћи у рјешавању проблема смањења генерисања буке као посљедице струјања и њиме изазване турбуленције. Показало се да изрецканост водећих ивица омогућава значајно смањење буке. Смањење шума са врха може се постићи оптимизацијом облика врха за смањење снаге вртлога и његову мању интеракцију са ивицама врхова. Рачунарска аероакустика може помоћи у бржој оптимизацији облика лопатице за смањење буке увођењем мање рачунски захтјевних нумеричких техника.

Теоријски модели и рачунарске симулације су од изузетне важности, али стварна ефикасност ових техника може се утврдити само кроз дугорочне студије и експериментална тестирања. Ово је нарочито важно у контексту нових технологија које укључују иновације као што су порозни задњи рубови лопатица или њихов дизајн инспирисан природом. Иако је у посљедњих неколико деценија учињен значајан напредак у разумијевању механизма који доводе до буке у вјетротурбинама, као и у развоју техника за смањење те буке, још увијек постоји много изазова пред нама. Развој нових материјала, дизајна и рачунарских техника може довести до значајног побољшања у погледу смањења нивоа буке, али и даље ће бити потребна опсежна истраживања и лабораторијска тестирања да би се утврдила дугорочна ефикасност ових рјешења.

1.4. Структура дисертације

Дисертација се састоји од осам главних поглавља, која су детаљно разрађена у складу са циљевима и темом истраживања. Свако поглавље има специфичну улогу у објашњавању, анализи и интерпретацији података који су релевантни за истраживање аеродинамичке буке вјетротурбина.

Поглавље 1 – *Увод* пружа основне информације о мотивацији и значају истраживања, циљевима који се желе постићи и прегледу литературе релевантне за тему дисертације.

Поглавље 2 – *Теоријске основе аеродинамичке буке* базирано је на њеним основним принципима, типовима и узроцима, као и специфичностима насталим због турбуленције и структурних вибрација у вјетротурбинама.

Поглавље 3 – *Принцип рада и структура вјетротурбина* описује основне карактеристике њеног рада, кључне компоненте и конструкцијске карактеристике, укључујући и анализу снаге.

Поглавље 4 – *Аеродинамика лопатица вјетротурбина* анализира аеродинамичке силе које на дјелују на лопатице, као и геометријске моделе и коефицијенте отпора и узгона.

Поглавље 5 – *Методе истраживања* обухвата све методе које су коришћене у истраживању, укључујући експерименте мјерења буке, математичке моделе, као и различите приступе за нумеричке симулације, као што су Рејнолдсови модели турбуленције, BEMT нумерички модел и метода коначних запремина.

Поглавље 6 – *Нумеричке симулације* детаљно описује примијењене нумеричке симулације, укључујући мреже за симулацију, улазне параметре, као и софтверске алате попут *QBlade* и *ANSYS Fluent* коришћене за анализу аеродинамике и буке.

Поглавље 7 – *Резултати и дискусија* садржи анализу резултата добијених путем нумеричких симулација и упоредну анализу са експерименталним подацима. Дискутује се о утицају различитих параметара на аеродинамичку буку.

Поглавље 8 – *Закључак* пружа завршну оцјену истраживања, са резимеом постигнутих резултата и приједлозима за будућа истраживања у овом домену.

2. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ АЕРОДИНАМИЧКЕ БУКЕ

Аероакустика је грана науке која се бави изучавањем простирања акустичких таласа или буке настале интеракцијом турбулентног струјања флуида или аеродинамичких сила са чврстим површинама. Аеродинамички звук је у великој мјери повезан са флуктуацијама притиска које се јављају далеко од извора чија је амплитуда мала, а ефекти стишљивости се не могу занемаривати. Једно од главних достигнућа у области аероакустике био је концепт акустичке аналогije производњи електричне енергије, који је предложио Лајтил [45].

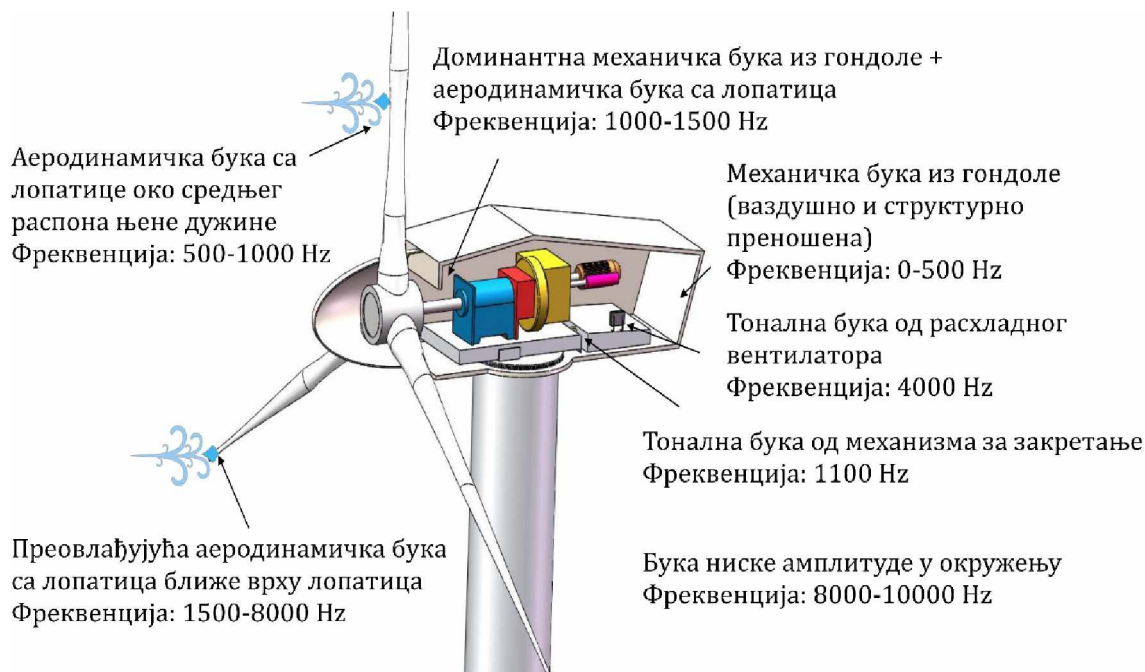
Аеродинамичка бука је врста звучног феномена који настаје релативним кретањем флуида и чврстих тијела, као што су: авиони, возила, вентилатори, турбине или било који други објекти који се крећу кроз гасове или течности. Ова врста буке је резултат интеракције између флуида и опструјаваних тијела. Постоје различити механизми настанка аеродинамичке буке, који се могу објаснити на основу принципа механике флуида и акустике.

Једначине одржања масе, количине кретања и енергије се генерално користе за описивање струјања и размјене топлоте код флуида. Лајтилова акустичка аналогija [45] добијена је из основних једначина закона о одржању и њихових модификација. Ова једначина је направила спој између ширења акустичког таласа и струјања флуида, показујући да вискозни, нелинеарни ефекти у струјању дјелују као извор буке. Све теорије у овој области настале касније засноване су на приступу сличном Лајтиловој акустичкој аналогiji.

2.1. Типови буке у аеродинамици

Бука која настаје из вјетротурбина (слика 2.1) углавном се може подијелити на двије врсте: механичку и аеродинамичку. Механичка бука

настаје из различитих компоненти машина у вјетротурбинама и има тоналну компоненту звука. Аеродинамичка бука настаје услед струјања ваздуха око лопатица који је на различите начине у интеракцији са површином лопатица. Извор аеродинамичке буке је турбуленција изазвана опструјавањем ваздуха око врха лопатице и њених предњих и задњих ивица.



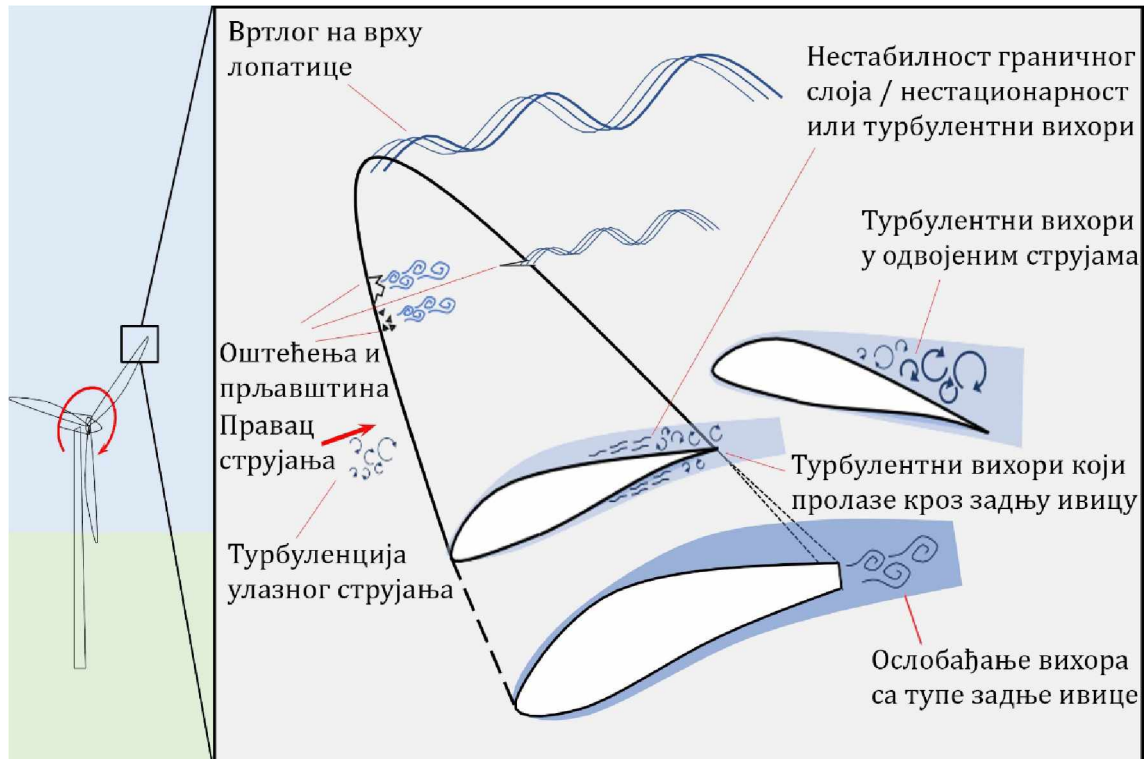
Слика 2.1. Врсте буке код вјетротурбина [46]

Механичку буку у вјетротурбинама стварају разне покретне компоненте као што су мјењач, генератор, вентилатори за хлађење и други помоћни уређаји. Механички шум је тоналног карактера, што значи да бука која настаје из механичких извора достиже одређене фреквенције и оштрија је за људска чула од шума који долази од широкопојасних фреквенција.

2.2. Бука изазвана турбулентним струјањем

Бука изазвана турбулентним струјањем (слика 2.2) је чешћи тип аеродинамичке буке. Јавља се услед хаотичног кретања флуида око тијела. Турбуленција настаје кад струјнице губе ламинарни облик и почињу да се

крећу хаотично. Прелаз са ламинарног на турбулентно кретање ствара флукутације у струји ваздуха што доводи до буке кроз неколико механизма, као што су генерисање вртлога и флукутације притиска.



Слика 2.2. Извори аеродинамичке буке око лопатице вјетротурбине услед турбулентног струјања вјетра [47,48]

Турбулентно струјање је врло често праћено формирањем вртлога око тијела и његовим одвајањем. Ови вртлози су извор осцилација притиска што доводи до емитовања звучног таласа. Како флуид осцилује око тијела у турбулентном режиму, брзине и притисци се брзо мијењају. Те промјене изазивају стварање звука. Примјери турбулентне буке су: вјетроелектране, возила у покрету и крила авиона.

Фактори који утичу на буку изазвану турбулентним струјањем су: брзина струјања флуида, облик и величина објекта. Како се брзина флуида повећава, турбуленција постаје интензивнија, односно интензитет буке расте са

повећањем брзине струјања флуида. Облик и величина тијела значајно утичу на ниво буке. Што је тијело веће и неправилнијег облика, са оштрим ивицама, то ће да генерише више турбулентне буке.

2.3. Бука усљед структурних вибрација

Бука усљед структурних вибрација настаје када се осцилације и вибрације структуре преносе у околни флуид, што узрокује емисију звучних таласа. Ова врста буке се јавља као резултат механичких осцилација или деформација конструкција усљед дјеловања аеродинамичких сила или других спољашњих утицаја. Структурне вибрације могу бити генерисане директним физичким контактом, динамичким силама које дјелују на тијело или резонантним појавама унутар саме структуре.

Механичке вибрације настају када сила дјелује на структуру, као што су крила авиона, дјелови аутомобила или турбомашине. Вибрације се преносе кроз конструкцију и емитују као звук у околни ваздух. Када флуид опструјава површину тијела, аеродинамичке силе могу да изазову флукуације притиска које доводе до осцилација самог тијела. Ове осцилације могу резултирати механичким вибрацијама које генеришу буку. Када се фреквенција спољашњих сила поклапа са природном фреквенцијом вибрације структуре, долази до резонанције. Тада вибрације могу значајно да се појачају, што доводи до веће буке. Фактори који утичу на буку усљед структурних вибрација су: крутост, врста материјала, механичко и аеродинамичко оптерећење, као и природна фреквенција конструкције.

Бука која настаје као посљедица структурних вибрација може се класификовати на следеће врсте:

- радијативна бука,
- индуцирана бука и
- земљотресна бука.

Код радијативне буке вибрације се преносе кроз конструкцију и емитују у околни ваздух као звучни таласи. Ова врста буке често има средњи до високи фреквентни опсег.

Вибрације лопатица могу узроковати осциловање других дјелова турбине, попут кућишта генератора, што доводи до секундарне емисије буке, која је познатија као индуцирана бука.

Поред тога, вибрације могу продирати кроз темељ вјетротурбине и земљиште изазивајући нискофреквентну буку која може бити примијећена на значајној удаљености од саме турбине. Ова бука, звана земљотресна, често је испод прага чујности, али може имати физиолошке ефекте на људе и животиње.

За смањење буке настале усљед структурних вибрација, примјењују се различите стратегије, укључујући:

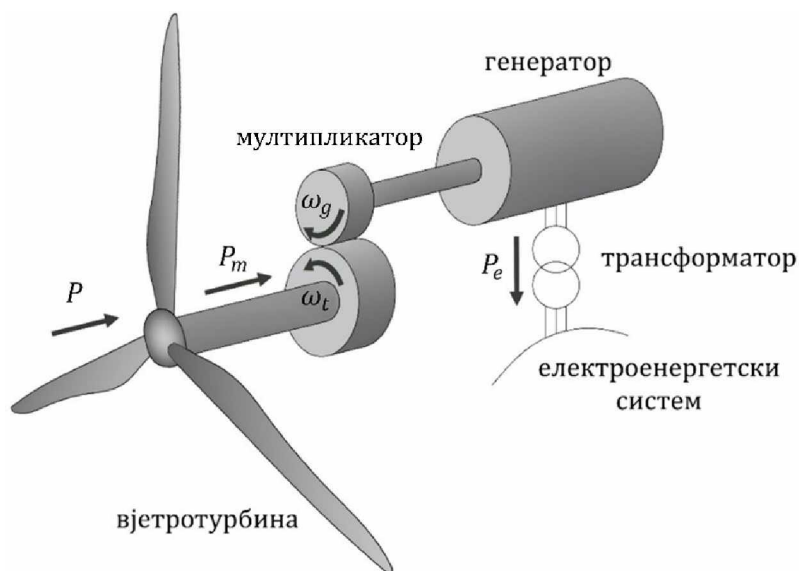
- Оптимизација дизајна лопатица (савремене вјетротурбине користе аеродинамички оптимизоване лопатице које смањују вибрације, док коришћење материјала који апсорбују вибрације може значајно допринијети смањењу буке);
- Коришћење пригушивача вибрација (инсталирање специјалних амортизера на критичним тачкама може значајно умањити пренос вибрација кроз конструкцију);
- Унапређење темељних система (коришћење еластичних подлога, бетонских маса и других техника за побољшање стабилности конструкције смањује пренос вибрација на околину);
- Мониторинг и одржавање (савремени системи надзора могу у реалном времену откривати пораст вибрација и указати на могуће кварове, што омогућава благовремене интервенције и спречавање ескалације проблема).

Структурне вибрације и бука коју оне узрокују могу имати значајан утицај на животну средину. Због свега наведеног, приликом планирања локација за изградњу вјетротурбина морају се узети у обзир фактори као што су удаљеност од насељених подручја, врста подлоге, локална флора и фауна, као и могућности примјене технологија за смањење буке.

3. ПРИНЦИП РАДА И СТРУКТУРА ВЈЕТРОТУРБИНА

3.1. Принцип рада вјетротурбина

Вјетротурбине су уређаји који претварају кинетичку енергију вјетра у електричну (слика 3.1), у складу са основним законима механике флуида. Први корак је искориштавање кинетичке енергије кретања ваздушне масе. Вјетар настаје услед разлика у атмосферском притиску, а оне су посљедица неједнаког загријавања земљине површине. Брзина и густина ваздуха имају директан утицај на количину енергије коју вјетротурбина може да трансформише.



Слика 3.1. Схема претварања енергије вјетра у електричну енергију [49]

Лопатице ротора вјетротурбине играју кључну улогу у узимању енергије вјетра. Облик лопатица је сличан крилу авиона, што омогућава стварање силе узгона када ваздух струји преко њих. Момент силе узгона окреће ротор турбине. Када се лопатице ротора окрену под дејством вјетра, механичка енергија се преноси на вратило које је повезано с генератором. Генератор

функционише према принципу електромагнетне индукције, гдје ротација магнета или намотаја унутар генератора индукује електричну струју. У модерним вјетротурбинама често се користе мултипликатори који омогућавају да се споро окретање лопатица претвори у веће брзине ротације генератора. Генератори могу бити синхрони или асинхрони, зависно од врсте коришћеног система. Произведена електрична енергија из вјетротурбине мора се прилагодити за употребу у електроенергетској мрежи. За то се користе трансформатори који повећавају напон индуковане струје. Енергија се затим преноси кроз далеководе до потрошача или се складишти у батеријама у случају изолованих мрежа.

3.2. Структура и дизајн вјетротурбина

Структура и дизајн су главни фактори који утичу на функционалност, отпорност и оптимално искориштење енергије вјетротурбина. Оне се према дизајну дијеле на хоризонталне и вертикалне.

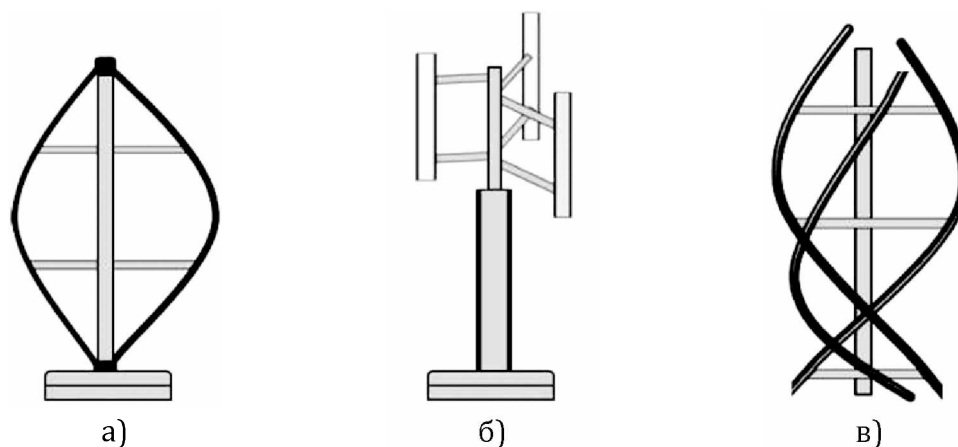
Вјетротурбине са хоризонталном осом обртања (*Horizontal Axis Wind Turbines* – HAWT) су најчешће коришћен тип вјетротурбина и имају ротор који се окреће око хоризонталне осе, паралелне са земљом (слика 3.2).



Слика 3.2. Вјетротурбина са хоризонталном осом обртања [50]

Овај тип турбина је ефикаснији за велике инсталације због могућности да „захвати“ већу количину енергије. Постављају се на високим торњевима ради што бољег искориштења јаким вјетрова. Оне користе систем за контролу правца како би се ротирале према најјачим вјетровима.

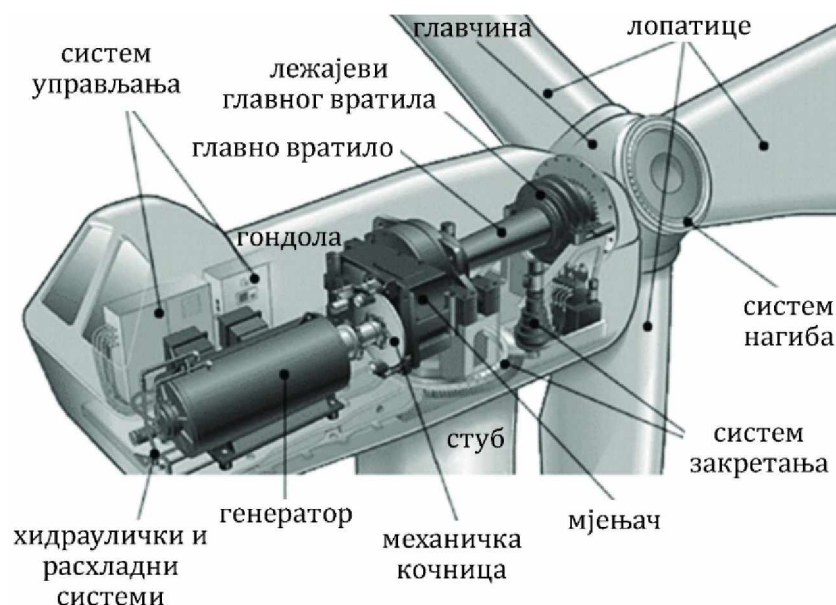
Вјетротурбине са вертикалном осом обртања (*Vertical Axis Wind Turbines* – VAWT) имају ротор који се обрће око вертикалне осе (слика 3.3). Овај тип турбина је погодан за мање инсталације првенствено због комбинације својих карактеристика као што су рад при малим брзинама вјетра, једноставна конструкција, економичност. Њихова ефикасност је генерално нижа од турбина са хоризонталном осом обртања. Постоји неколико различитих типова ове вјетротурбине као што су D, H и спирални тип.



Слика 3.3. Вјетротурбина са вертикалном осом обртања:

а) D тип; б) H тип; в) спирални тип [51]

Главне компоненте вјетротурбина су ротор и лопатице, гондола, вратило, мултипликатор, генератор, торањ, системи за контролу и управљање (слика 3.4). Ротор је дио вјетротурбине који се окреће под дејством вјетра и који садржи лопатице. Величина ротора директно утиче на количину произведене енергије. Лопатице су најзначајнији дио ротора, јер управо оне претварају кинетичку у механичку енергију. Имају аеродинамички облик тако да се минимизује отпор како би се добила максимална сила узгона.



Слика 3.4. Главне компоненте вјетротурбине [52]

Вратило повезује ротор са генератором и преноси механичку енергију лопатица. Вратило може бити спороокретно код већих турбина и брзоокретно код мањих система. Спороокретно вратило је обично директно повезано са ротором који се окреће брзином 10–20 обртаја у минути.

Мултипликатор је преносник снаге који повећава брзину ротације вратила генератора како би се добила фреквенција прилагођена електроенергетском систему.

Генератор претвара механичку енергију у електричну; најчешће се користе синхрони или асинхрони генератори који раде на принципу електромагнетне индукције. Магнети или намотаји унутар генератора ротирају у магнетном пољу стварајући електричну струју.

Гондола је кућиште које садржи све кључне механичке компоненте вјетротурбине, укључујући мултипликатор, генератор и контролни систем. Налази се на врху стуба и омогућава заштиту и одржавање компоненти. Гондола се закреће око вертикалне осе како би усмјерила ротор према вјетру,

захваљујући систему за контролу правца. Торањ држи турбину на висини како би „ухватила“ снажније и конзистентније вјетрове. Изграђен је од челика или бетона.

Контролни системи регулишу рад вјетротурбине, прилагођавају угао лопатица и контролишу брзину ротације како би оптимизовали производњу енергије.

Трансформатори и каблови прилагођавају напон и повезују турбину са мрежом.

3.3. Снага вјетротурбине

Снагу вјетра добијамо као први извод енергије по времену, посматрајући брзину као константну:

$$P = \frac{dE_k}{dt}, \quad (3.1)$$

гдје P [W] представља снагу, E_k [J] кинетичку енергију, а t [s] вријеме:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}, \quad (3.2)$$

гдје је m [kg] маса ваздуха, а v [m/s] брзина вјетра.

Уврштавајући израз (3.2) у израз (3.1) добија се:

$$P = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} v^2 = \frac{1}{2} \rho A v^3, \quad (3.3)$$

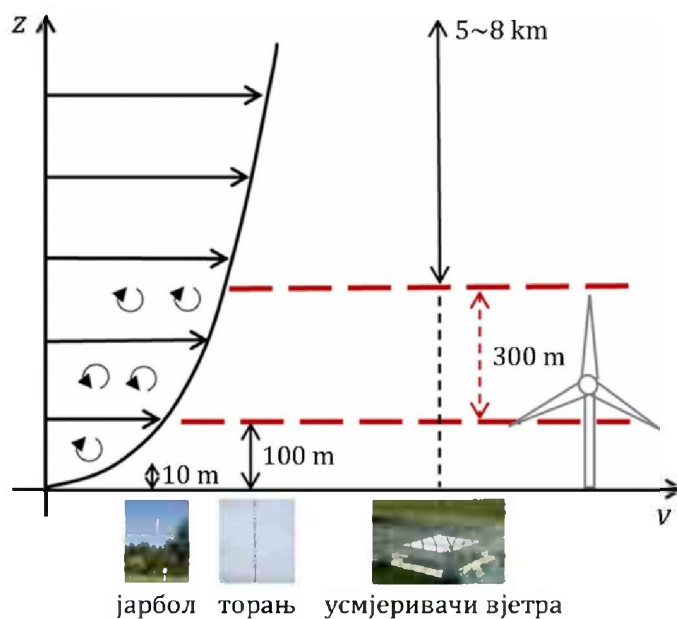
гдје је dm/dt [kg/s] масени проток ваздуха, ρ [kg/m³] густина ваздуха, а A [m²] површина ротора.

Површина ротора, односно површина на коју дјелује вјетар, у највећој мјери зависи од величине лопатица. Густина ваздуха је функција температуре и притиска, па се мијења пропорционално с притиском при константној температури.

Брзина је најзначајнији фактор који утиче на снагу вјетротурбине, што значи да мала промјена брзине може довести до знатног смањења или повећања произведене енергије. На профил брзине вјетра у првих неколико стотина метара изнад површине тла утиче трење између ваздуха који струји и површине преко које струји:

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{z}{z_0}\right)^\alpha, \quad (3.4)$$

гдје су z [m] и z_0 [m] висине, а α коефицијент трења који зависи од врсте тла преко којег вјетар дува (слика 3.5).



Слика 3.5. Зависност брзине вјетра од висине [53]

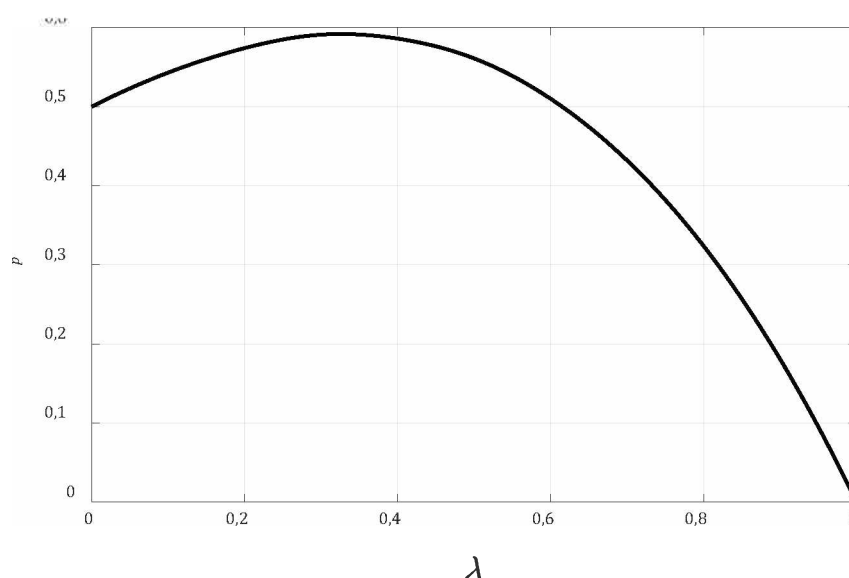
Основна формула за израчунавање снаге вјетротурбине гласи:

$$P_t = \frac{1}{2} \rho A v^3 c_p, \quad (3.5)$$

гдје c_p представља коефицијент снаге, односно ефикасност турбине.

Зависност коефицијента снаге c_p од коефицијента рада λ израчунао је Беџ 1926. године (слика 3.6). Уочљиво је да максимална количина енергије

коју може претворити било која вјетротурбина износи 59,3%. То значи да није могуће претворити сву енергију вјетра у електричну енергију. У пракси се коефицијент снаге, односно ефикасност турбине, креће од 35% до 45%. Ова ефикасност је ипак довољна да вјетротурбине буду изузетно корисне за производњу електричне енергије из обновљивих извора, посебно када се постављају у регионима са константним и снажним вјетровима, као што су приобалне области и висоравни.



Слика 3.6. Бецов коефицијент [54]

3.4. Ресурс вјетра и његова временска и просторна варијабилност

Вјетар је динамичан ресурс чија снага варира у времену и простору. Брзина и правац вјетра зависе од метеоролошких услова, локалне топографије, сезонских промјена и дневних осцилација. Постоје три кључна аспекта који утичу на потенцијал коришћења вјетра за производњу електричне енергије:

- географска локација (обалске регије, висоравни и подручја са сталним струјањем ваздуха имају највећи потенцијал за експлоатацију енергије вјетра);

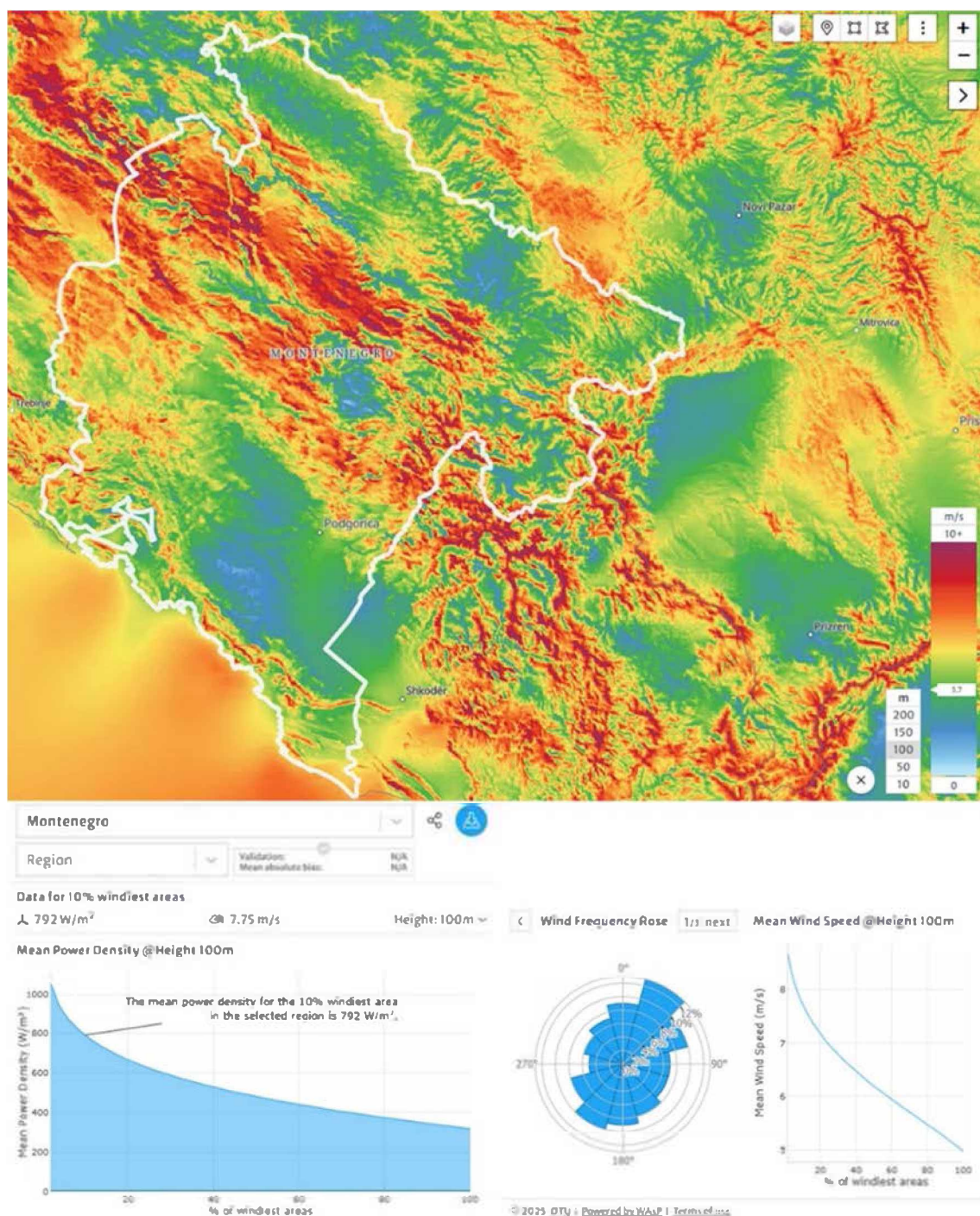
- временске промјене (сезонске и дневне варијације утичу на стабилност производње електричне енергије);
- висина турбине (брзина вјетра расте са висином због смањеног утицаја терена и препрека на површини земље);
- локални фактори (природне и урбане препреке попут брда, шума и зграда могу значајно утицати на брзину и правац вјетра).

3.4.1. Вјетропотенцијал у Црној Гори

Према подацима са *Global Wind Atlas*, Црна Гора има значајан потенцијал за искоришћење енергије вјетра. Географске и климатске карактеристике земље омогућавају стварање повољних услова за развој вјетроенергетике, посебно у приобалним подручјима и планинским регионима. Ова подручја имају константне и довољно јаке вјетрове, што је кључни фактор за економски исплативу производњу електричне енергије.

Слика 3.7. приказује расподјелу брзина вјетра у различитим регионима Црне Горе, према подацима *Global Wind Atlas*. Највећи потенцијал за вјетроенергију у Црној Гори налази се у планинским предјелима, гдје је просјечна брзина вјетра између 6 и 8 m/s. Овакве брзине су довољне за ефикасан рад вјетротурбина, што чини ове локације погодним за развој вјетропаркова. Једно од најперспективнијих мјеста је подручје Крнова, које је већ препознато као одлична локација за производњу електричне енергије помоћу вјетра. Уз Крново, дуж Јадранске обале постоје повољни услови за експлоатацију вјетроенергије, што је резултирало изградњом првих вјетропаркова у овим регионима.

Вјетропарк Крново, као први велики вјетропарк у Црној Гори, изграђен је управо на једном од подручја са највећим потенцијалом за искоришћење вјетроенергије. Са инсталисаним капацитетом од 72 MW, овај вјетропарк значајно доприноси укупној производњи електричне енергије у земљи.



Слика 3.7. Расподјела брзине вјетра у различитим регионима Црне Горе

Поред Крнова, Вјетропарк Можура представља примјер искоришћавања повољних вјетрова у приобалном дијелу Црне Горе. Наведени пројекти

доказују да постоји простор за даљи развој овог сектора, а улагања у вјетроенергетику се континуирано повећавају.

Развој вјетроенергетике у Црној Гори доноси више предности. Првенствено, омогућава смањење зависности од фосилних горива и увоза електричне енергије. Такође, смањује емисију угљен-диоксида, што је у складу са стратегијама одрживог развоја и заштите животне средине. Уз то, нуди нове могућности за инвеститоре, а тиме и отварање радних мјеста у енергетском сектору.

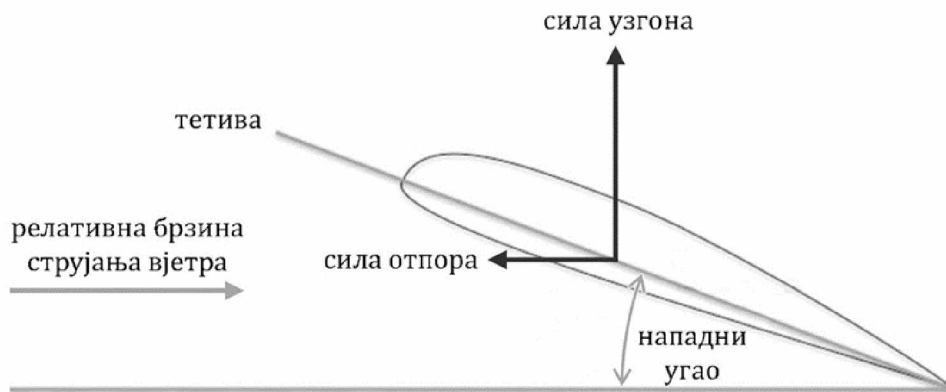
Иако су постојећи капацитети већ значајни, постоји простор за њихово проширење. Будући пројекти ће се фокусирати на повећање укупног капацитета обновљивих извора енергије, како би Црна Гора могла у већој мјери да искористи свој природни потенцијал. Подаци *Global Wind Atlas*-а илуструју да су одређене регије посебно погодне за изградњу додатних вјетропаркова, што ће допринијети унапређењу енергетске сигурности земље и њеној интеграцији у одрживи енергетски систем Европе.

4. АЕРОДИНАМИКА ЛОПАТИЦА ВЈЕТРОТУРБИНА

Аеродинамика вјетротурбина је комплексна наука која узима у обзир бројне физичке факторе, укључујући струју ваздуха, аеродинамичке силе, дизајн лопатица и брзину вјетра. Њено разумијевање је кључно за ефикасно пројектовање турбина које ће моћи да максимално искористе енергију вјетра.

4.1. Аеродинамичке силе на лопатицама вјетротурбине

Аеродинамичке силе на лопатицама вјетротурбина су резултат интеракције између струје ваздуха и облика лопатице и директно утичу на производњу електричне енергије. Основне аеродинамичке силе су силе отпора и узгона (слика 4.1).



Слика 4.1. Сила отпора и узгона аеропрофила вјетротурбине [55]

Сила отпора (*Drag Force*) D дјелује паралелно и у супротном смјеру од струјања ваздуха. Она је резултат трења између ваздуха и површине лопатице, као и турбуленција које настају у струји ваздуха око лопатице. Смањује ефикасност турбине јер спречава кретање лопатице у жељеном смјеру.

Сила узгона (*Lift Force*) L дјелује нормално на правац кретања ваздуха. Она се јавља услед разлике у брзини ваздуха који струји преко горње и доње

површине лопатице. Према Бернулијевом принципу, ваздух на горњој површини струји брже, што ствара зону нижег притиска у односу на доњу страну, гдје је ваздух спорији. Ова разлика у притисцима ствара узгон који вуче лопатицу према горе.

4.2. Коефицијенти отпора и узгона

Коефицијенти отпора C_D и узгона C_L представљају бездимензионе параметре који описују аеродинамичке перформансе тијела у флуиду, а добијају се из сљедећих израза:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho A v^2}, \quad (4.1)$$

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho A v^2}, \quad (4.2)$$

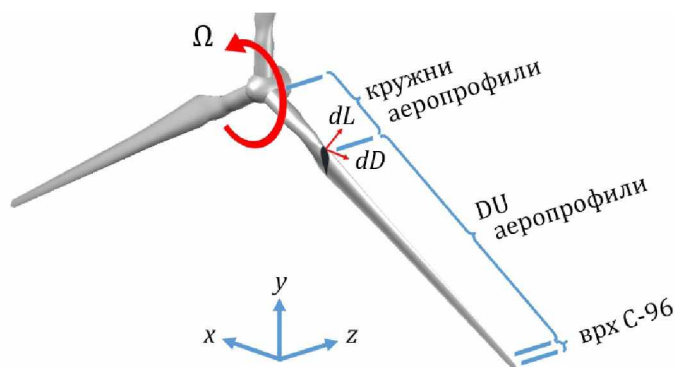
гдје је D [N] сила отпора, а L [N] сила узгона.

Облик лопатице, познат као аеродинамички профил, игра кључну улогу у одређивању ових коефицијената. Лопатице са заобљеним предњим ивицама и танким задњим ивицама, попут профила НАСА серија, често имају високе вриједности коефицијента узгона, а ниске вриједности коефицијента отпора. Насупрот томе, тупи или квадратни профили показују веће вриједности коефицијента отпора усљед појаве турбулентног отцјепљења и нестабилнијег струјања.

4.3. Геометријски модели лопатица

Лопатица вјетротурбине која је предмет истраживања ове дисертације је дужине 48 m. Подијељена је на 47 различитих аеропрофила, који се сврставају у три главне групе према функцији и положају дуж распона (слика 4.2). Првих шест аеропрофила, почевши од центра ротације, имају кружни облик. Ови дјелови чине коријен лопатице и служе за прелазак са цилиндричне главчине

на аеродинамичке облике. Таква конфигурација смањује структурна напрезања и омогућава равномјерну расподјелу оптерећења од лопатице до вратила турбине. Иако не доприносе значајно стварању узгона, кључни су за очување структурне чврстоће.



Слика 4.2. Схема геометрије лопатице са силама које дјелују на њу

Средњи дио лопатице обухвата 35 аеропрфила и чини око 80% укупне дужине лопатице. Углавном се састоји од DU (*Delft University*) аеропрфила, који су оптимизовани за високу аеродинамичку ефикасност. Они обезбјеђују одличан однос узгона и отпора, омогућавајући максимално искоришћење енергије вјетра. Постепено увијање и промјенљива геометрија ових профила омогућавају ефикасно управљање нападним углом, побољшавајући укупну производњу енергије и смањујући одвајање граничног слоја.

Посљедњих шест аеропрфила чине врх лопатице C-96, специјално дизајниран за смањење губитака енергије и побољшање аеродинамичке ефикасности. Његова конусна и уврнута геометрија минимизује вртлоге, смањује отпор и умањује емисију буке. Овај дизајн такође побољшава перформансе у реалним условима, гдје вјетар често мијења смјер. Међутим, тетиве аеропрфила на самом врху лопатице су и до 50 пута мање у односу на остале аеропрфиле. Ова значајна разлика у димензијама представља изазов при генерисању прорачунске мреже, захтијевајући посебну пажњу у моделовању како би се очувала тачност симулације.

5. МЕТОДЕ ИСТРАЖИВАЊА

У овом поглављу је представљен теоријски и експериментални оквир коришћен за анализу аеродинамичких и акустичких својстава вјетротурбина. Истраживање је спроведено путем комбинованог приступа који укључује математичке моделе, нумеричке симулације и експерименталне податке, с циљем да се дубље разумију динамичке карактеристике турбина, као и бука која се генерише током њиховог рада.

5.1. Експериментални подаци

За детаљну анализу буке коју генерише вјетротурбина, неопходно је ослонити се на експериментално прикупљене податке који омогућавају квантификацију њених акустичких карактеристика. У овом поглављу представљени су подаци добијени кроз теренска мјерења, као и методологија примијењена током прикупљања и обраде информација о звучним емисијама турбине.

Ова мјерења су урађена као дио ширег истраживања под називом „*Wind turbine generated sound: Targeted research to improve measurement, analysis, and annoyance thresholds based on measured human response*“ представљеног у [56]. Основни циљ анализе је био да се карактеришу акустичке особине буке коју емитују вјетротурбине, користећи се свеобухватним подацима прикупљеним током јуна 2012. године на локацији EOLOS Универзитета у Минесоти. Податке је обезбиједио Истраживачки центар *United Technologies* (UTRC). Истраживање је усмјерено ка идентификацији и квантитативној анализи различитих параметара буке турбине, укључујући укупне нивое звучног притиска, у зависности од услова вјетра, просторне расподјеле буке, фреквенцијског спектра, као и варијација амплитуде. Посебан значај ове

анализе је у томе што она доприноси бољем разумијевању људске перцепције буке вјетротурбина, што је од суштинског значаја за дефинисање регулатива које се односе на дозвољене нивое буке у урбаним и руралним подручјима. Сprovedена мјерења обухватају сигнале са 36 микрофона, податке о брзини и смјеру вјетра добијене са сусједног метеоролошког торња, као и оперативне параметре саме турбине, укључујући брзину ротора и угао нагиба лопатица.

Међутим, треба имати у виду одређена ограничења овог скупа података. Наиме, сва мјерења су извршена на удаљености од 100 m у односу на турбину, што значи да анализа обухвата углавном блиско звучно поље и не омогућава прецизно испитивање ширења буке на већим удаљеностима. Поред тога, мјерења су вршена искључиво током дневних сати, када је градијент брзине вјетра мањи, што може утицати на добијене резултате у контексту ноћне буке.

Циљ мјерења био је да се утврди усмјереност буке, утицај брзине вјетра на ниво звука, као и присуство инфразвука и модулације амплитуде. Посебна пажња посвећена је корелацији буке са радним режимом турбине, како би се издвојили различити извори звучног загађења.

5.2. Методе мјерења аеродинамичке буке

Скуп података обухвата резултате мјерења добијене помоћу усмјерене мреже од 36 микрофона, као и три инфразвучна микрофона, неколико акцелерометара и додатних микрофона (слика 5.1). Поред тога, прикупљене су и допунске информације, укључујући брзину и смјер вјетра на висини од 10 m, као и податке са сензора који указује на положај ротора (тахометар).

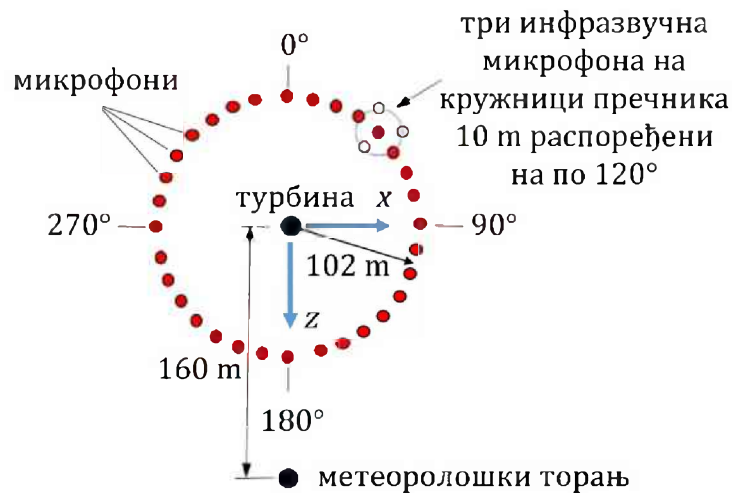
Мјерења су спроведена у периоду од 7. до 19. јуна 2012. године, при различитим брзинама и правцима вјетра, а обухватала су три сценарија:

- рад вјетротурбине у стандардним условима;
- мјерење позадинске буке док је турбина била искључена;

- испитивање утицаја рада вентилатора за хлађење гондоле, при њиховом укључивању и искључивању.



а)



б)

Слика 5.1. Локација EOLOS станице за мјерење буке 2012. године:

а) вјетротурбина, б) мапа распореда инструмената [56]

Ови подаци, заједно са SCADA системским записима турбине и мјерењима са метеоролошког торња, представљају драгоцен извор информација за детаљну анализу акустичких карактеристика буке коју производе вјетротурбине.

Систем за прикупљање података обухватао је више типова сензора и инструмената распоређених на различитим позицијама у и око вјетротурбине:

- 36 микрофона B&K 4958, распоређених под углом од 10° један у односу на други, дуж кружне путање полупречника 102 m око стуба турбине. Сигнал са сваког микрофона је прије складиштења обрађен филтером високих фреквенција од 22 Hz.
- Три инфразвучна сензора (B&K Типе 4193, фреквенцијски опсег од 0,07 Hz до 20 kHz), постављена на кругу пречника 10 m око

микрофона на позицији 60° (видјети слику 5.1). Сигнал са ових сензора је прије складиштења прошао филтер високих фреквенција од 0,1 Hz.

- 11 додатних микрофона, постављених у различитим тачкама унутар гондоле и система за хлађење на постољу турбине.
- 21 акцелерометарски канал, распоређен у различитим дјеловима гондоле, стуба и постоља турбине.

Подаци су прикупљени током осам дана у периоду од 7. до 19. јуна 2012. године. Преглед прикупљених података дат је у табели 5.1, док је детаљан списак сензора и мјерних канала представљен у Прилогу I.

За потребе анализе коришћене су стандардне акустичке мјерне јединице, укључујући укупни ниво звучног притиска (SPL), октавне и једнотрећинске анализе фреквенцијског спектра, као и процјене инфразвучних компоненти. Методологија анализе заснована је на:

- анализи спектралних компоненти буке – испитивање доминантних фреквенција и њихове зависности од услова вјетра;
- процјени усмјерености буке – одређивање у којим смјеровима турбина емитује највише енергије;
- модулацији амплитуде (AM) – испитивање варијација звучног притиска у складу са проласком лопатица кроз ваздушни ток;
- корелацији буке са условима вјетра и радним параметрима турбине – како промјене брзине и смјера вјетра утичу на нивое буке.

Анализа укупне буке показала је да ниво звучног притиска варира у зависности од брзине вјетра и нападног угла ваздушне струје. Октавна анализа открила је да је највећи дио енергије концентрисан у ниским и средњим фреквенцијским опсезима, с тим што се са порастом брзине вјетра јављају повећани нивои буке у вишим фреквенцијским опсезима. [57]

Табела 5.1. Преглед прикупљених података [57]

Датум	Добијени подаци	Број 5-мин. фајлова	Приближна брзина вјетра на 10 m
7.6.2012.	Вентилатор за хлађење глондоле	20	3 – 7,5 m/s
	Вентилатор за хлађење гондоле искљ.	23	
	Вентилатор за хлађење гондоле укљ.	9	
	Нормалан рад	7	
8.6.2012.	Позадински шум	4	3,5 – 7,5 m/s
	Нормалан рад	20	
10.6.2012.	Нормалан рад	23	7 – 15 m/s
	Позадински шум	17	
	Нормалан рад	36	
	Позадински шум	7	
11.6.2012.	Позадински шум	9	6 – 13 m/s
	Нормалан рад	29	
	Позадински шум	13	
	Нормалан рад	36	
12.6.2012.	Вентилатор за хлађење гондоле искљ.	13	4 – 8 m/s
	Нормалан рад	39	
	Позадински шум	15	
15.6.2012.	Само вентилатор за хлађење гондоле	56	0
	Усмјеравање	1	
	Тест звучника	26	
18.6.2012.	Нормалан рад	23	0
19.6.2012.	Нормалан рад	14	6 – 13 m/s
	Позадина са вентилаторима	13	
	Нормалан рад	9	
	Позадина са вентилаторима	17	
	Нормалан рад	9	
	Позадина са вентилаторима	7	
	Нормалан рад	15	

Резултати су показали да је бука најизраженија у узвјетру и низвјетру, док су бочни смјерови мање изложени. Осим тога, уочено је да је ниво буке

знатно већи када је турбина у раду у односу на позадинску буку околине. Резултати добијени овим мјерењима усклађени су са претходно објављеним истраживањима, попут [24]. [57]

5.3. Математички модел

Математичко полазиште чине три основна закона: закон одржања масе (једначина континуитета), закон промјене количине кретања и закон о одржању енергије (енергијска једначина).

Укупна промјена неке величине Φ нестационарне и нехомогене непрекидне средине, у општем облику, може бити представљена Рејнолдсовом једначином преноса.

Узимајући да је $\Phi = 1$, из транспортне једначине слиједи једначина континуитета:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0, \quad (5.1)$$

односно:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + u_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} = 0, \quad (5.2)$$

гдје је x_i [m] просторна координата, а u_i [m/s] пројекција брзине.

Узимајући да је $\Phi = v(u_i, u_j)$, из транспортне једначине слиједи једначина промјене количине кретања:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i}, \quad (5.3)$$

односно:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + u_i \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} = 0, \quad (5.4)$$

гдје је p [Pa] притисак.

Уврштавањем израза (5.2) у релацију (5.4) добија се:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} = 0. \quad (5.5)$$

Једначина одржања енергије, добијена за $\Phi = U$, има облик:

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U u_i)}{\partial x_i} = -p \frac{\partial u_i}{\partial x_i}, \quad (5.6)$$

гдје је U [J] унутрашња енергија.

За идеалан гас важи:

$$U = C_v \cdot T, \quad (5.7)$$

$$p = \rho R T \Rightarrow T = \frac{1}{R} \frac{p}{\rho}, \quad (5.8)$$

$$\left. \begin{aligned} \kappa &= \frac{C_p}{C_v} \\ R &= C_p - C_v \end{aligned} \right\} \Rightarrow U = \frac{C_v}{R} \frac{p}{\rho} = \frac{1}{\kappa - 1} \frac{p}{\rho}, \quad (5.9)$$

гдје су: C_v [J/(kg · K)] и C_p [J/(kg · K)] топлотни капацитет при константној запремини, односно при константном притиску, T [°K] температура, R [J/(kg · K)] специфична гасна константа и κ адијабатски коефицијент.

Уврштавајући једначину (5.9) у (5.6) добија се:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + \kappa p \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0. \quad (5.10)$$

Основне једначине су линеаризоване увођењем промјенљивих које одговарају акустичким поремећајима:

$$p = \bar{p} + p', \quad \rho = \bar{\rho} + \rho', \quad u_i = \bar{u}_i + u_i', \quad (5.11)$$

гдје симбол „ $\bar{}$ “, означава осредњене вриједности, а симбол „ ' “ флукуацију.

Ако се једначина (5.11) уврсти у једначину (5.1) добија се:

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial \rho'}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u}_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial(\bar{\rho} u_i')}{\partial x_i} + \frac{\partial(\rho' \bar{u}_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial(\rho' u_i')}{\partial x_i} = 0. \quad (5.12)$$

У мирном флуиду важи:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho}\bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0. \quad (5.13)$$

Уврштавајући израз (5.13) у (5.12) и занемарујући производ флуктуација, добија се:

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \bar{\rho} \frac{\partial u'_i}{\partial x_i} + u'_i \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_i} + \rho' \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} + \bar{u}_i \frac{\partial \rho'}{\partial x_i} = 0. \quad (5.14)$$

Затим се линеаризоване Ојлерове једначине добијају замјеном израза (5.11) у једначину количине кретања (5.5):

$$\bar{\rho} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{\rho} \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_i} = 0. \quad (5.15)$$

Убацујући израз (5.15) у (5.5), добија се линеаризована једначина:

$$\bar{\rho} \frac{\partial u'_i}{\partial t} + \bar{\rho} \bar{u}_j \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \bar{\rho} u'_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \rho' \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \rho'}{\partial x_i} = 0. \quad (5.16)$$

За униформно струјање, изводи просјечних вриједности се могу занемарити, па изрази (5.14) и (5.16) постају:

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \bar{\rho} \frac{\partial u'_i}{\partial x_i} + \bar{u}_i \frac{\partial \rho'}{\partial x_i} = 0, \quad (5.17)$$

$$\bar{\rho} \frac{\partial u'_i}{\partial t} + \bar{\rho} \bar{u}_j \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \rho'}{\partial x_i} = 0. \quad (5.18)$$

Једначина акустичког таласа се добија из једначина (5.17) и (5.18). Први извод по времену једначине (5.17) има облик:

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} + \bar{\rho} \frac{\partial^2 u'_i}{\partial t \partial x_i} + \bar{u}_i \frac{\partial^2 \rho'}{\partial t \partial x_i} = 0, \quad (5.19)$$

а израза (5.18) облик:

$$\bar{\rho} \frac{\partial^2 u'_i}{\partial x_i \partial t} + \bar{\rho} \bar{u}_j \frac{\partial^2 u'_i}{\partial x_i \partial x_j} + \frac{\partial^2 \rho'}{\partial x_i^2} = 0. \quad (5.20)$$

Записујући други члан израза (5.20) као

$$\bar{u}_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{\rho} \frac{\partial u'_i}{\partial x_i} \right),$$

уврштавајући га у релацију (5.17) и потом одузимајући добијено од израза (5.19) добија се:

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} + 2\bar{u}_i \frac{\partial^2 \rho'}{\partial t \partial x_i} + \bar{u}_i \bar{u}_j \frac{\partial^2 \rho'}{\partial x_j \partial x_i} = \frac{\partial^2 p'}{\partial x_i^2}. \quad (5.21)$$

Зависност притиска од густине и ентропије дефинисана је релацијом:

$$p = p(\rho, s) \Rightarrow dp = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s d\rho + \left(\frac{\partial p}{\partial s} \right)_\rho ds, \quad (5.22)$$

гдје је s [J/K] ентропија.

За изентропски процес важи:

$$dp = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s d\rho \Rightarrow p' = c_0^2 \rho', \quad (5.23)$$

гдје је c_0 [m/s] брзина звука.

Уврштавајући израз (5.23) у (5.21) добија се :

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} + 2\bar{u}_i \frac{\partial^2 p'}{\partial t \partial x_i} + \bar{u}_i \bar{u}_j \frac{\partial^2 p'}{\partial x_i \partial x_j} = c_0^2 \frac{\partial^2 p'}{\partial x_i^2}. \quad (5.24)$$

Када су осредњене брзине занемарљиве, добија се класична таласна једначина:

$$\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} = c_0^2 \nabla^2 p'. \quad (5.25)$$

5.4. Рејнолдсови модели турбуленције

Рејнолдсови модели турбуленције су математички модели који се користе за приказивање, предвиђање и анализу турбулентних токова у флуидима. Турбуленција је непредвидиво, хаотично кретање флуида које је

тешко описати директним рјешењима Навије–Стоксових једначина због њихове нелинеарности. Да би се ово поједноставило, у Рејнолдсовим моделима турбуленције користи се приступ који уводи додатне нивое апроксимације и моделирања како би се добио практичан, али довољно тачан опис турбулентног тока.

Рејнолдсово декомпоновање је основна техника која се користи за претварање нелинеарних, турбулентних једначина у просјечне једначине за импулс. Овај приступ укључује раздвајање брзине флуида u на средњу (просјечну) и флукутирајућу компоненту:

$$u = \bar{u} + u'. \quad (5.26)$$

Захваљујући декомпоновању, једначине тока постају упросјечене. Ипак, и даље садрже непознате чланове који се односе на интеракцију између флукутација, познате као Рејнолдсови напони, који су изазов у моделирању турбуленције. Приказани чланови представљају учинак турбулентних флукутација на средњу брзину тока и често се моделирају помоћу различитих апроксимација. Математички, Рејнолдсови напони се дефинишу као:

$$\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j = \tau_{ij}, \quad (5.27)$$

гдје τ_{ij} [Pa] представља Рејнолдсов напон.

Да би се ријешио проблем Рејнолдсових напона, користе се различити модели турбуленције, међу којима су најпознатији:

- $k - \varepsilon$ модел,
- $k - \omega$ модел
- $k - \omega$ SST (*Shear Stress Transport*) модел и
- SST прелазни модел,

гдје су: k [m²/s²] турбулентна кинетичка енергија, ε [m²/s³] брзина дисипације енергије и ω [1/s] специфична брзина дисипације.

У $k - \varepsilon$ моделу, користе се двије транспортне једначине, једна за турбулентну кинетичку енергију k и једна за дисипацију турбулентне кинетичке енергије ε . Ово је један од најкоришћенијих турбулентних Рејнолдсових модела, јер даје задовољавајуће резултате за одређену врсту струјних проблема.

Модел $k - \omega$ користи двије транспортне једначине, једну за турбулентну кинетичку енергију k и једну за специфичну брзину дисипације ω , која представља брзину дисипације турбулентне кинетичке енергије.

$k - \omega$ SST модел се широко примјењује у области компјутерске динамике флуида (CFD). Овај модел комбинује стандардни $k - \omega$ модел у близини зида и $k - \varepsilon$ модел у остатку прорачунског домена. Ефикасно предвиђа раздвајање струје у условима неповољних градијената притиска, нудећи прецизне резултате за различите инжењерске дисциплине, као што су ваздухопловство и аутомобилско инжењерство. Сљедеће једначине представљају формулацију SST $k - \omega$ модела турбуленције:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \mu_t S^2 - \rho \beta^* k \omega, \quad (5.28)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \frac{\beta^\#}{\nu_t} \mu_t S^2 - \rho \beta \omega^2 + D_\omega, \quad (5.29)$$

гдје су: μ [Pa · s] динамичка вискозност флуида, μ_t [Pa · s] турбулентна динамичка вискозност, S [s⁻¹] стопа деформације, β , β^* и $\beta^\#$ константе, σ_k турбулентни Прантдлов број за k , σ_ω турбулентни Прантдлов број за ω , $D_\omega(\omega, \partial k / \partial x_j, \partial \omega / \partial x_j)$ [kg/(m³ · s²)] унакрсна дифузија близу зидова и ν_t [m²/s] турбулентна кинематска вискозност.

Први, други и трећи сабирак са десне стране једначина односе се на процесе дифузије, продукције и дисипације двије моделиране величине. Четврти члан на десној страни друге једначине представља функцију која

омогућава прелаз са $k - \omega$ модела у близини зида на $k - \varepsilon$ модел у остатку прорачунског домена.

SST прелазни модел представља напредак у односу на стандардни SST модел, додајући могућност моделирања транзиције. Овај модел описује прелазак из ламинарног у турбулентно струјање, што је од велике важности за прецизно предвиђање понашања граничних слојева и почетка турбуленције. Укључивање прелазних ефеката значајно побољшава тачност предвиђања у струјањима који пролазе кроз ламинарно-турбулентне прелазне области, као што су оне које се јављају на лопатицама турбина, аеропрофилима и другим аеродинамичким површинама. Основни изрази који чине основу овог модела су:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho I) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho I v_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_I} \right) \frac{\partial I}{\partial x_j} \right) + P_I - E_I, \quad (5.30)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\tilde{R\epsilon}_{\theta t} \rho) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tilde{R\epsilon}_{\theta t} \rho v_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\sigma_{\theta t} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_I} \right) \frac{\partial \tilde{R\epsilon}_{\theta t}}{\partial x_j} \right) + P_{\theta t}, \quad (5.31)$$

гдје су: I фактор интермитентности, σ_I константа модела везана за дифузију интермитентности, $\tilde{R\epsilon}_{\theta t}$ Рејнолдсов број, $\sigma_{\theta t}$ константа модела која се односи на $\tilde{R\epsilon}_{\theta t}$, P_I [kg/(m³ · s)] и $P_{\theta t}$ [kg/(m³ · s)] продукциони чланови и E_I [kg/(m³ · s)] дисипациони члан.

5.5. Акустички модели

Акустички модели се користе за описивање и анализу звука и других акустичких појава у медијумима, као што су ваздух или вода. У овим моделима акценат је на анализи таласа који се преносе кроз флуид, било да су то звукови ниских или високих фреквенција, или акустички ефекти повезани са струјањем флуида.

Лајтилова акустичка аналогија (такође позната као Лајтилова теорија) је метод који се користи за анализу звукова произведених струјањем флуида,

као што су бука из авиона, турбина или други механизми који генеришу шум. Овај метод описује акустичке таласе као посљедицу турбулентних структуралних промјена у флуиду, које резултирају акустичким изворима који стварају звукове.

Лајтилова акустичка аналогија се заснива на приближном моделовању и разматрању акустичких ефеката који произилазе из флуидних токова у вези са њиховим турбулентним карактеристикама. Она повезује акустичке ефекте са изворима који стварају вртложне струје и поремећаје у флуиду.

Лајтилова акустичка аналогија даје израз за акустички извор као интегрални израз који зависи од турбулентних флуктуација:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \vec{w}) + f_{ac}(\vec{x}, t), \quad (5.32)$$

гдје је: $\vec{w}$ [m/s] локални брзински вектор флуида, а f_{ac} [Pa/s] акустички извор који произилази из турбулентних флуктуација.

Модел широкопојасног шума – BNS (*Broadband Noise Source*) је један од најчешће коришћених метода за предвиђање широкопојасног шума у аероакустичким примјенама. Овај модел је заснован на анализи турбулентних флуидних структура које доприносе стварању акустичког шума, посебно у случајевима као што су:

- аеродинамичка бука авиона (бука изазвана струјањем ваздуха око крила, флаперона и млазног тока),
- буке вентилатора и компресора (у турбомашинама и климатизационим системима),
- буке дронова, пропелера и лопатица (изазване турбулентним вихорима).

BNS модел се често заснива на Лајтиловој акустичкој аналогији, при чему се за анализу користе апроксимације на основу турбулентних параметара.

Основни облик једначине је:

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - c_0^2 \nabla^2 \rho' = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} [T_{ij}], \quad (5.33)$$

гдје је $[T_{ij}]$ [Pa] Лајтилов тензор.

BNS модел је моћан алат за предвиђање широкопојасног шума у аероакустичким системима. Он користи комбинацију CFD метода и полу-емпиријских модела за анализу турбулентних извора звука. Иако има ограничења, BNS методологија омогућава разумијевање и оптимизацију буке у различитим инжењерским примјенама.

FW-H метода је напреднији модел који се користи за анализу акустичких појава, посебно у индустријама гдје је бука критичан фактор (нпр. ваздухопловство, моторна индустрија, итд.). FW-H метода разматра динамику флуида и звукова између различитих нивоа турбулентности у одређеном појасу.

FW-H метода се користи да се добије детаљна предикција акустичких појава који су резултат турбулентних вихора и мијешања у току струјања. Овај модел нуди тачније резултате за акустичке процесе који произилазе из флуидних струјања, посебно када се ради о ниским и високим фреквенцијама буке.

FW-H једначина је основна једначина у аероакустици која описује ширење звука у ваздуху услед аеродинамичких извора. Она представља проширење Лајтилових једначина и користи се за предвиђање буке коју генеришу покретни аеродинамички извори.

Основна форма FW-H једначине је:

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - c_0^2 \nabla^2 \rho' = \frac{\partial}{\partial t} [\rho_0 u_i \delta(f)] - \frac{\partial}{\partial x_i} [P_{ij} n_j \delta(f)] + \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} [T_{ij} H(f)], \quad (5.34)$$

гдје су: P_{ij} [Pa] напонски тензор на површини извора, n_j јединични вектор нормале, $\delta(f)$ Диракова делта функција, која ограничава допринос површини извора, $H(f)$ Хевисајдова функција, која се користи за доприносе запреминских извора.

Ова једначина укључује три типа извора звука:

1. монополне изворе (запреминске промјене, први члан);
2. диполне изворе (површинске силе, други члан);
3. квадруполне изворе (турбулентне флуидне ефекте, трећи члан).

FW-H метода се користи у комбинацији са CFD симулацијама. Иако има одређена ограничења, њена употреба у комбинацији са CFD методама даје веома корисне резултате за инжењерску праксу.

Нумеричке методе имају кључну улогу у симулацијама које се користе за анализу и пројектовање сложених система. У овом истраживању представљене су двије значајне методе које се користе у анализи аеродинамичких перформанси и проучавању струјања: BEMT и CFD.

5.6. BEMT (*Blade Element Momentum Theory*) нумерички модел

Метода BEMT представља комбиновани приступ који интегрише теорију елемената лопатица и импулсну теорију. Овај модел користи се за предвиђање аеродинамичких перформанси ротора. Основни принцип је дијељење ротора на мале елементе дуж полупречника, гдје се сваки елемент анализира као независна компонента да би се одредиле силе узгона и отпора које дјелују на ту компоненту. За елемент лопатице у радијусу са дужином тетиве, силе узгона и отпора су дате као:

$$dL = \frac{1}{2} \rho v_r^2 c C_L dr, \quad (5.35)$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho v_r^2 c C_D dr, \quad (5.36)$$

гдје је v_r [m/s] релативна брзина на лопатици, c [m] дужина тетиве локалног сегмента, док C_L и C_D представљају коефицијенте узгона и отпора.

Релативна брзина садржи аксијалну и тангенцијалну компоненту:

$$v_r = \sqrt{(v(1-a))^2 + (\Omega r(1+a'))^2}, \quad (5.37)$$

гдје Ω [rad/s] представља угаону брзину, r [m] полупречник лопатице, а a и a' аксијални и тангенцијални фактор индукције.

Нападни угао је дат као разлика између угла струјања ϕ и нагибног угла лопатице θ , док се угао струјања ϕ може записати као:

$$\tan \phi = \frac{v(1-a)}{\Omega r(1+a')}. \quad (5.38)$$

Елементарни потисак dT и елементарни обртни момент dQ за елемент лопатице дати су релацијама:

$$dT = B \left[\frac{1}{2} \rho v_r^2 c (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) \right] dr, \quad (5.39)$$

$$dQ = B \left[\frac{1}{2} \rho v_r^2 c (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) \right] dr, \quad (5.40)$$

гдје је B број лопатица.

ВЕМТ је ефикасан и релативно брз метод који омогућава нумеричку симулацију ротирајућих уређаја. У комбинацији са експерименталним подацима, као што су аеродинамичке таблице, овај метод може дати веома прецизне резултате. Претпоставке које овај метод користи, као што је једнолико поље струјања, могу довести до грешака у сложеним условима. Такође, ВЕМТ се ослања на табеларне податке за коефицијенте узгона и отпора, што захтијева претходно познавање профила лопатице. Метод не узима у обзир нелинеарне феномене, као што су турбуленција, интензивно одвајање струјења или тродимензионални ефекти, што може ограничити његову примјену у неким сложенијим ситуацијама.

5.7. Метода коначних запремина (FVM)

Компјутерска механика флуида (CFD) представља дисциплину која користи рачунарске методе за анализу и симулацију кретања флуида, као и њихове интеракције са околином. CFD се заснива на примјени нумеричких метода и алгоритама за рјешавање диференцијалних једначина које описују кретање флуида. Основне једначине које се користе у CFD-у су:

- Навије–Стоксове једначине – описују закон одржања масе, момента и енергије у флуидима;
- једначине турбуленције – уколико је струјање турбулентно, користе се модели турбуленције као што су RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) или LES (*Large Eddy Simulation*);
- једначине граничних услова – постављање одговарајућих граничних услова је критично за тачност рјешења, као што су услови за зидове, улаз и излаз флуида.

Метода коначних запремина (FVM) је једна од најчешће коришћених нумеричких метода за рјешавање парцијалних диференцијалних једначина (PDE), посебно у области рачунарске динамике флуида. FVM се примјењује за дискретизацију и рјешавање основних једначина за струјање флуида и друге сличне појаве.

Основне једначине које се обично користе у динамици флуида укључују Навије–Стоксове једначине и енергијску једначину. Диференцијални облик једначине промјене количине кретања је претворен у интегрални облик преко контролне запремине дајући:

$$\int_V \frac{\partial(\rho \vec{w})}{\partial t} dV + \int_S \rho \vec{w} (\vec{w} \cdot \vec{n}) dS = - \int_S p \vec{n} dS + \int_S \vec{\tau} \cdot \vec{n} dS + \int_V \Phi dV, \quad (5.41)$$

гдје је $\vec{\tau}$ [Pa] тензор вискозних напона.

FVM метод дискретизује простор тако што дијели домен на контролне запремине. Интегралне једначине се примјењују за сваку запремину, чиме се добија систем алгебарских једначина. Главне фазе су:

- дефинисање контролних запремина – подјела домена на мале контролне запремине;
- дискретизација једначина – интегрална форма се примјењује на сваку запремину;
- нумеричке апроксимације – гранични и гранично-запремински услови се апроксимирају;
- рјешавање система једначина – нумеричке методе, попут итеративних метода и експлицитних/имплицитних схема, се користе за ту сврху.

При дискретизацији, најчешће се користе схеме као што су:

- *upwind* схема – користи смјер струје флуида за апроксимацију конвективних чланова;
- *central difference* схема – даје већу тачност, али може изазвати осцилације;
- TVD (*Total Variation Diminishing*) методе – комбинују тачност и стабилност.

Могућности примјене методе коначних запремина су огромне. Користи се у различитим областима инжењерства и науке као што су:

1. аеродинамика (анализе струјања ваздуха око аеропрофила, авиона, возила и ракета);
2. аутомобилска индустрија (симулације отпора ваздуха и ефеката аеродинамичких дјелова);
3. енергетика (моделирање протока у турбинама, хладњацима и термоелектранама);

4. биомедицински инжењеринг (симулације протока крви кроз артерије и срчане коморе);
5. метеорологија (предвиђање временских прилика кроз моделирање атмосферске динамике).

Метода коначних запремина је један од најмоћнијих нумеричких приступа у CFD-у. Њена предност је очување масе, количине кретања и енергије унутар сваке контролне запремине, што је чини посебно погодном за комплексне флуидне проблеме. Са све већом рачунарском снагом, FVM наставља да буде водећа метода у анализи флуида и аеродинамике. У будућности, развој бољих нумеричких схема и ефикаснијих алгоритама за паралелно рачунање омогућиће још прецизније и брже CFD симулације.

6. НУМЕРИЧКЕ СИМУЛАЦИЈЕ

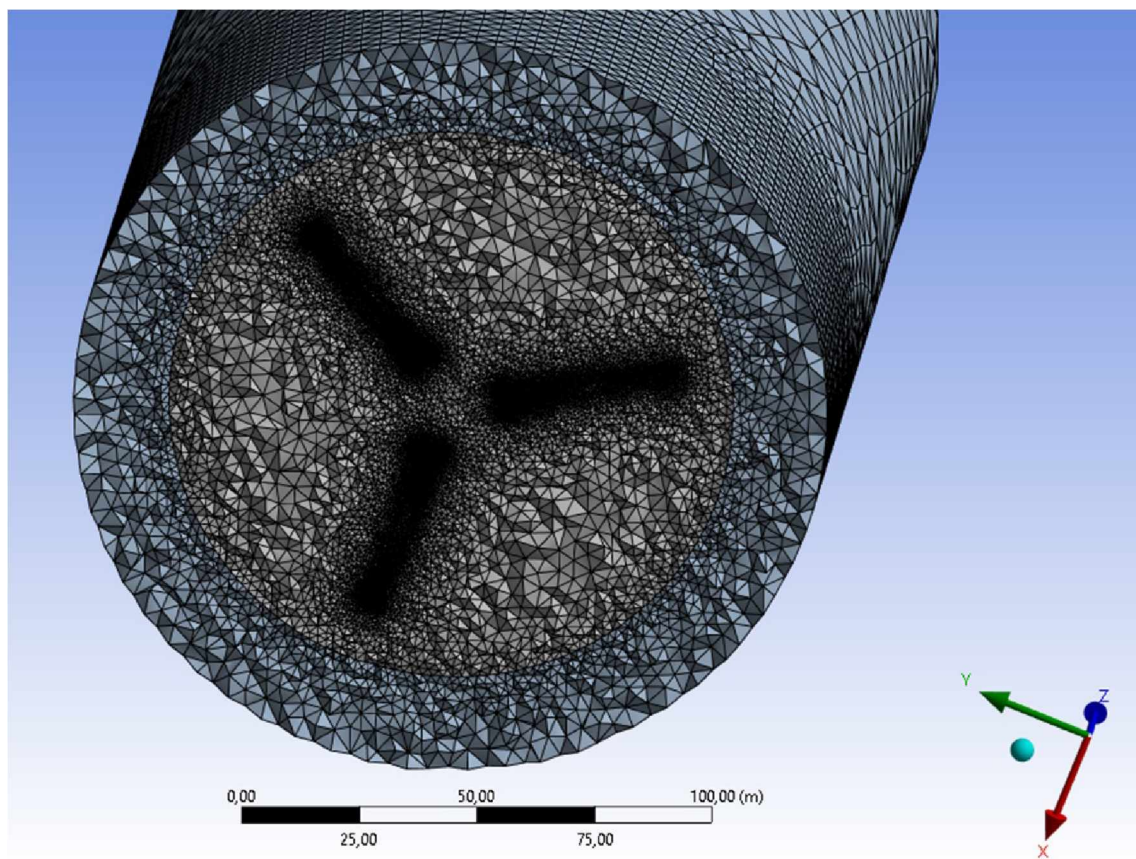
У овом поглављу представљен је процес постављања нумеричких симулација које се користе за анализу буке коју генеришу вјетротурбине. Постављање симулација подразумијева креирање геометријских модела, избор мрежа и дефинисање других битних параметара који ће омогућити тачну симулацију акустичког понашања система.

6.1. Мрежа за нумеричке симулације

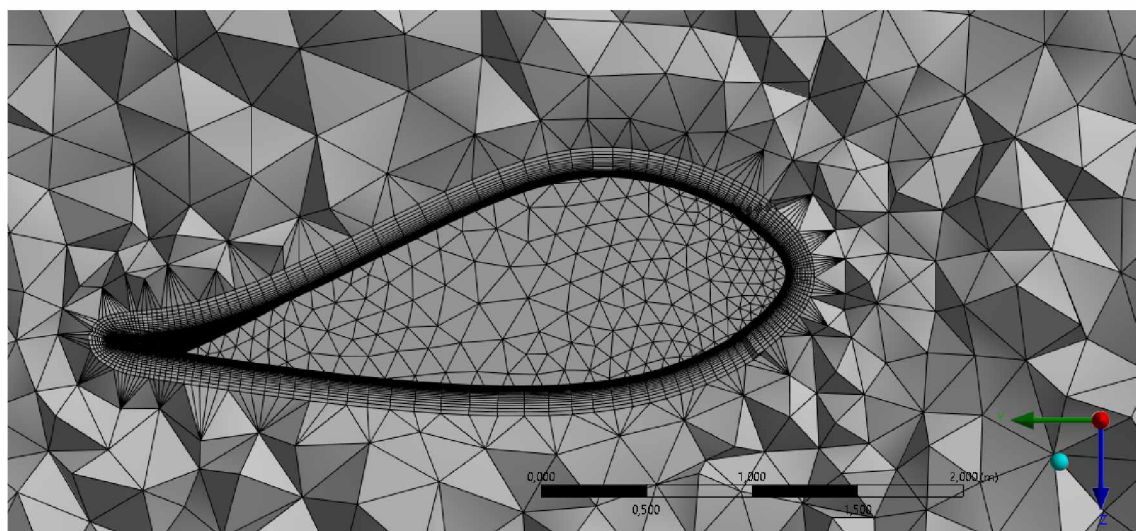
За потребе нумеричких симулација креирана је неструктурирана мрежа која омогућава дискретизацију цјелокупног домена и обезбјеђује високу резолуцију сложених аеродинамичких интеракција у близини лопатица ротора, као и карактеристика струјања у далеком пољу (слика 6.1). Ова врста мреже омогућава флексибилност у моделовању и прилагођавање специфичним геометријским и физичким захтјевима анализе.

Прецизност мреже посебно је унапријеђена у зони око лопатица ротора, гдје је примијењена финија структура мреже како би се правилно регистровале све аеродинамичке појаве. Коришћење ове стратегије резултује побољшаном резолуцијом у подручју од кључног значаја за анализу аеродинамичких сила и момената који дјелују на ротор. Повећана густина елемената у критичним зонама омогућава детаљан приказ струјног поља, уз истовремено очување прихватљивог броја рачунарских елемената, чиме се постиже оптималан однос између тачности и рачунарске ефикасности.

Да би се додатно смањила сложеност мреже и олакшало управљање симулацијом, лопатице ротора су моделоване без врхова. Овај приступ је омогућио поједностављену конструкцију мреже, уз задржавање свих кључних аеродинамичких карактеристика вјетротурбине.



а)



б)

Слика 6.1. Компјутерска мрежа:

а) домен; б) гранични слој и околина лопатице

Моделовање лопатица без врхова поједностављује генерисање мреже, елиминишући потребу за екстремно фином дискретизацијом у подручјима са jakim градијентима брзине и притиска. Иако овај метод у потпуности не обухвата ефекте струјања у непосредној близини врхова лопатица, он и даље пружа вриједан увид у укупне перформансе и динамику вртложног трага ротора.

Креирана мрежа садржи 8.469.424 елемента и 3.451.137 чворова, представљајући уравнотежен компромис између детаљне резолуције у критичним зонама и одрживих рачунарских захтјева. Велики број елемената омогућава квалитетно представљање струјног поља у различитим регионима анализираног домена. Посебна пажња посвећена је оптимизацији распореда и типа елемената, како би се постигла стабилност нумеричких прорачуна и смањила грешка дискретизације. Комбинацијом четвороугаоних и троугаоних елемената у критичним зонама, односно призматичних и тетраедарских елемената у остатку домена, омогућено је ефикасно моделирање аеродинамичких појава.

Посебна пажња посвећена је моделовању граничног слоја, јер је овај регион од кључног значаја за анализу турбуленције и тачно предвиђање аеродинамичких сила. Домен у непосредној близини лопатице, уз сами њен зид, моделован је врло ситном мрежом како би се обезбиједила адекватна резолуција граничног слоја и боље предвиђање приањања струјања уз површину. Висина овог слоја подешена је на 0,0005 m (0,5 mm), што омогућава изузетно фину резолуцију струјања уз зидове. Ова техника обезбјеђује прецизно моделирање турбуленције, што је од кључног значаја за аеродинамичку анализу вјетротурбина.

Употреба фино дискретизованог граничног слоја омогућава тачно предвиђање кључних аеродинамичких параметара попут коефицијената узгона и отпора, што има значајан утицај на ефикасност вјетротурбине. Да би

се осигурала тачност модела коришћен је приступ са више слојева унутар граничног слоја, при чему је први слој постављен тако да задовољи критеријум:

$$y^+ < 1, \quad (6.1)$$

гдје је y^+ бездимензиони параметар који описује однос удаљености првог чвора мреже од зида у односу на локалне карактеристике граничног слоја:

$$y^+ = \frac{yu_\tau}{\nu}, \quad (6.2)$$

при чему је: y нормална удаљеност прве тачке мреже, $u_\tau = \sqrt{\tau_w/\rho}$ брзина трења, а τ_w тангенцијални напон на зиду.

Критеријум (6.1) осигурава да се нумеричка мрежа може користити за директно рјешавање RANS једначина без потребе за емпиријским моделима граничног слоја.

Такође, симулације су додатно унапријеђене коришћењем адаптивног побољшања мреже у зонама од посебног значаја. Ова техника омогућава динамичко прилагођавање густине елемената током извршења симулације, што резултира већом прецизношћу без великог повећања броја елемената. Примјеном ове методе омогућено је да се мрежа аутоматски прилагођава зонама са наглим промјенама брзине и притиска, што побољшава квалитет резултата.

Поред структуре саме мреже, пажња је посвећена и граничним условима симулације. Примењени су одговарајући гранични услови на улазу, излазу и зидовима, уз употребу специјализованих турбулентних модела који омогућавају тачно предвиђање сложених аеродинамичких феномена.

Према томе, креирана неструктурирана мрежа представља висококвалитетну основу за нумеричку симулацију аеродинамичких појава у зони вјетротурбине. Захваљујући примјени напредних техника

дискретизације, укључујући фино моделирање граничног слоја, локално побољшавање мреже и оптимизацију броја елемената, осигурано је да резултати симулације буду поуздани и прецизни, уз истовремено очување рачунарске ефикасности. Овакав приступ омогућава да се на бази добијених резултата доносе одлуке о побољшању аеродинамичких перформанси вјетротурбина и оптимизацији њиховог дизајна.

6.2. Улазни параметри симулације

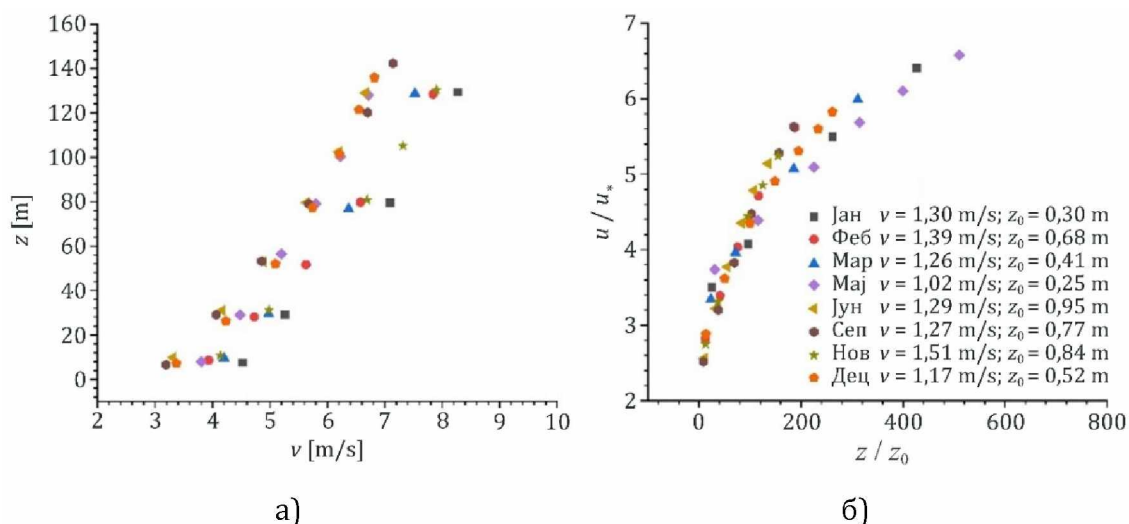
Дефинисање улазних параметара има кључну улогу у тачности симулација, јер од њих зависи поузданост добијених резултата и коначна валидност модела у поређењу са експерименталним подацима. Правилним избором ових параметара могуће је значајно унаприједити тачност предвиђања понашања турбине у различитим условима рада, чиме се добијају поузданија поређења са реалним системима.

У квазистационарним симулацијама, брзина вјетра на улазу је узета као константна и варирана је у распону од 4 до 12 m/s, док је брзина обртања ротора такође мијењана у зависности од анализираног случаја, чиме су се истраживале различите оперативне тачке система.

Са друге стране, код нестационарних симулација, брзина вјетра је дефинисана као функција висине, односно била је варијабилна дуж висинског профила, што боље одражава реалне атмосферске услове и омогућава детаљнију анализу утицаја турбуленције. Поред тога, број обртаја ротора је мијењан у распону од 0,4 до 1,6 rad/s, како би се анализирао његов утицај на понашање турбине у различитим режимима рада, укључујући услове номиналног оптерећења и граничне случајеве који могу бити критични за стабилност система.

На слици 6.2 приказана су два графика који представљају анализу брзине вјетра у зависности од висине и других параметара. Представљен је

вертикални профил вјетра за различите мјесеце. Видљива је сезонска варијација у параметрима као што су референтна брзина вјетра, висина храпавости терена и стабилност атмосфере. Подаци су добијени из мјерења на метеоролошкој станици EOLOS Универзитета у Минесоти [57].



Слика 6.2. Профили брзине вјетра и њихова нормализација у различитим мјесецима: а) зависност брзине вјетра од висине; б) нормализовани профили брзине вјетра у односу на бездимензионалну висину

Слика 6.2.а на апсциси даје брзину вјетра у распону од око 2 m/s до 10 m/s, док је на ординати представљена висина, која се креће у распону од 0 до 160 m. Подаци су дати кроз различите симболе у бојама и означавају поједине мјесеце у години. Тренд показује да брзина вјетра расте са висином, што је очекивано због мањег утицаја површинског трења на већим висинама.

Слика 6.2.б на апсциси приказује бездимензионалну висину z/z_0 добијену нормализацијом висине z у односу на карактеристичну висину површинске храпавости z_0 . На њеној ординати дат је однос брзине вјетра на посматраној висини и референтне брзине (на висини z_0).

Још један битан параметар који утиче на брзину вјетра је Монен-Обуховљева (*Monin-Obukhov*) дужина L_z [m], која показује стабилност

атмосфере и одређује начин на који турбуленција дјелује у доњој атмосфери. Дефинише се као:

$$L_z = \frac{-u^{*3} \cdot \theta_v}{K \cdot g \cdot \omega' \theta_v'} \quad (6.3)$$

гдје је: u^* [m/s] фрикциона брзина (мјерило турбулентног мијешања), θ_v [°K] средња виртуелна потенцијална температура, K Карманова константа, g [m/s²] гравитационо убрзање, а $\omega' \theta_v'$ [K · m/s] површински флуks виртуелне потенцијалне температуре.

Атмосфера је:

- стабилна за $L_z > 0$ (турбуленција је слаба, мијешање је ограничено);
- нестабилна за $L_z < 0$ (јако турбулентно мијешање, присуство узгона);
- неутрална за $|L_z| \rightarrow \infty$ (турбуленција доминира без узгона).

Монен-Обуховљева дужина је кључан параметар у метеорологији, посебно за моделирање размјене енергије и масе између Земљине површине и атмосфере.

За анализу аеродинамичких и акустичких карактеристика вјетротурбине кориштени су софтверски пакети *QBlade* и *ANSYS Fluent*. Ови алати су омогућили детаљну симулацију струјања ваздуха око лопатица, као и прорачун буке настале током рада турбине.

6.3. *QBlade* – анализа аеродинамике турбине

QBlade је софтверски алат посебно развијен за анализу аеродинамике вјетротурбина, омогућавајући детаљно проучавање перформанси турбина у различитим условима. Овај алат комбинује напредне методе нумеричког моделовања и аеродинамичке анализе како би обезбиједио прецизне

результате који могу допринијети побољшању ефикасности вјетроенергетских система. Базиран је на *XFOIL* алату који се користи за прорачун узгона и отпора ваздушних профила на бази методе панела. Захваљујући овом алату, софтвер омогућава детаљну анализу аеропрофила, што је од суштинског значаја за пројектовање и оптимизацију лопатица вјетротурбина. Поред тога, *QBlade* нуди корисницима могућност симулације понашања турбина у различитим условима, што га чини веома корисним алатом за истраживање и развој у области обновљивих извора енергије.

Могућности и карактеристике софтвера *QBlade*:

- анализа аеродинамичких профила помоћу *XFOIL*-а,
- симулирање коефицијента рада λ ,
- израчунавање коефицијента снаге c_p и коефицијента момента c_m ,
- динамичке симулације рада турбине у различитим условима вјетра,
- процјена аеродинамичке ефикасности лопатица,
- интеграција са другим софтверским алатима,
- генерисање 2D и 3D модела.

У оквиру овог истраживања *QBlade* је кориштен за симулацију аеродинамичког понашања турбине при различитим брзинама вјетра и бројевима обртаја ротора. На основу добијених резултата утврђена је оптимална геометрија лопатица која омогућава најбољу ефикасност рада. Софтвер је такође кориштен за анализу утицаја промјена брзине вјетра на перформансе турбине.

Симулације су показале да се оптималне карактеристике рада могу постићи при одређеним брзинама и нападним угловима. Ово истраживање доприноси бољем разумијевању аеродинамичких сила које дјелују на лопатице и омогућава инжењерима да развију ефикасније системе контроле рада турбина.

QBlade налази примјену не само у академским истраживањима, већ и у индустријским пројектима развоја вјетротурбина. Компаније које се баве производњом турбина користе овај софтвер за оптимизацију дизајна лопатица и побољшање перформанси својих производа. Захваљујући својим напредним могућностима, *QBlade* је постао важан алат у развоју нових генерација вјетротурбина. Будући развој *QBlade*-а може довести до још прецизнијих и детаљнијих симулација, што ће допринијети даљем унапређењу технологије вјетротурбина и повећању њихове ефикасности у производњи чисте енергије.

6.4. ANSYS Fluent – CFD симулације струјања и анализе буке

ANSYS Fluent је водећи софтвер за CFD и користи се за анализу сложених струјних појава око вјетротурбине. Овај софтвер омогућава напредне симулације, које су кључне за разумијевање и оптимизацију аеродинамичких карактеристика вјетротурбина.

Развој савремених вјетротурбина захтијева детаљну анализу струјања ваздуха око лопатица ротора, али и анализу њихових аеродинамичких перформанси и генерисане буке, што је могуће уз коришћење наведеног софтверског пакета.

Кључне могућности *ANSYS Fluent*-а:

- симулација стишљивог и нестишљивог струјања, што омогућава анализу различитих услова рада вјетротурбине у зависности од промјене брзине вјетра;
- моделирање турбуленције коришћењем RANS, LES или DES метода, што омогућава детаљну анализу турбулентних ефеката и њиховог утицаја на перформансе турбине;
- примјена аероакустичких модела за прорачун генерисане буке, што је од великог значаја за утицај вјетротурбина на околину;

- анализа утицаја висине и промјена брзине вјетра на рад турбине, што је посебно важно за турбине постављене у различитим географским условима;
- детаљно испитивање граничног слоја и стварање вртлога, који утичу на ефикасност рада турбине, стварање буке и потенцијалну ерозију лопатица.

За потребе овог истраживања у *ANSYS Fluent*-у су спроведена два типа симулација:

- Квазистационарно струјање – при константној брзини вјетра на улазу и различитим бројевима обртаја ротора. Ова врста симулације омогућава анализу стабилних услова рада вјетротурбине и одређивање оптималних параметара за максималну ефикасност.
- Нестационарно струјање – при промјенљивој брзини вјетра, која варира у зависности од висине. Овај тип анализе је посебно користан за реалну процјену услова у којима ће турбина радити током дужег временског периода.

Коришћењем Лајтилове аероакустичке аналогije и FW-H метода, извршене су анализе буке како би се квантификовали нивои звучног притиска у различитим тачкама око турбине.

6.5. Верификација и валидација модела

Верификација и валидација модела су кључни кораци у процесу нумеричке анализе којима се осигурава тачност и поузданост добијених резултата, како би модели формирани у *ANSYS Fluent*-у дали резултате који су што ближи стварним мјерењима. Верификација модела подразумијева провјеру тачности нумеричке методе и исправност рјешавања постављених једначина.

У овом истраживању, верификација је извршена кроз:

- Испитивање конвергенције рјешења – варирањем броја рачунских елемената анализирана је осјетљивост резултата на густину мреже. Што је мрежа гушћа, то су резултати тачнији, али се повећава потреба за рачунарским ресурсима.
- Провјера стабилности нумеричког рјешења – анализиране су различите шеме дискретизације и временски кораци у нестационарним симулацијама. Ово је неопходно како би се осигурало да моделирање даје конзистентне резултате.

Валидација модела је упоређивање добијених резултата са подацима добијеним мјерењем како би се утврдила њихова тачност. У овом раду, валидација је спроведена на основу:

- Поређења коефицијената снаге – израчунати коефицијенти снаге упоређени су са мјереним вриједностима, а разлике су квантификоване кроз релативну грешку. Ово даје процјену тачности модела у предвиђању стварних перформанси турбине.
- Анализе динамичких параметара – проучавана је промјена угаоне брзине и утицај нестационарног струјања на перформансе турбине. Ова анализа је важна за разумијевање како турбина реагује на промјене у условима околине.

Верификација и валидација су показале да моделирање у програмима *QBlade* и *ANSYS Fluent* даје резултате који се добро поклапају са мјереним подацима, уз прихватљиву релативну грешку. Ово потврђује поузданост примијењене методологије за анализу аеродинамичких карактеристика вјетротурбине.

7. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

У овом поглављу представљени су резултати добијени нумеричким симулацијама, као и њихова упоредна анализа са доступним експерименталним подацима, у циљу бољег разумијевања аеродинамичких и акустичких појава које настају током рада вјетротурбина. Посебна пажња посвећена је утицају кључних параметара на ниво и карактеристике генерисане буке.

У дијелу 7.1 представљена је аеродинамичка анализа заснована на резултатима добијеним CFD и BEMT методама. Анализирано је нестационарно струјање око лопатица вјетротурбине при различитим пољима брзина, са нагласком на идентификацији критичних зона и потенцијалних извора аеродинамичке нестабилности. Резултати симулација упоређени су са доступним експерименталним подацима ради процјене тачности примијењених модела.

Поглавље 7.2 посвећено је анализи акустичке буке вјетротурбина кроз резултате нумеричких симулација добијене током истраживања спроведеног за потребе припреме дисертације. У оквиру овог дијела, у потпоглављу 7.2.1, описани су резултати добијени примјеном BNS модела, док је у цјелини 7.2.2 извршена процјена акустичких перформанси вјетротурбине на основу *QBlade* модела.

У дијелу (7.2.3) анализирани су резултати добијени примјеном FW-H модела. Ова анализа омогућава детаљнији увид у механизме настанка буке и идентификацију најзначајнијих извора у функцији радних услова турбине.

На самом крају, кроз потпоглавље 7.2.4, описан је утицај буке генерисане током рада вјетротурбине на птице.

7.1. Аеродинамичка анализа вјетротурбина – резултати нумеричких симулација

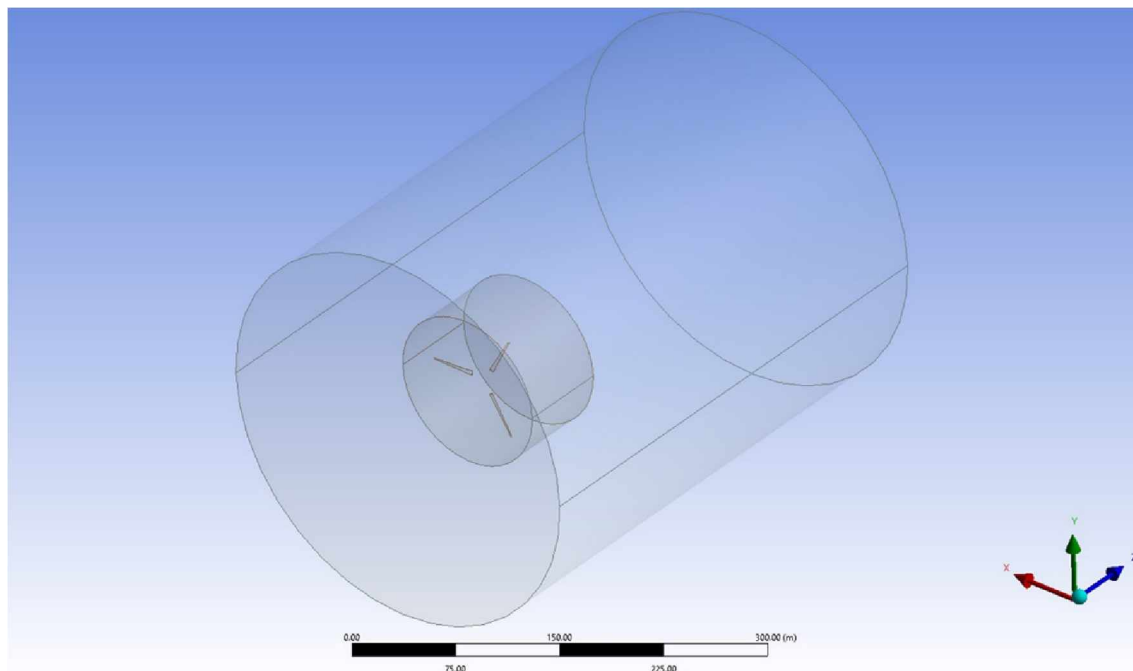
7.1.1. Поређење резултата добијених CFD и BEMT приступима са експерименталним подацима

За прву анализу вјетротурбине која је предмет истраживања овог рада, ротор је позициониран унутар цилиндричног домена који представља ваздушни простор у којем ротор функционише. Овај домен је подијељен на двије главне зоне:

- ротирајући дио – зона непосредно око ротора у којој се врши обртно кретање флуидних дјелића,
- стационарни дио – удаљена зона која представља околни флуид у мировању.

За симулацију је примијењена метода покретног референтног оквира MRF (*Moving Reference Frame*). Овај приступ омогућава моделирање ротора унутар ротирајућег референтног оквира, док је околни флуид задржан у стационарном стању. Употреба MRF методе значајно поједностављује рачунарску обраду, јер се у њој врши трансформација једначина кретања из непокретног у ротирајући координатни систем. Овим се смањује рачунска сложеност симулације. Међутим, ова метода подразумијева стационарно (квазистабилно) кретање, што значи да не узима у обзир вртложне нестационарне ефекте који могу настати у реалним условима рада вјетротурбине.

Геометрија ротора је облика цилиндра пречника $d = 96$ m. Цјелокупни домен (ротирајући и стационарни дио) такође има цилиндрични облик, чији су пречник $3d$ и дужина $4d$. Ротор је постављен коаксијално у односу на цјелокупни домен, на растојању од једног пречника d од улазне границе домена (слика 7.1).

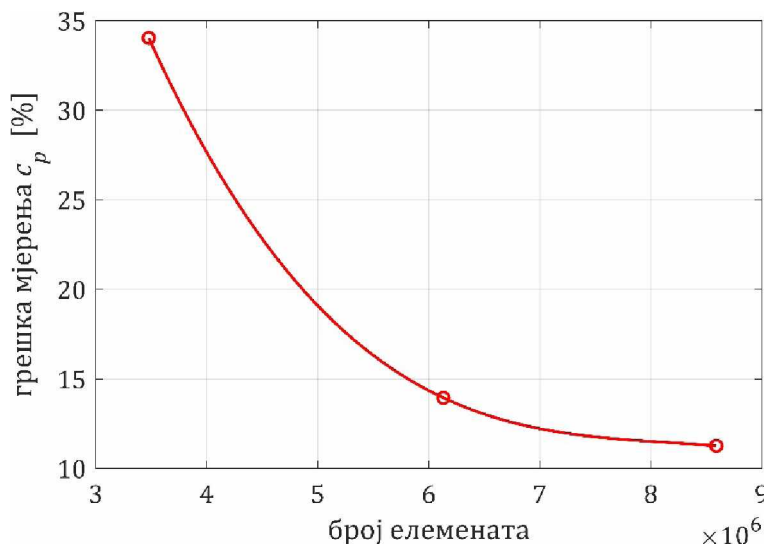


Слика 7.1. Рачунарски домен за прорачун вјетротурбине

На улазnoj граници домена претпостављено је униформно брзинско поље. Симулације су спроведене за брзине вјетра у опсегу од 4 до 12 m/s, а на основу коефицијента рада (λ). Одговарајуће угаоне брзине ротора су у распону од 1,0627 до 1,6224 rad/s. Симулација је изведена као квазистационарна (*quasi-steady*), примјеном SST и SST прелазних Рејнолдсових турбулентних модела. Квазистационарни нумерички приступ подразумијева модификацију једначина кретања у ротирајућој зони око ротора увођењем инерцијалних чланова који произилазе из ротације. Овај метод омогућава анализу ефеката ротације без физичког кретања лопатица или промјене мреже током израчунавања.

Да би се испитала конвергенција резултата, извршена је анализа осјетљивости модела на број елемената мреже. Генерисане су мреже различитих густина, а добијене вриједности коефицијента снаге упоређене су са експерименталним подацима. Разлика између добијених и мјерених вриједности коефицијента снаге квантитативно је изражена кроз средњу

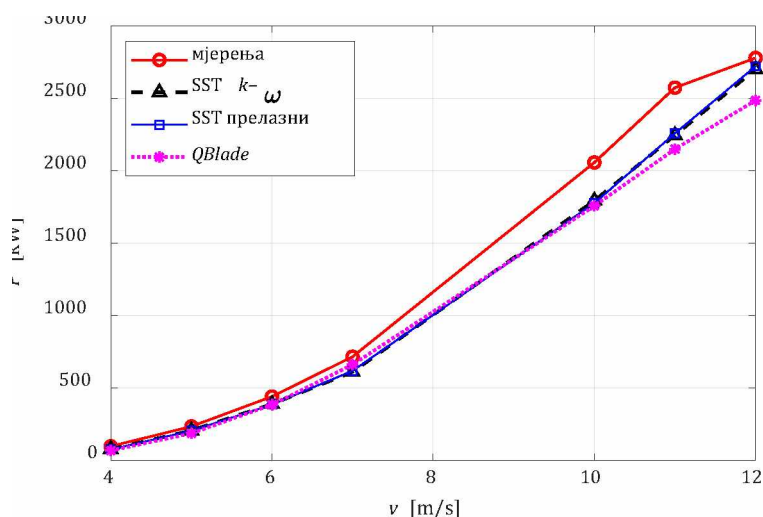
вриједност релативне грешке за сваки разматрани случај. Добијени резултати представљени су на слици 7.2. Уочљиво је да за број елемената већи од 7×10^6 , релативна грешка остаје приближно константна и износи око 11%. Ова анализа указује на довољну тачност модела уз прихватљиву рачунарску сложеност.



Слика 7.2. Релативна грешка коефицијента снаге у односу на број елемената мреже

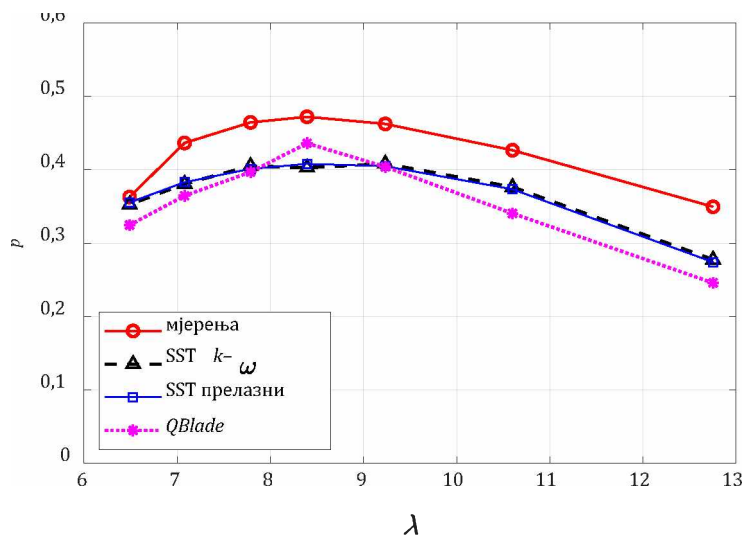
На слици 7.3 приказана је зависност израчунате снаге турбине P у функцији брзине вјетра v . Представљени су подаци за различите методе нумеричких симулација и мјерења. Резултати дају детаљан увид у перформансе и понашање вјетротурбине у различитим условима струјања вјетра.

На основу дијаграма се види да све криве прате сличан тренд, са порастом снаге уз повећање брзине вјетра. Постоји добро поклапање између различитих модела симулације, али се они мало разликују од измјерених вриједности. Највеће одступање измјерених вриједности од симулација је код највећих брзина вјетра од око 11–12 m/s, гдје је измјерена снага већа од предвиђене.



Слика 7.3. Мјерена и израчуната снага вјетротурбине P у зависности од брзине вјетра v

Слика 7.4. приказује експериментално и нумерички добијену промјену коефицијента снаге c_p у зависности од коефицијента рада λ .



Слика 7.4. Коефицијент снаге c_p у зависности од коефицијента рада λ

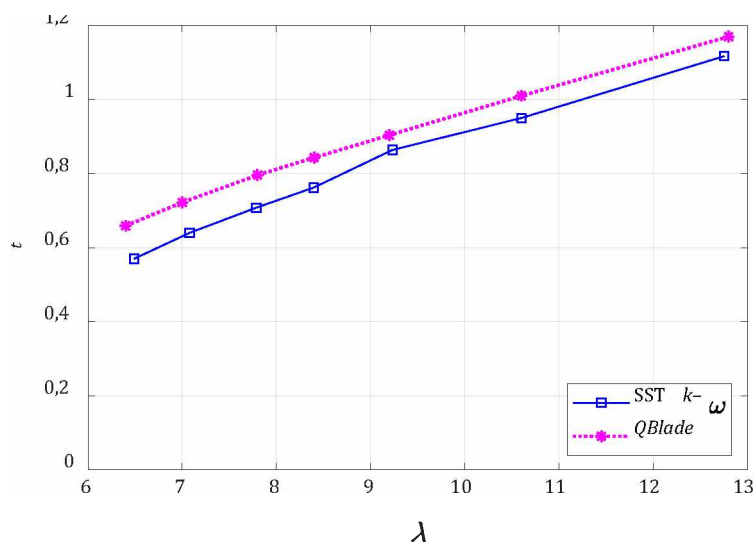
На апсциси дијаграма са слике 7.4 представљен је коефицијент рада λ , који је по дефиницији однос брзине врха лопатице и брзине вјетра. Коефицијент снаге c_p , дат на ординати, бездимензиони је параметар и

представља однос механичке енергије турбине и енергије вјетра. Брзина вјетра је варирана у распону од 4 до 12 m/s, а брзина ротације је такође мијењана.

Уопштено, све три симулације потцјењују вриједности добијене мјерењима, дајући исте релативне грешке као и код (претходне) процјене снаге. Резултати добијени CFD симулацијама са два различита модела турбуленције су готово идентични. Због великих димензија турбине, могуће недовољно ситне мреже (у односу на мале турбулентне структуре, али не и за индустријске примјене), као и због употребе квазистационарног приступа за рјешавање ротирајућег струјног поља, оба модела турбуленције дају веома сличне резултате, при чему струјно поље дјелује у потпуности турбулентно. На основу добијених података може се закључити да експериментални и нумерички резултати показују исти тренд функције. Релативна грешка између CFD и експерименталних резултата износи 12–14%. Ова разлика првенствено настаје због поједностављене геометрије у моделу. У нумеричким прорачунима коришћена је упрошћена геометрија, јер није било могуће генерисати мрежу са оригиналном геометријом, која укључује закривљени врх лопатице. Разлике у резултатима такође настају због претпоставке о униформном брзинском пољу на улазу симулација, што у стварности није случај, јер профил брзине значајно варира са висином услед атмосферског граничног слоја. Поред тога, симулације игноришу утицај гравитације и структурне деформације танких лопатица вјетроелектране.

Анализом криве која показује однос између коефицијента снаге c_p и коефицијента рада λ , добијене у *QBlade*-у, може се примијетити да је општи тренд функције сличан (слика 7.4). Међутим, нумеричке вриједности се разликују због једноставнијег модела коришћеног у *ВЕМТ*-у. Један од разлога за неслагање између нумеричких и експерименталних резултата је и поједностављење геометрије врха лопатице.

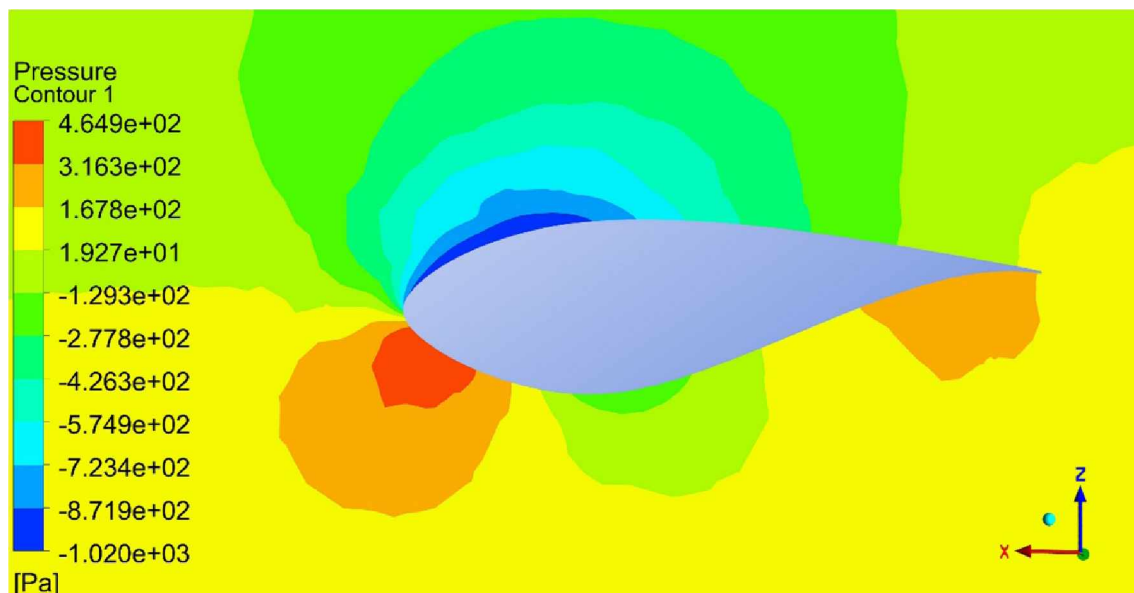
Слика 7.5 даје приказ промјене коефицијента потиска c_t у зависности од коефицијента рада λ .



Слика 7.5. коефицијент потиска c_t у зависности од коефицијента рада λ

При нижим вриједностима коефицијента рада λ (~ 7), коефицијент потиска c_t износи приближно 0,6. Како λ расте, коефицијент потиска се постепено повећава, што указује да при већим брзинама ротације (у односу на брзину вјетра) ротор генерише већи потисак. Ова компонента силе не доприноси генерисању обртног момента (који настаје услед тангенцијалних сила), али је од суштинског значаја за структурални дизајн торња вјетроелектране, јер вјетроелектрана мора преузети и ове силе, за које је уочљиво да расту са повећањем брзине струјања вјетра.

Слика 7.6 јасно приказује расподјелу притиска око аеропрофила у попречном пресеку лопатице вјетротурбине. На горњој површини аеропрофила примјећује се зона са нижим притиском (означена плавим/зеленим бојама). Ова област ниског притиска је кључна за стварање силе узгона у складу са Бернулијевим принципом. Насупрот томе, на доњој површини притисак је релативно већи (жуте/зелене боје), што додатно доприноси генерисању силе узгона аеропрофила.



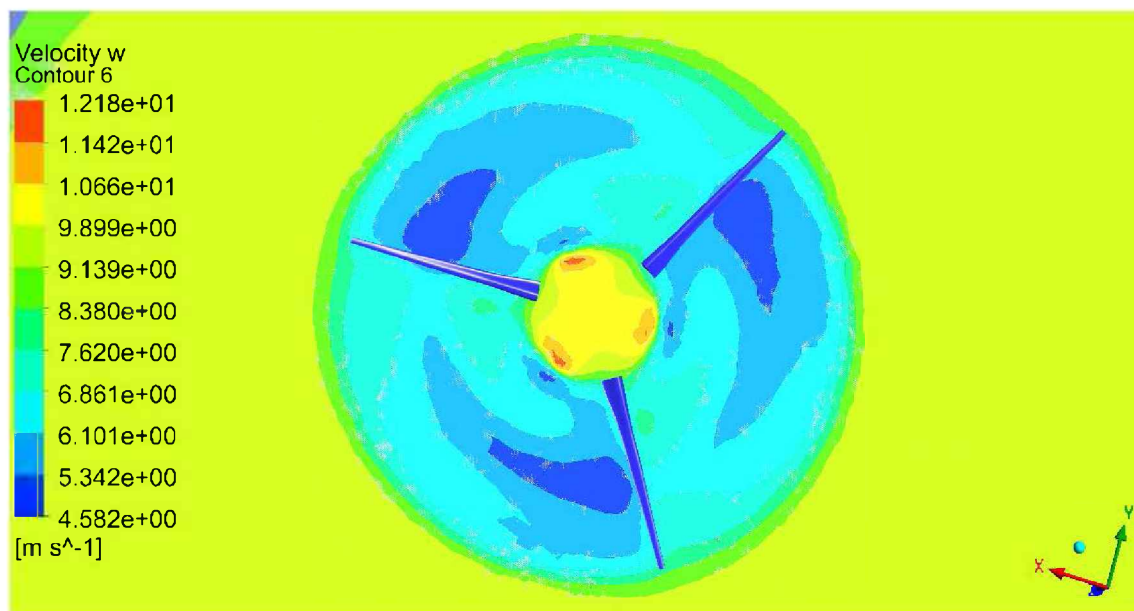
Слика 7.6. Контуре притиска на зидовима лопатице на 15 m од центра ротора

Комбинација зона високог и ниског притиска, узајамно са обликом аеропрофила, доводи до стварања силе узгона која делује управно на правац долазног ваздушног тока. Расподјела притиска указује да се струјање ваздуха убрзава преко горње површине аеропрофила, што доводи до пада притиска (приказано плавим зонама).

Поред тога, уочавају се области повишеног притиска испред и испод аеропрофила (црвене/наранџасте боје), што указује на компресију ваздуха. Ова визуелизација је од суштинске важности за разумијевање аеродинамичких перформанси и оптимизацију облика аеропрофила у различитим примјенама, укључујући пројектовање вјетроелектрана, авиона и других система који се ослањају на принципе аеродинамике. Детаљна анализа расподеле притиска омогућава прецизније моделирање и побољшање ефикасности лопатица, минимизирање отпора и повећање стабилности у реалним условима рада.

Слика 7.7. приказује контуре брзине (у z-правцу) које се често користе у CFD за визуелизацију расподеле брзине у струјном пољу иза ротора.

Успоравање долазног вјетра може се видјети у настанку и ширењу вртложног трага. Приказан је и дио лопатице (око 40-90% распона лопатице) који највише доприноси генерисању снаге.



Слика 7.7. Расподјела брзине иза лопатица

Овим истраживањем је урађена свеобухватна анализа аеродинамичких перформанси велике вјетротурбине користећи и CFD симулације и BEMT, упоређујући их са експерименталним подацима прикупљеним са теренске станице Универзитета у Минесоти за истраживање енергије вјетра [56]. Комбинација CFD и BEMT метода, подржана експерименталном валидацијом, пружа снажан оквир за унапређење технологије вјетротурбина, доприносећи ширем циљу одрживе и поуздане производње обновљиве енергије. Резултати показују да када се комбинују са експерименталним подацима, савремени алати за симулацију могу прецизно предвидјети понашање вјетротурбина, помажући у дизајну и оптимизацији ефикасних система за енергију вјетра. Процијењене су кључне перформансе, као што су коефицијенти снаге и карактеристике струјања око лопатица. Резултати су такође показали како претпоставка поља униформне брзине на улазу утиче на ове перформансе.

Ово поређење је помогло у валидацији симулационих модела и пружило увид у потенцијална подручја за побољшање. Процијењена је тачност и поузданост SST и SST прелазних Рејнолдсових модела у предвиђању перформанси турбине. Квази-стационарни приступ је кориштен због његове ефикасности. SST и SST прелазни Рејнолдсови модели дали су резултате са 87,5% преклапања са подацима мјерења, што је веома добро, али би се могло даље побољшати бољим пречишћавањем мреже – што захтијева моћније рачунарске ресурсе. С друге стране, BEMT модел показује 84% преклапања са подацима мјерења. Међутим, од овог модела се не могу очекивати знатно прецизнији резултати због инхерентних поједностављења које укључује. Све у свему, резултати симулације показују замршену интеракцију између брзине вјетра, брзине ротације и турбуленције у одређивању перформанси вјетротурбине.

7.1.2. Анализа нестационарног струјања ваздуха око вјетротурбине при промјенљивим брзинама

Ово истраживање је кориштено за детаљну нумеричку анализу нестационарног струјања око вјетротурбине која ради при промјенљивим брзинама користећи CFD симулације.

Основни циљ је:

- истражити карактеристике нестационарног струјања, укључујући стварне аеродинамичке перформансе вјетротурбине у реалним условима рада, динамички вртложни траг и вртлоге који се одвајају са крајева/врхова лопатица при промјенљивим брзинама.

Анализиран је утицај варијација брзине на аеродинамичке параметре, као што су производња снаге и стабилност струјања. Симулација је осмишљена тако да моделира изоловани ротор пречника $d = 96$ m у реалним условима рада, при чему је улазна брзина варијабилна по висини. Домен

обухвата струјање око стварне вјетротурбине и има цилиндрични облик са пречником од 160 m и висином од 400 m. Ове димензије обезбјеђују да је ротор постављен довољно далеко од граница како би се смањиле било какве нумеричке сметње или гранични ефекти, уз истовремено праћење свих релевантних динамичких струјања.

Ротор је постављен на удаљености $d = 96$ m од улазне границе. Ова удаљеност осигурава да се улазна брзина, које зависи од висине, може развијати и достићи стационарно стање прије него што наиђе на турбину. Ротор је симетрично постављен у попречном смјеру, што осигурава да је турбина централно лоцирана унутар домена (коаксијално). Оваква конфигурација омогућава струјање које зависи од висине са обје стране ротора и поједностављује анализу образаца струјања, укључујући ефекте динамички вртложног трага и интеракцију турбине са околним пољем вјетра. Овај распоред представља оперативно окружење стварне вјетротурбине, узимајући у обзир варијацију улазне брзине са висином.

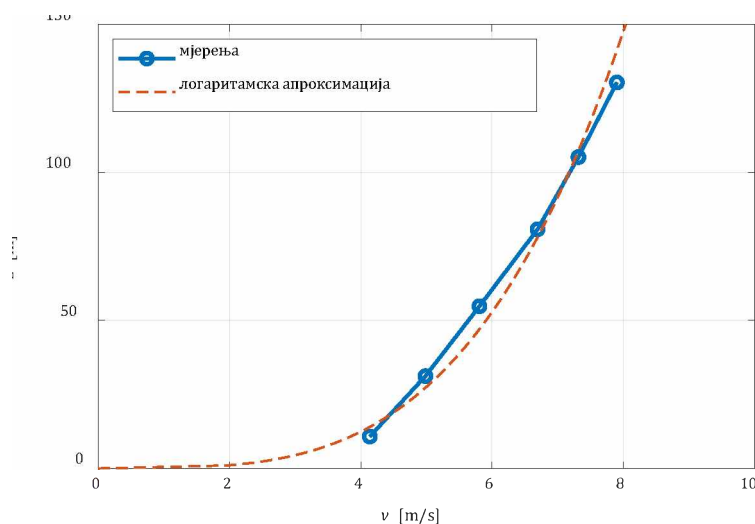
Симулације су урађене у софтверу *ANSYS Fluent*, користећи се нестационарним режимом рада ради анализе нестационарног струјања око ротирајућег ротора вјетротурбине. На улазној граници примијењена је промјенљива брзина вјетра у зависности од висине, док су разматране различите угаоне брзине ротора у опсегу од 0,4 rad/s до 1,6 rad/s како би се процијенила његова ефикасност у различитим радним условима.

За симулацију ротације лопатица коришћен је модел клизеће мреже (*sliding mesh model*), при чему је рачунски домен подијељен на ротирајући и стационарни дио.

Гранични услови су дефинисани тако да прецизно симулирају струјање око ротора вјетротурбине обезбјеђујући стабилну конвергенцију резултата. На улазној граници примијењен је гранични услов улазне брзине са задатим

профилом брзине вјетра који зависи од висине, а у складу са оперативним условима добијеним теренским мјерењима. Овај профил је дефинисан коришћењем кориснички дефинисаних функција (*User-Defined Functions – UDFs*).

Слика 7.8 приказује разлике између средњих вриједности брзине вјетра у атмосферском граничном слоју (ABL) измјерених у новембру 2014. године (означене пуним линијама и круговима) и одговарајуће логаритамске апроксимације (означене тањом испрекиданом линијом).

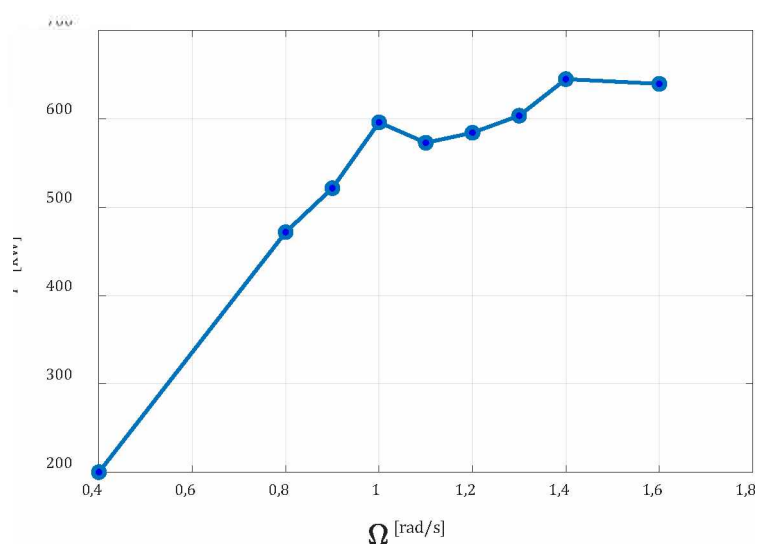


Слика 7.8. Средње вриједности брзине вјетра у атмосферском граничном слоју (ABL)

На излазној граници је примијењен излазни притисак са манометарским притиском од 0 Pa, чиме је омогућен природан излаз струјања из домена без вјештачких ограничења.

Слика 7.9 приказује однос између снаге генератора турбине и угаоне брзине за задати профил вјетра који варира са висином. Уочљиво је да се снага турбине постепено повећава са порастом угаоне брзине, достижући максимум при оптималној угаоној брзини ($\Omega = 1,4 \text{ rad/s}$). У том тренутку, турбина ради

са највећом аеродинамичком ефикасношћу, користећи максималну количину енергије вјетра. Међутим, након достигања оптималне брзине, снага почиње да опада. Овај пад је посљедица неколико комплексних аеродинамичких појава. Прије свега, долази до одвајања граничног слоја, усљед чега се формирају турбулентне зоне иза лопатица, што значајно смањује њихову способност да ефикасно искористе енергију вјетра. Осим тога, повећавају се силе отпора додатно смањујући нето енергију коју турбина може да претвори у механички рад.



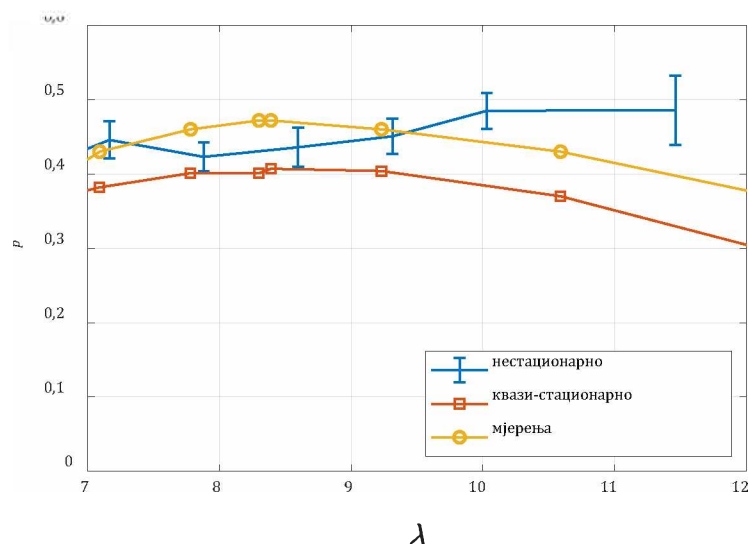
Слика 7.9. Снага генератора вјетротурбине у зависности од угаоне брзине

Још један важан фактор је динамички вртложни траг који постаје све израженији на већим брзинама ротације. Турбуленције изазване високим угаоним брзинама могу довести до нестабилности у струјању иза ротора, што не само да утиче на ефикасност тренутне турбине, већ може имати и негативан утицај на друге турбине у вјетропарку, уколико се налазе низводно. Ови резултати наглашавају нелинеарну природу рада вјетротурбине, јер снага генератора није једноставно пропорционална угаоној брзини, а и брзина је промјенљива у времену. Док при нижим брзинама ротације повећање угаоне брзине директно доводи до веће производње енергије, при већим брзинама

ова зависност постаје све сложенија, јер аеродинамички фактори почињу да доминирају.

Ова анализа указује на значај прецизног управљања угаоном брзином турбине како би се постигла оптимална ефикасност вјетротурбине. Рад изван овог оптималног опсега може довести до губитака енергије, повећаних механичких оптерећења, па чак и убрзаног хабања компонената вјетротурбине. Због тога је од кључне важности примијенити напредне системе контроле, који могу динамички подешавати угаону брзину у зависности од тренутних атмосферских услова, како би се обезбиједила максимална производња енергије уз минимално структурно оптерећење ком је изложена.

Слика 7.10 приказује варијацију коефицијента снаге c_p као функцију коефицијента рада λ . Три приказане криве представљају различите скупове података који чине перформансе вјетротурбине при различитим условима и у различитим фазама рада.



Слика 7.10. Вриједности коефицијента снаге c_p у зависности од коефицијента рада λ добијени нестационарном симулацијом, квази-стационарном симулацијом и мјерењем

- **Резултати добијени нестационарном симулацијом** (плава крива са интервалима грешке)

Ова крива приказује резултате добијене нумеричким симулацијама које представљају нестационарне услове струјања. Генерално, показује растући тренд који достиже максимум око $\lambda = 9$, након чега се стабилизује уз појаву мањих флукуација. Ово су типични услови у моменту када се турбина налази у прелазном режиму рада и још увијек није у потпуности достигла стабилан радни режим.

- **Резултати добијени квази-стационарном симулацијом** (жута крива са квадратима)

Крива представља податке који су добијени у условима квази-стационарног рада, гдје се претпоставља да су сви услови више или мање стабилни и да не постоје значајне флукуације у струјању. Она, такође, показује врх око $\lambda = 9$, али после овог долази до значајнијег опадања коефицијента снаге. Пад указује на то да је са повећањем угаоне брзине отпор на лопатицама вјетротурбине већи, што доводи до смањења ефикасности претварања кинетичке енергије вјетра у механички рад.

- **Измјерени резултати** (наранџаста крива са кружићима)

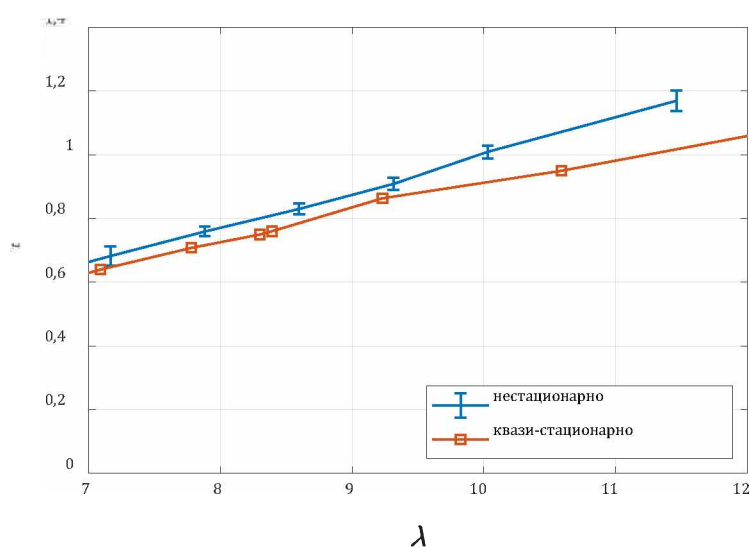
Крива представља податке добијене из експерименталних мјерења у реалним условима рада вјетротурбине. Измјерени подаци се налазе између нестационарних и стационарних резултата, што указује на то да су мјерења спроведена у условима који су ближи стварном раду турбине, али још увијек нијесу достигли потпуну стабилност. Крива показује јасан врх око $\lambda = 8$, али након тога долази до мањег опадања коефицијента снаге. Овај пад је посљедица природних нестабилности у струјању која се јављају са повећањем брзине ротора, као и ефеката, попут одвајања граничног слоја и повећаног отпора на већим брзинама.

Нестационарни модел даје највише вриједности коефицијента снаге, али са одређеним варијацијама, што указује на присуство динамичких ефеката који се не могу увијек прецизно предвидјети. Експериментални подаци су ближи нестационарним резултатима, али показују мања одступања при већим вриједностима λ . Ова разлика је посљедица промјенљивих атмосферских услова.

Стационарни модел константно даје мањи коефицијент снаге, јер не узима у обзир све промјенљиве факторе који утичу на рад турбине, као што су турбуленција, динамички вртложни траг и постојање флуктуација у струјању које су присутне у стварним условима. Ово указује да нестационарни ефекти имају значајан утицај на перформансе турбине, побољшавајући аеродинамичку ефикасност и оптимизацију рада у поређењу са стационарним моделима. Све три криве имају максимум у близини $\lambda = 9$, што указује да је ова вриједност коефицијента рада оптимална за рад вјетротурбине. Ова вриједност оптимизује ефикасност и производњу енергије, чиме се постиже најбољи однос између механичке енергије која се добија из вјетра и снаге коју турбина може да претвори у електричну енергију. Разлике између ових кривих указују на важност разматрања динамичких и нестационарних ефеката приликом симулирања рада вјетротурбине, али и на потребу за свеобухватним приступом који узима у обзир различите услове рада. Такође, сличност између израчунатих и експерименталних резултата потврђује тачност симулационих метода, укључујући избор модела турбуленције, кориштене граничне услове и дизајн рачунске мреже. Ова слика такође наглашава значај оптималног опсега брзине врха лопатице за повећање производње енергије и избјегавање смањења ефикасности при великим брзинама ротације.

Слика 7.11 приказује зависност коефицијента потиска c_t од коефицијента рада λ . При нижим вриједностима λ , које се крећу око 7,

коэффициент потиска остаје релативно стабилан, приближно 0,65, што указује на умјерено дејство аксијалне силе на ротор при овим брзинама ротације. Међутим, како се λ повећава, коэффициент потиска постепено расте. Ово повећање указује на то да се аксијална сила (потисна сила) повећава са растом брзине ротације ротора у односу на брзину вјетра. Ова појава је резултат већег дејства вјетра на лопатице турбине како се ротор брже окреће, што доводи до веће акумулације силе у аксијалном правцу.

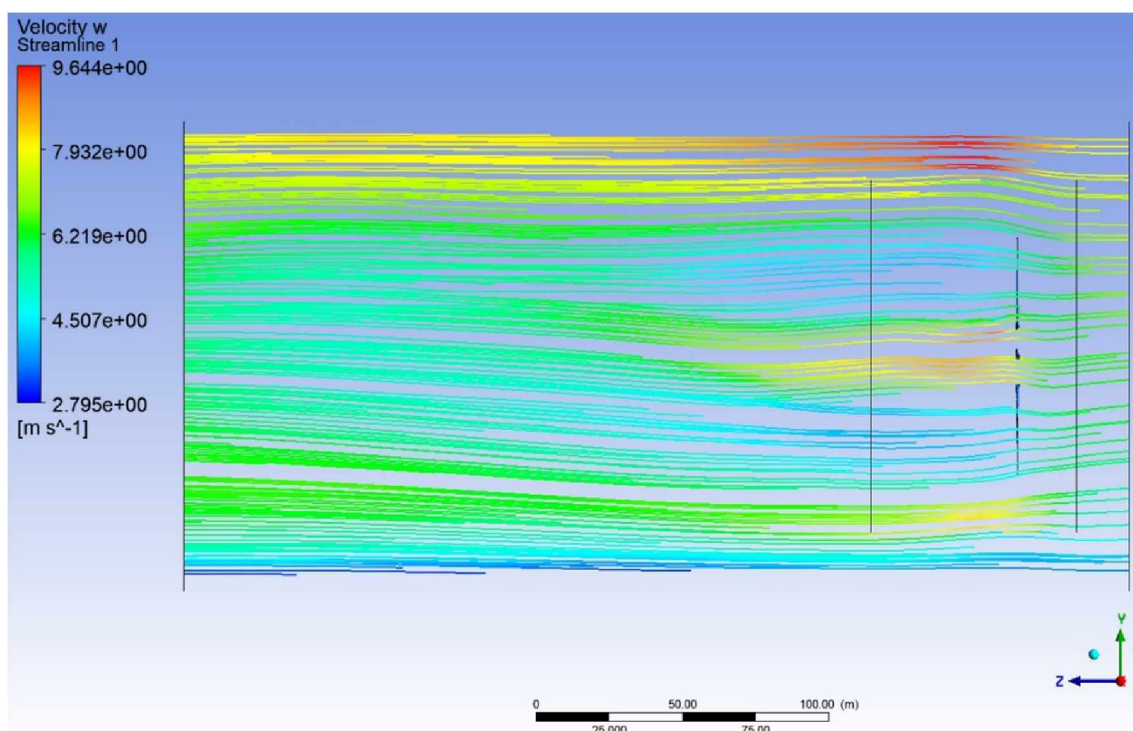


Слика 7.11. Коефицијент потиска c_t у зависности од коефицијента рада λ

Иако потисна сила не игра директну улогу у генерисању механичког момента (који је резултат тангенцијалних сила), она је изузетно важна када је у питању структурни интегритет и стабилност вјетротурбине. Веће потисне силе стварају додатна оптерећења у основи турбине, посебно у условима када су брзине вјетра веће. Оптерећења могу довести до значајних механичких напона, који морају бити узети у обзир током пројектовања и изградње вјетротурбина. Сходно томе, разумијевање ове варијације потисне силе је кључно за осигуравање безбједности и дугорочне ефикасности турбине. Дизајн турбине мора бити такав да може поднијети велике потисне силе које се јављају при већим брзинама ротације и вјетра, истовремено обезбјеђујући

њену стабилност и сигурност рада. Због тога, адекватно моделирање и предвиђање ових сила представља основну компоненту у процесу оптимизације рада вјетротурбина, како би се обезбиједила њихова максимална продуктивност и дуговјечност.

Слика 7.12 приказује поље брзине и визуализује струјне линије обојене према њеном интензитету.



Слика 7.12. График струјних линија брзинског поља унутар цилиндричног домена

Скала боја са лијеве стране показује вриједности брзине, које се крећу од око 2,795 m/s (плава) до 9,644 m/s (црвена). Веће брзине (жуте/црвене области) концентрисане су у горњем дијелу домена, док су мање брзине (плаве/зелене области) присутне у доњем дијелу. Струја ваздуха показује релативно глатку и уредну организацију у подручју прије турбине. Међутим, примјећују се поремећаји у близини вертикалних структура, као што су

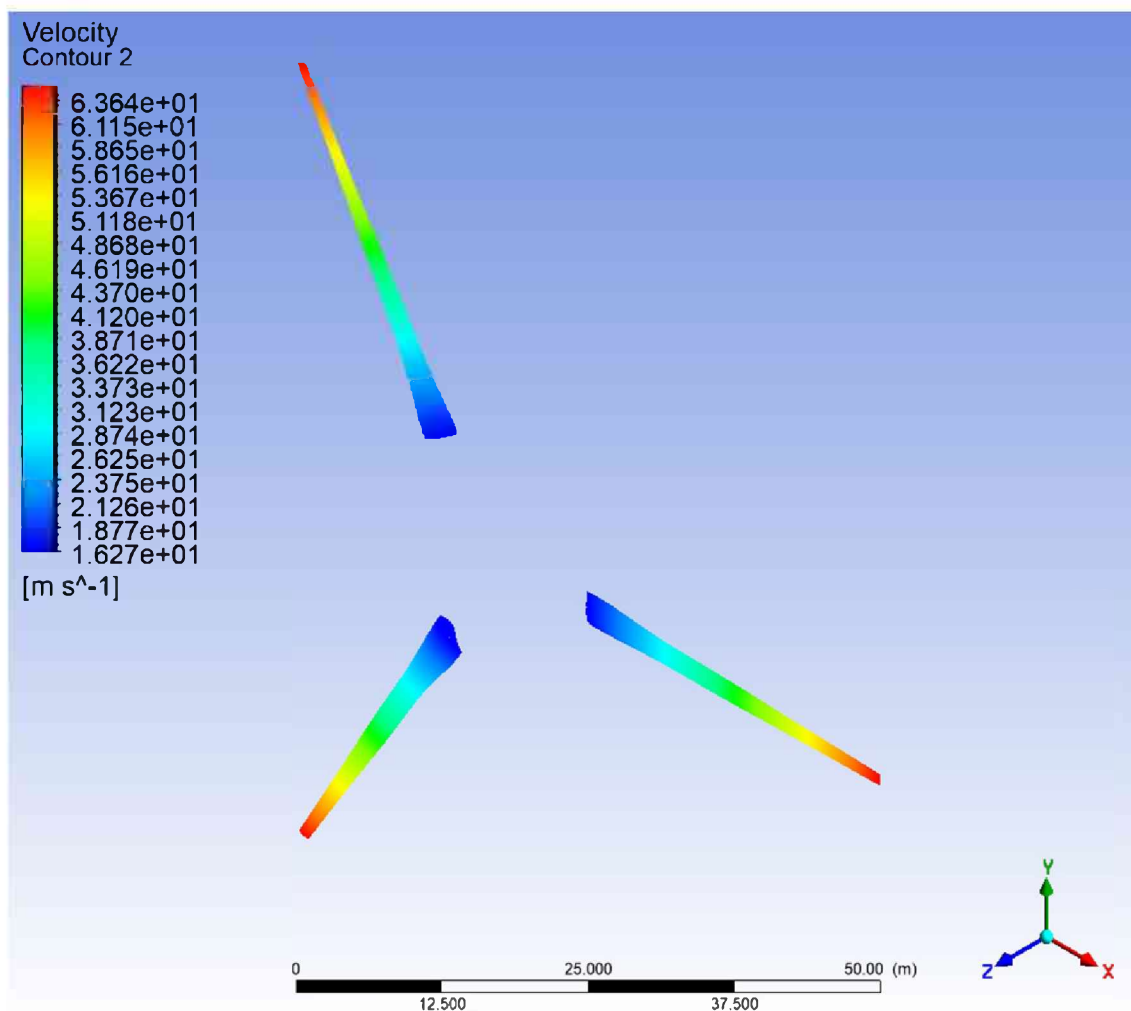
лопатице вјетротурбине, носеће конструкције или други аеродинамички ефекти. У овим областима, примјетна су локализована одвајања граничног слоја или области рецикулације, што указује на ефекте вртлога, који су посљедица утицаја структура на струјање ваздуха. Црне вертикалне линије представљају физичке структуре које имају директан утицај на струјање флуида. Струјне линије се савијају и формирају подручја успоравања (плаве области) и убрзавања (жуте/црвене области) око ових структура.

Ова врста визуелизације је изузетно корисна у аеродинамици вјетротурбина јер омогућава боље разумијевање феномена као што су формирање вртлога, интензитет турбуленције и градијенти брзине у различитим зонама струјања. Проучавање тих ефеката је кључно за оптимизацију перформанси вјетротурбина, јер омогућава уочавање потенцијалних проблема, као што су губици енергије изазвани неефикасним струјањем, као и разумијевање како различите структуре утичу на свеукупни рад вјетротурбине.

Слика 7.13 приказује три различите зоне са градијентно обојеним површинама које представљају лопатице турбине, као кључне унутрашње компоненте анализираног домена. Ове површине илуструју расподелу брзина дуж лопатица, пружајући увид у аеродинамичке карактеристике струјања унутар система.

Црвена боја означава области са већим вриједностима брзине, које се најчешће јављају дуж водећих или задњих ивица лопатица, у зависности од правца струјања. Ове области указују на зоне интензивне интеракције између флуида и површине лопатице, што може довести до појаве високих градијената притиска и могућег одвајања граничног слоја.

Плава боја представља регионе са нижим вриједностима брзине, које се углавном налазе близу коријена лопатица или у зонама стагнације струјања.



Слика 7.13. Контурни приказ брзине са фокусом на лопатице

Овдје је могуће уочити зоне смањене енергије струјања, које могу довести до повећане тенденције настанка рецикулационих појава и губитака енергије. Градијент брзине дуж структура лопатица приказује како се струјање убрзава и успорава у интеракцији са овим површинама. Варијације у боји на површинама указују на присуство различитих динамичких карактеристика струјања, укључујући:

- Зоне интензивних смицајних сила, посебно у близини водећих ивица, гдје долази до наглих промјена брзине. Ови дјелови су често повезани са повећаним трењем и губицима енергије.

- Зоне споријег струјања и рецикулације, које се могу налазити у близини коријена лопатица или на њиховим бочним странама. Ове зоне могу довести до појаве вихора и нестабилности у систему.

Приказана анализа представља укупну релативну брзину са укљученом компонентом ротације. На основу резултата, максимална вриједност брзине достиже око 65 m/s и уочава се на врху лопатице, што указује на зоне интензивног убрзања. Насупрот томе, минимална вредност брзине, приближно 16 m/s, јавља се у коријену лопатице, што може бити посљедица нижих локалних притисака и смањеног ефекта индукованог протока.

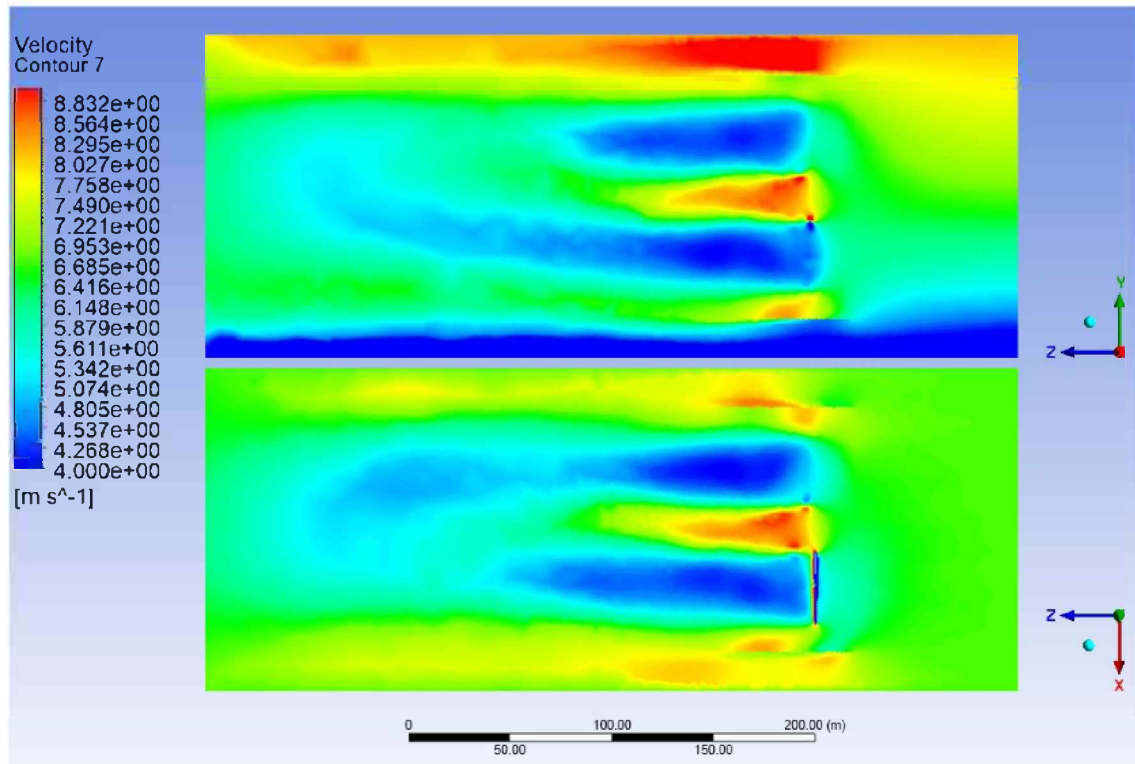
Ова анализа открива критичне зоне у којима може доћи до:

- одвајања граничног слоја, што може утицати на стабилност и ефикасност рада турбине;
- формирања турбуленције, која може довести до повећаних вибрација и механичког оптерећења на лопатицама;
- интензивног генерисања буке, што је посебно важно у контексту аеродинамичке оптимизације.

Закључно, ова анализа омогућава инжењерима да идентификују критичне области и примијене одговарајуће модификације у дизајну како би се побољшала ефикасност и дуготрајност турбинских система.

Слика 7.14 представља расподјелу брзине у читавом домену, нудећи преглед понашања струјања од улазне до излазне границе домена. На улазу у домен, брзина износи приближно 7 m/s, што представља почетне услове струјања. Флуид улази равномјерно у домен и започиње интеракцију са његовим унутрашњим компонентама. Највеће брзине се уочавају у зони ротора, посебно дуж површина лопатица. Ово повећање брзине је посљедица убрзања струјања услед интеракције са површинама лопатица, што доводи до формирања локалних зона високих смицајних сила. Ове области су од кључне

важности јер указују на подручја гдје се енергија струјања искоришћава или губи.



Слика 7.14. Расподјела брзине у домену

У трагу иза лопатица јасно су видљиви вихори и турбулентне структуре. Ови вихори настају услед интеракције између високобрзинског струјања на површинама лопатица и околног флуида који се креће спорије. Турбулентне зоне у овим областима указују на раздвајање струјања и енергетске губитке настале током рада ротора. Како се струја флуида креће низводно, брзина постепено опада. Изнад зоне ротора турбуленција почиње да се распршује, а струјање се стабилизује. На довољној удаљености низводно, примјећује се све униформније брзинско поље, што указује на долазак у стационарно стање са минималним поремећајима.

Главни извори буке у овом систему произилазе из турбуленције, ослобађања вихора и раздвајања струјања. Турбулентне структуре и

високосмицајне зоне у трагу иза лопатица доприносе генерисању флукуација притиска, што доводи до акустичке буке. Интеракција између високобрзинског струјања на роторским лопатицама и околног споријег флуида, ствара трагове вихора, који представљају још један извор буке усљед осцилација сила у трагу.

7.2. Анализа акустичке буке – резултати нумеричких симулација

У овом поглављу су представљени резултати акустичке анализе добијени различитим нумеричким моделима, који су коришћени за процјену нивоа буке коју генеришу вјетротурбине. Симулације су спроведене користећи три различита акустичка модела: широкопојасни акустички модел, ВЕМТ акустички модел и FW-N акустички модел. Резултати добијени овим моделима омогућавају детаљну анализу акустичке перформансе турбина, уз разматрање различитих аспеката, као што су утицај вјетра, аеродинамичке и механичке вибрације, као и ефекти апсорпције звука у околини. Поред тога, у овом поглављу је приказано поређење резултата из нумеричких симулација са мјереним вриједностима које су добијене на Универзитету у Минесоти, гдје су спроведена експериментална мјерења акустичке буке вјетротурбине.

Ово поређење омогућава анализу прецизности и поузданости коришћених акустичких модела, као и разматрање потенцијалних разлика између теоријских симулација и стварних, експерименталним путем добијених података.

7.2.1. *Broadband* акустички модел – модел широкопојасног шума

У циљу процјене нивоа акустичке буке генерисане радом вјетротурбине, спроведена је нумеричка симулација коришћењем модела широкопојасног шума. Овај модел омогућава анализу аероакустичких ефеката произашлих из интеракције турбулентног струјања са лопатицама турбине, као и процјену нивоа буке. У симулацији је претпостављена улазна брзина вјетра од 10 m/s,

при чему су анализирани кључни параметри, попут расподјеле звучног притиска (SPL) и просторне дистрибуције буке око турбине.

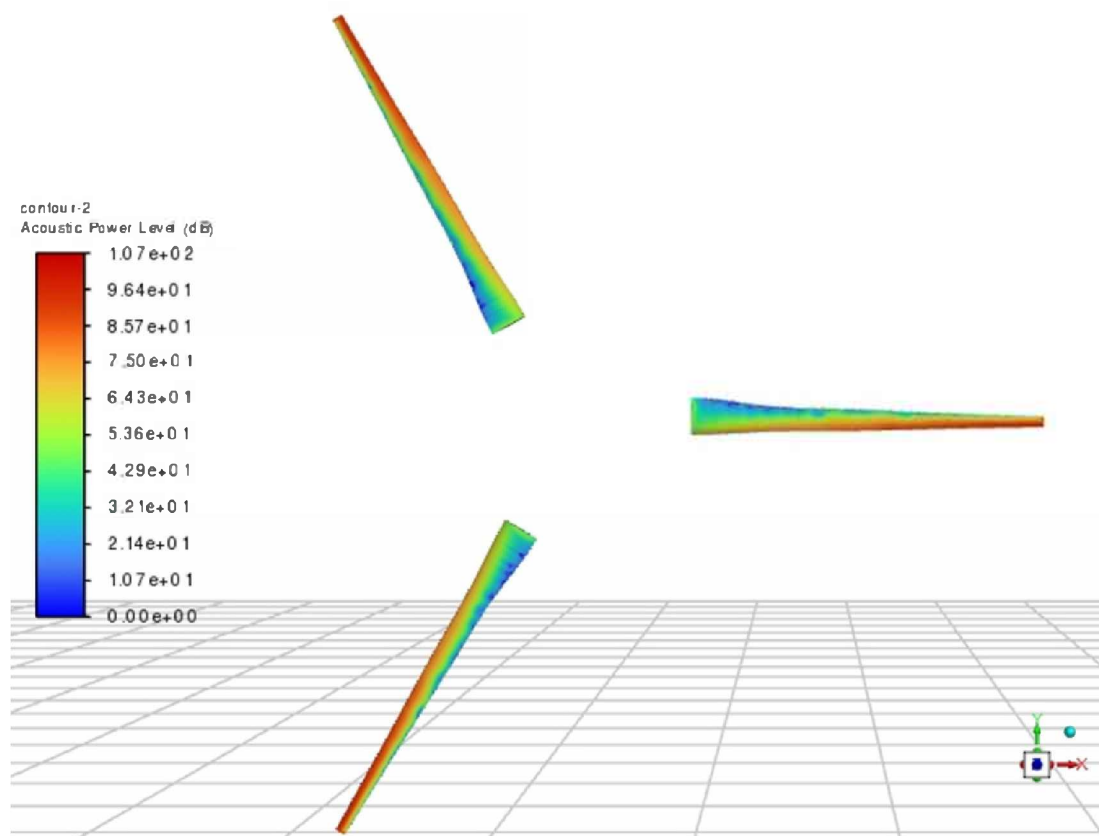
Резултати приказани у наставку укључују:

- расподјелу нивоа звука у различитим тачкама;
- просторну расподјелу буке, како би се идентификовале зоне повећаног акустичког оптерећења.

Анализа ових резултата омогућава бољу процјену утицаја вјетротурбине на околину, идентификацију потенцијалних извора буке, као и оптимизацију дизајна у циљу смањења аероакустичких емисија.

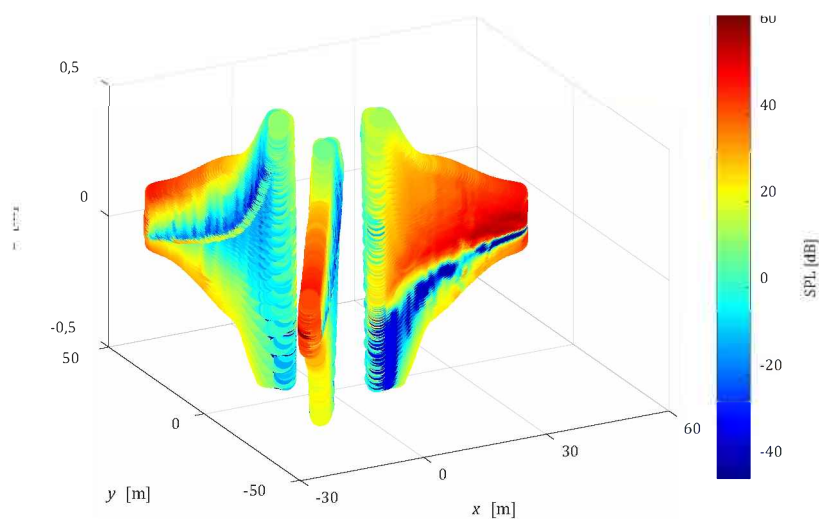
Слика 7.15 приказује тродимензионалну расподјелу акустичке снаге на лопатицама вјетротурбине, представљајући је (у dB) уз помоћ контурних боја. Ова анализа се користи за одређивање извора буке и процјену њеног интензитета у зависности од геометрије и струје флуида. Анализа је заснована на нумеричком прорачуну флуида, примјеном CFD модела широкопојасног шума. Легенда приказује нивое акустичке снаге, крећући се од 0 dB (плаво) до око 100 dB (црвено). Највеће вриједности акустичке емисије (црвена и наранџаста) концентрисане су дуж ивица тијела, што указује на изворе буке изазване аеродинамичким ефектима. Боје се крећу од плаве до црвене, гдје црвена означава високе нивое акустичке емисије, а плава ниске, при чему се највећа емисија буке јавља на ивицама лопатица, што сугерише да су аеродинамичка турбуленција и вртлози главни узроци буке.

Ова анализа може имати примјену у оптимизацији дизајна лопатица ради смањења буке, евалуацији акустичких карактеристика пропелера или турбина у ваздухопловним и индустријским апликацијама, као и у коришћењу метода попут FW-H једначине за анализу аероакустичких ефеката. Укратко, слика представља нумеричку симулацију аероакустичке буке око ротирајућих лопатица, користећи боје за визуелизацију нивоа звучног притиска.



Слика 7.15. Расподјела акустичке снаге на лопатицама вјетротурбине

На слици 7.16 је приказана дистрибуција јачине звука на лопатицама



Слика 7.16. Дистрибуција јачине звука на лопатицама вјетротурбине

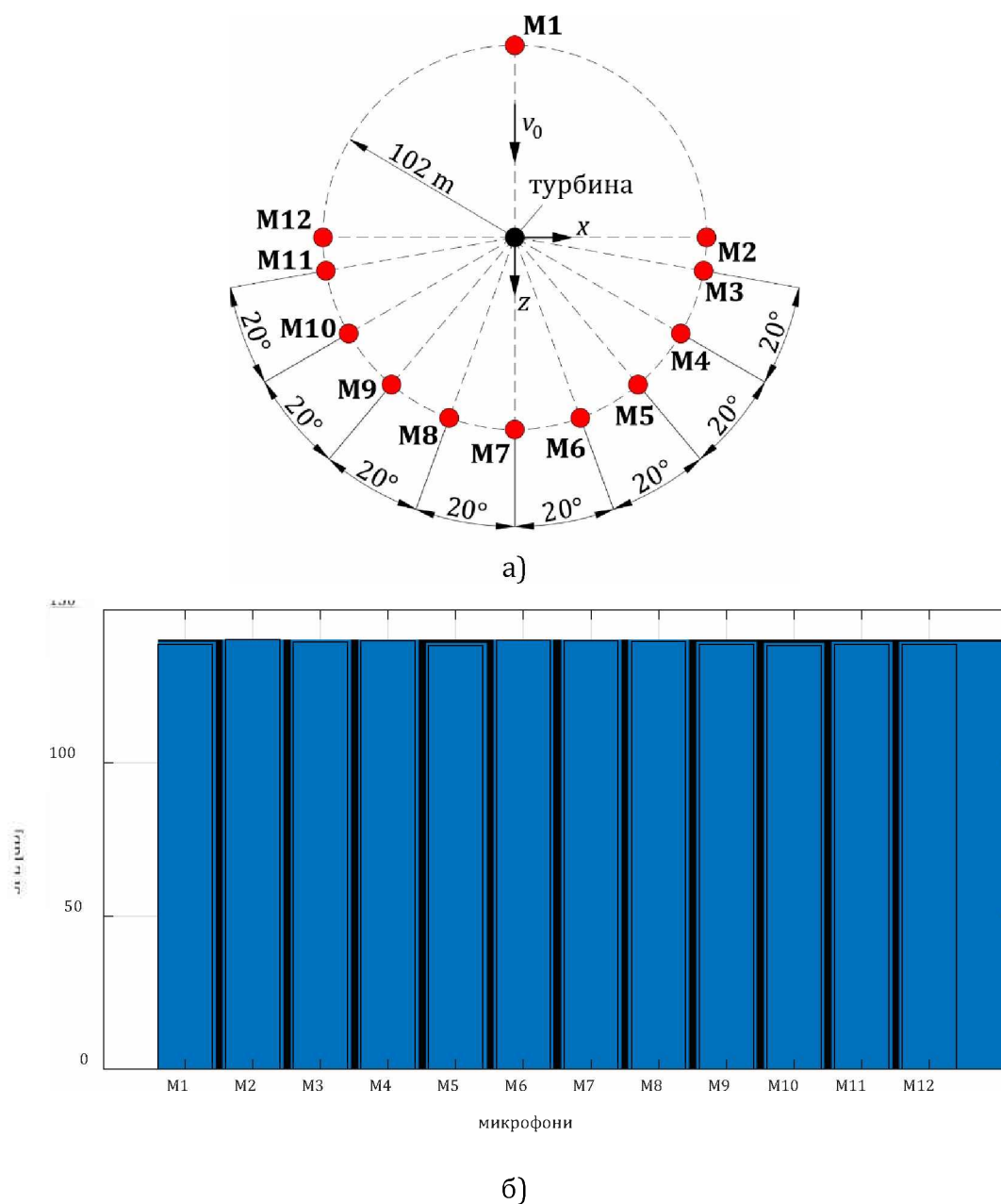
Јачина звука на самој лопатици вјетротурбине достиже до 60 dB и највећа је на самим ивицама лопатица, што је посљедица турбуленције и стварања вртлога.

На слици 7.17.а дат је приказ распореда и ознака микрофона у којима је нумеричким путем процијењена јачина звука, док слика 7.17.б приказује стубичасти график са нивоом звучног притиска SPL у 12 наведених тачака које приближно одговарају локацијама микрофона коришћених при експерименталним истраживањима. Добијени резултати показују да је израчуната јачина звука у свим тачкама изнад 120 dB, што је знатно веће од реално измјерених вриједности на тим локацијама.

Разлози за одступање су сљедећи:

1. Овај широкопојасни (*broadband*) акустички модел не даје расподјелу јачине звука у фреквенцијском опсегу, већ само вриједност акустичке снаге, која је затим прерачуната у ниво звучног притиска;
2. Локације тачака које су узете у обзир су само приближно одговарале реалним позицијама микрофона, што додатно доприноси разлици између симулираних и стварних вриједности.

С обзиром на то да модел предвиђа знатно веће вриједности SPL-а од оних које су добијене мјерењем [57], може се закључити да овај основни акустички модел није погодан за тачне прорачуне јачине звука. Међутим, користан је за предвиђање области у којима ће се јавити највећа бука, што га чини употребљивим за локализацију извора буке и одређивање најкритичнијих зона у погледу звучне емисије. За прецизније прорачуне потребни су напреднији нумерички модели који узимају у обзир фреквенцијску расподјелу и акустичке ефекте окружења, као што су рефлексија, апсорпција и дифракција.



Слика 7.17. Резултати процјене јачине звука нумеричким путем:

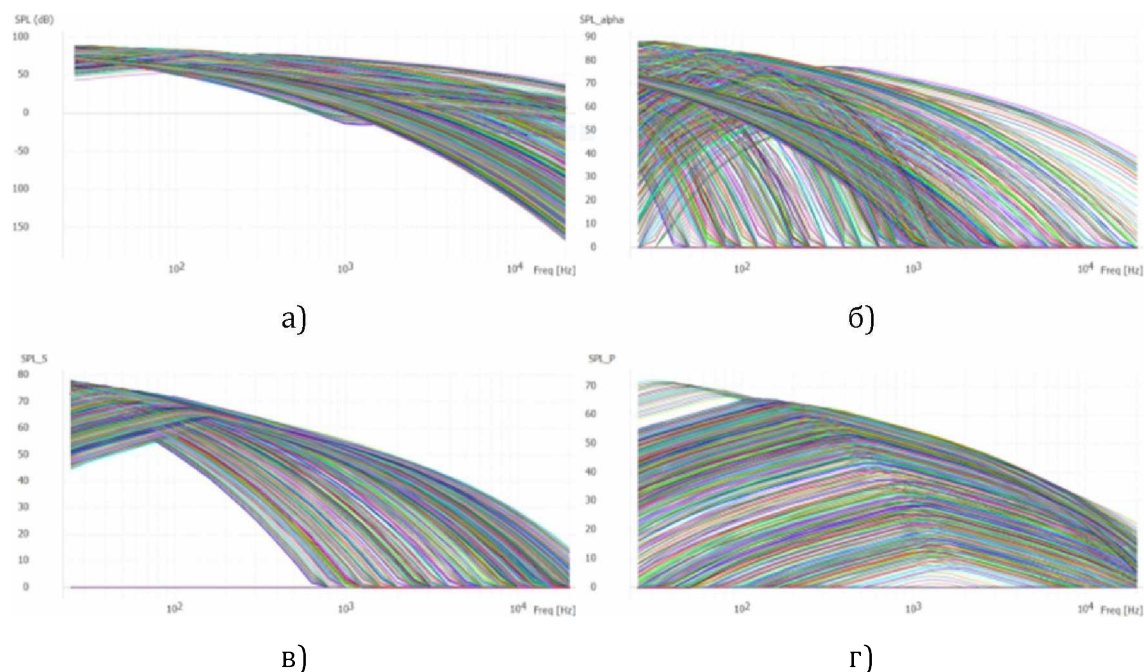
а) распоред микрофона, б) јачина звука

7.2.2. Процјена акустичких перформанси у *QBlade*-у

Једна од функција у *QBlade*-у је процјена акустичких перформанси, која омогућава симулацију звучног притиска генерисаног током рада елисе или

вјетротурбине. Аналитичким моделима буке, попут BPM (*Brooks, Pope, Marcolini*), предвиђа се ниво буке зависно од фреквенције и нападних углова.

Слика 7.18 приказује резултате симулације акустичких перформанси ротора у *QBlade*-у. Покривен је широк спектар фреквенција.



Слика 7.18. Симулација акустичких перформанси ротора у *QBlade*-у – анализа SPL спектра у зависности од: а) фреквенције; б) нападног угла; в) граничног слоја; г) притиска

Слика 7.18.а даје приказ нивоа звучног притиска SPL у зависности од фреквенције. Већи нивои буке се јављају на нижим фреквенцијама, док се губитак енергије примјећује на вишим. За фреквенције око 100 Hz, SPL је око 60–70 dB, што значи да је највише буке присутно у овом дијелу спектра. За фреквенције између 1.000 Hz и 10.000 Hz SPL опада, и у високим фреквенцијама пада испод –10 dB.

Слика 7.18.б представља анализу буке у зависности од нападног угла. Овај график показује како се мијења ниво буке када лопатица ради у

различитим условима оптерећења. За мање нападне углове SPL је виши у ниским фреквенцијама, док је за веће нападне углове бука равномерније распоређена, али има више флуктуација.

Слика 7.18.в приказује спектралну анализа буке од граничног слоја и његове интеракције са лопатицом. Разматрање овог графика је значајано у ниским и средњим фреквенцијама. За фреквенције испод 1.000 Hz, SPL је између 40 и 70 dB, док за фреквенције преко 10.000 Hz SPL пада испод 0 dB.

Слика 7.18.г приказује буку настала усљед притиска и његове промјене на површини лопатице. Крива је слична кривој са слике 7.18.в, али са нешто већим вриједностима на високим фреквенцијама. На 100 Hz SPL износи око 60–70 dB, на 1.000 Hz SPL се смањује на 30–40 dB, док је на 10.000 Hz SPL испод 10 dB. Дизајн елисе утиче на овај тип буке.

Резултати добијени у *QBlade*-у показују добра поклапања са експерименталним подацима мјерења буке [57], уз мања одступања у одређеним дјеловима фреквенцијског спектра. Општи тренд опадања звучног притиска са повећањем фреквенције потпуно одговара мјерењима. Максимална бука се јавља у ниским фреквенцијама (100–300 Hz), што је такође у складу са експерименталним подацима. Смањење SPL на високим фреквенцијама (изнад 10 kHz) присутно је и у мјерењима, што потврђује валидност модела у симулацији. Иако се моделирање у *QBlade*-у генерално добро поклапа са мјерењима, постоје одступања у одређеним фреквенцијским опсезима. Неколико је разлога који доводе до одступања:

1. Аеродинамички ефекти који нијесу потпуно обухваћени моделом, јер *QBlade* користи потенцијално струјање и гранични слој, па не обухвата у потпуности турбулентне ефекте и сложене нелинеарности. У реалним мјерењима, присутне су турбулентне флуктуације, које могу довести до малих разлика у нивоу буке.

2. Утицај окружења у експерименталним мјерењима. У лабораторијским условима или у реалном окружењу бука може бити под утицајем рефлексија, атмосферских услова, што симулација не узима у обзир. Ефекат земљишта, вјетра и температурних варијација може утицати на звучно зрачење.
3. Приближни модели акустичких извора. *QBlade* користи ВРМ модел за предвиђање буке, који се базира на приближним емпиријским формулама. У стварности, нелинеарне интеракције између вртложних структура и лопатица могу дати нешто другачије резултате.

7.2.3. FW-H акустички модел

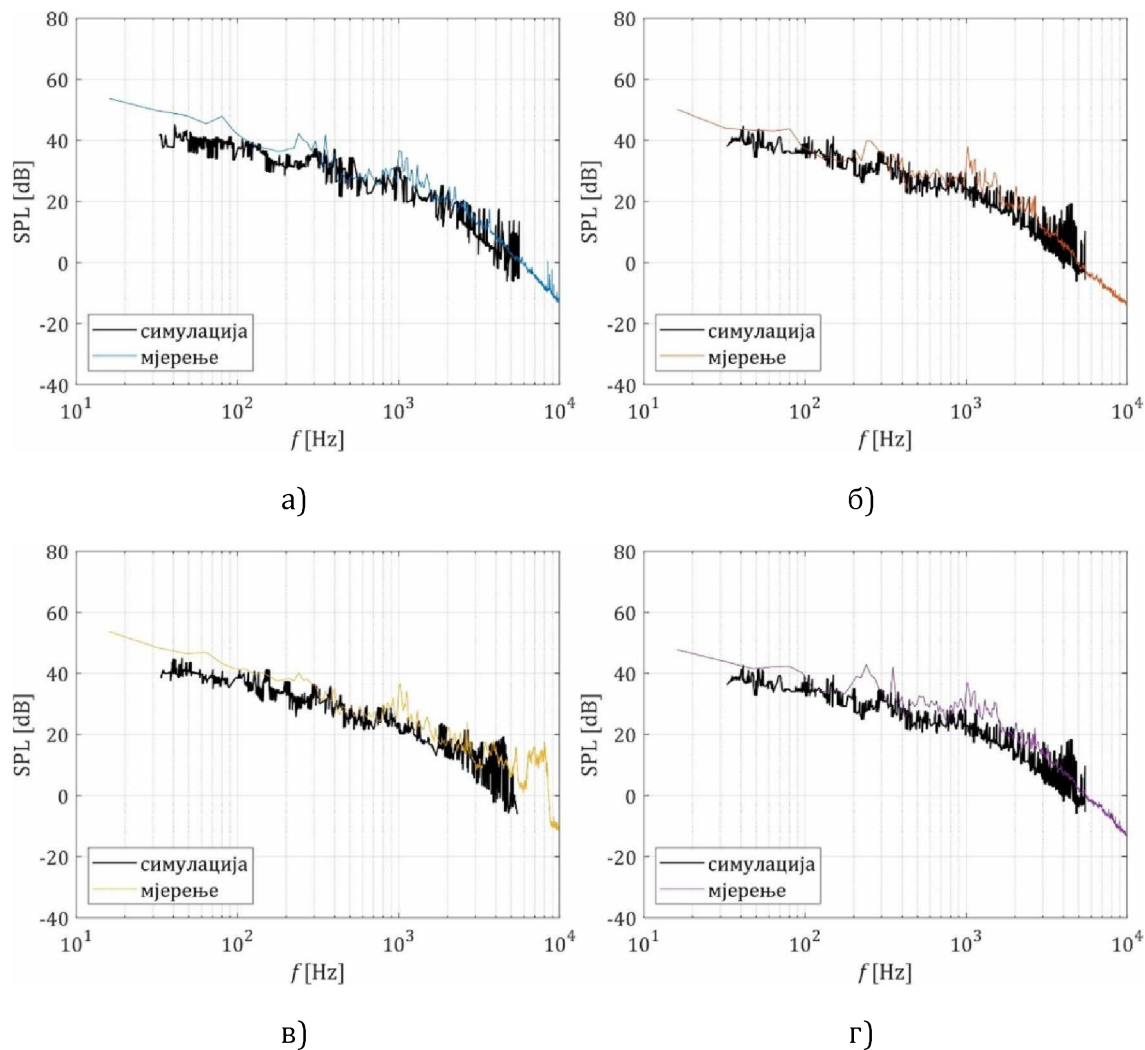
У овом поглављу су представљени и анализирани резултати добијени примјеном FW-H модела на изабрани систем. Главни циљ је да се квантификују и визуелизују кључне карактеристике акустичког поља, укључујући временске варијације звучног притиска, фреквенцијску анализу и просторну дистрибуцију емитоване буке. Прво су приказани основни подаци добијени симулацијом, након чега су резултати обрађени коришћењем временске и спектралне анализе. Посебна пажња посвећена је идентификацији доминантних извора буке и њиховој зависности од параметара система. Такође, размотрене су могуће грешке у предикцији и ограничењу самог модела, као и његова примјена у пракси. Ово поглавље пружа детаљан увид у понашање анализираног система у акустичком смислу, као и смјернице за потенцијалне мјере редукције буке, што је од великог значаја за примјену у инжењерској пракси.

Симулација је спроведена коришћењем FW-H акустичког модела у циљу анализе аероакустичких карактеристика вјетротурбине при различитим брзинама вјетра, односно у случају промјенљивог профила брзине. Овај модел

омогућава прецизно предвиђање звучних емисија услед интеракције ваздушних струја са лопатичним системом турбине, што је од кључне важности за процјену утицаја буке у околини. У оквиру симулације, постављено је укупно 12 микрофона на одређеним позицијама око вјетротурбине, како би се регистровале карактеристике звучног поља. Распоред микрофона је пажљиво осмишљен тако да обухвати најзначајније зоне емисије буке. Већи дио микрофона је распоређен низ струју, у правцу иза ротора, гдје се очекује највећа акустичка активност због турбуленција и аеродинамичких ефеката који настају приликом проласка ваздуха преко лопатица (слика 7.17.а). Управо у овом региону је густина микрофона највећа, како би се добила што детаљнија слика о карактеристикама генерисане буке. Поред микрофона који су постављени иза ротора, по додатна два микрофона налазе се испред турбине, са лијеве и десне стране, како би се испитала просторна дистрибуција звука и могуће анизотропне карактеристике емисије буке. Овај распоред омогућава анализу како предње, тако и задње звучне емисије, што је од великог значаја за разумијевање начина на који вјетротурбина утиче на своје акустичко окружење.

Кроз симулацију је омогућено детаљно испитивање утицаја промјенљивог профила брзине на аероакустичке карактеристике вјетротурбине. Добијени подаци представљају вриједан ресурс за даљу оптимизацију дизајна турбина, са циљем смањења нивоа буке и побољшања ефикасности рада при различитим условима вјетра.

Слика 7.19 приказује спектар нивоа звучног притиска за четири различите позиције микрофона (0° , 90° , 180° и 270°) око вјетротурбине за брзну вјетра од 5,5 m/s. Симулација је обављена у широком фреквенцијском опсегу (од 10 Hz до 10 kHz), а затим је извршено постпроцесирање података како би се уклонио изражени нумерички шум који се јављао на вишим фреквенцијама.



Слика 7.19. Спектар нивоа звучног притиска за четири позиције микрофона око вјетротурбине при брзини вјетра од 5,5 m/s: а) 0° – микрофон M1; б) 90° – микрофон M2; в) 180° – микрофон M7; г) 270° – микрофон M12

Резултати мјерења су добијени Велчовом (*Welch*) методом процјене густине снаге спектра (PSD), без пондерације, за исте микрофонске позиције. Мјерења су реализована у трајању од једног минута, при чему је приказ резултата дат за опсег од 10 Hz до 10 kHz. Важно је истаћи да су забиљежене сметње у сигналу микрофона постављеног на позицији од 180° (M7) у опсегу од 3 kHz до 8 kHz, које су највјероватније узроковане присуством птице у његовој близини [56].

Значајно преклапање између симулације и мјерења уочава се у ниском и средњем фреквенцијском опсегу (од ~ 20 Hz до 1 kHz). У том подручју сви микрофони показују сличан облик спектра – релативно стабилан ниво SPL-а у ниским фреквенцијама и постепен пад како се фреквенција повећава. Овај пад је очекиван и рефлектује типичну акустичку емисију вјетротурбине, гдје су нискофреквентне компоненте доминантне усљед аеродинамичког и механичког извора. У вишим фреквенцијама (изнад 1 kHz) јављају се примјетна одступања између симулације и мјерења. Иако је постпроцесирањем значајно смањен нумерички шум у симулираним подацима, још увијек су видљиве осцилације које нијесу присутне у глатким експерименталним подацима. С друге стране, мјерења показују локална одступања узрокована реалним условима из околине – најизраженије код микрофона на 180° (M7), гдје се појављује додатна компонента буке између 3 и 8 kHz. Ова појава се у извјештају о мјерењима [56] приписује проласку птице покрај микрофона. Такође, мања одступања могу бити резултат различитих фактора које нумерички модел не обухвата потпуно, попут:

- рефлексије звука од тла и околних објеката,
- турбулентне структуре вјетра у близини микрофона,
- варијација у топографији и вегетацији,
- несавршености у микрофонима и условима аквизиције током мјерења.

Микрофон на 0° – M1 (слика 7.19.а) позициониран директно у правцу вјетра, односно испред ротора, биљежи највиши ниво SPL-а у оба скупа података. Очекивано је да буде изложен директном аеродинамичком утицају лопатица. Симулација и мјерење се поклапају до отприлике 1 kHz, након чега симулација показује благу осцилацију, док је пад код мјерења уједначенији.

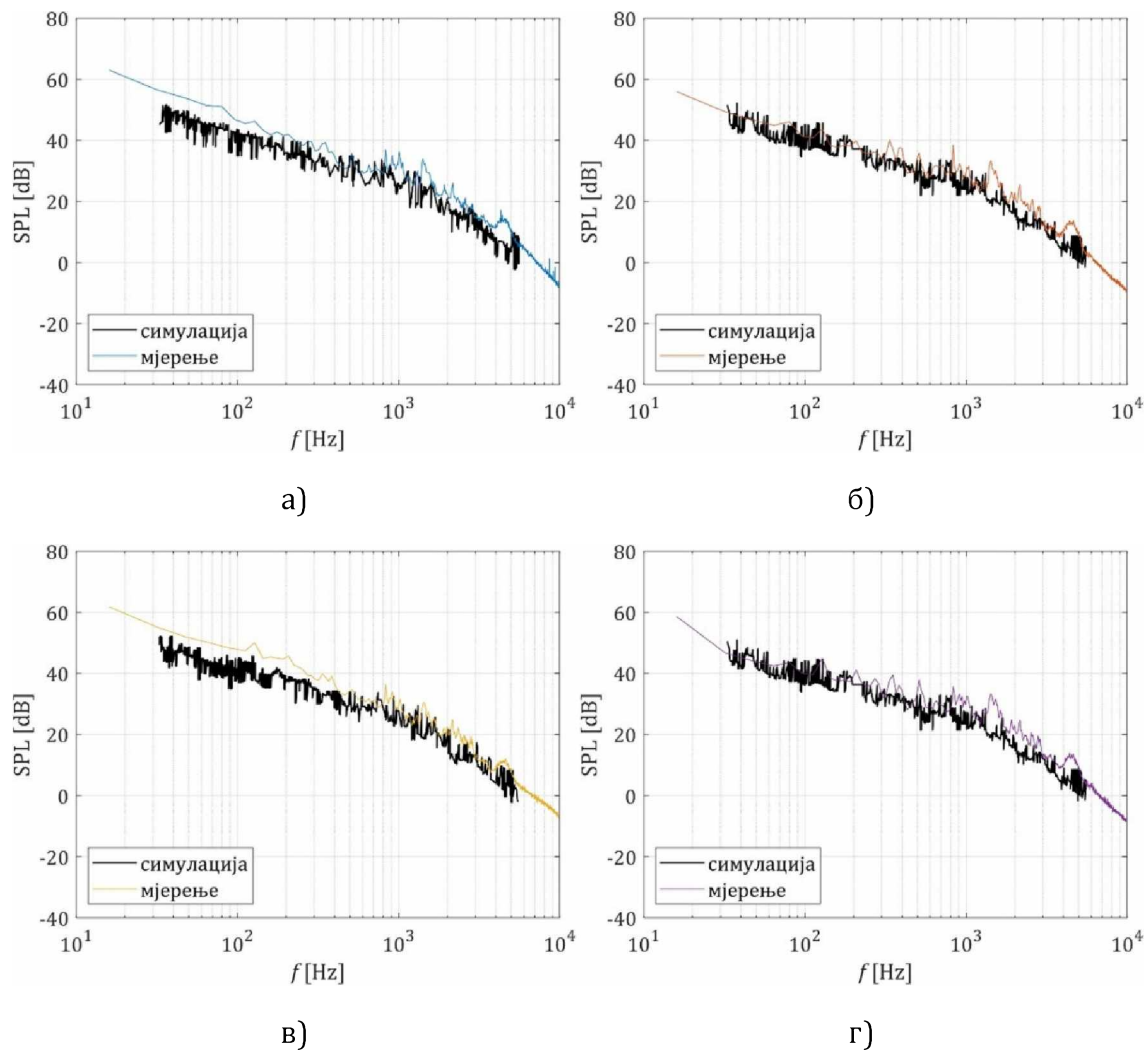
Микрофони на 90° – M2 и 270° – M12 (слике 7.19.б и 7.19.г) постављени са бочних страна турбине показују сличне резултате, и у симулацији и у

мјерењу, што потврђује симетрију акустичког зрачења у хоризонталној равни. Мање разлике у амплитуди SPL-а могу бити посљедица локалних микроклиматских услова током мјерења (нпр. густина ваздуха, влага), као и смјерних карактеристика микрофона.

Микрофон на 180° – М7 (слика 7.19.в) иза турбине показује понашање слично осталим до око 1 kHz, након чега долази до израженог пораста SPL-а у експерименталним подацима. Као што је наведено у извјештају, ово одступање није узроковано радом турбине, већ спољашњим фактором – присуством птице – што је потврђено појавом спектралне енергије искључиво на овом микрофону у врло специфичном фреквенцијском опсегу.

На слици 7.20 приказани су резултати нумеричке симулације аероакустичке емисије вјетротурбине при просјечној брзини вјетра од 8,8 m/s, те њихово поређење са експерименталним мјерењима спроведеним у истим условима. Приказан је нумерички добијени спектар нивоа звучног притиска SPL у функцији фреквенције за четири посматране позиције микрофона (0° , 90° , 180° , 270°). Кориштена је иста методологија постпроцесирања као и за остале брзине вјетра – сигнал је анализиран помоћу Велчове методе током једног минута трајања мјерења.

Нумерички резултати указују на типично понашање аероакустичке емисије за ову класу ротора: високе вриједности SPL-а у нискофреквентном дијелу спектра (10–200 Hz), уз постепени пад вриједности са порастом фреквенције. Највеће вриједности SPL-а забиљежене су између 45 и 55 dB, зависно од позиције микрофона, што одговара очекиваним вриједностима за вјетротурбину ове величине и снаге. Уочава се да су спектар и расподела вриједности SPL-а по фреквенцијама конзистентни за све четири мјерне позиције, с релативно малим варијацијама које се могу приписати просторној оријентацији микрофона у односу на ротациону раван турбине и правац вјетра.



Слика 7.20. Спектар нивоа звучног притиска за четири позиције микрофона око вјетротурбине при брзини вјетра од 8,8 m/s: а) 0° – микрофон M1; б) 90° – микрофон M2; в) 180° – микрофон M7; г) 270° – микрофон M12

Поређење са експериментално забиљеженим спектром указује на висок степен слагања између симулације и мјерења, при чему има одступања. Могући разлози за то укључују неколико фактора:

- Утицај смјера струјања вјетра – микрофон M12 на 270° је позициониран у завјетринској зони ротора вјетротурбине, гдје може долазити до појачаних вртложних структура, али и

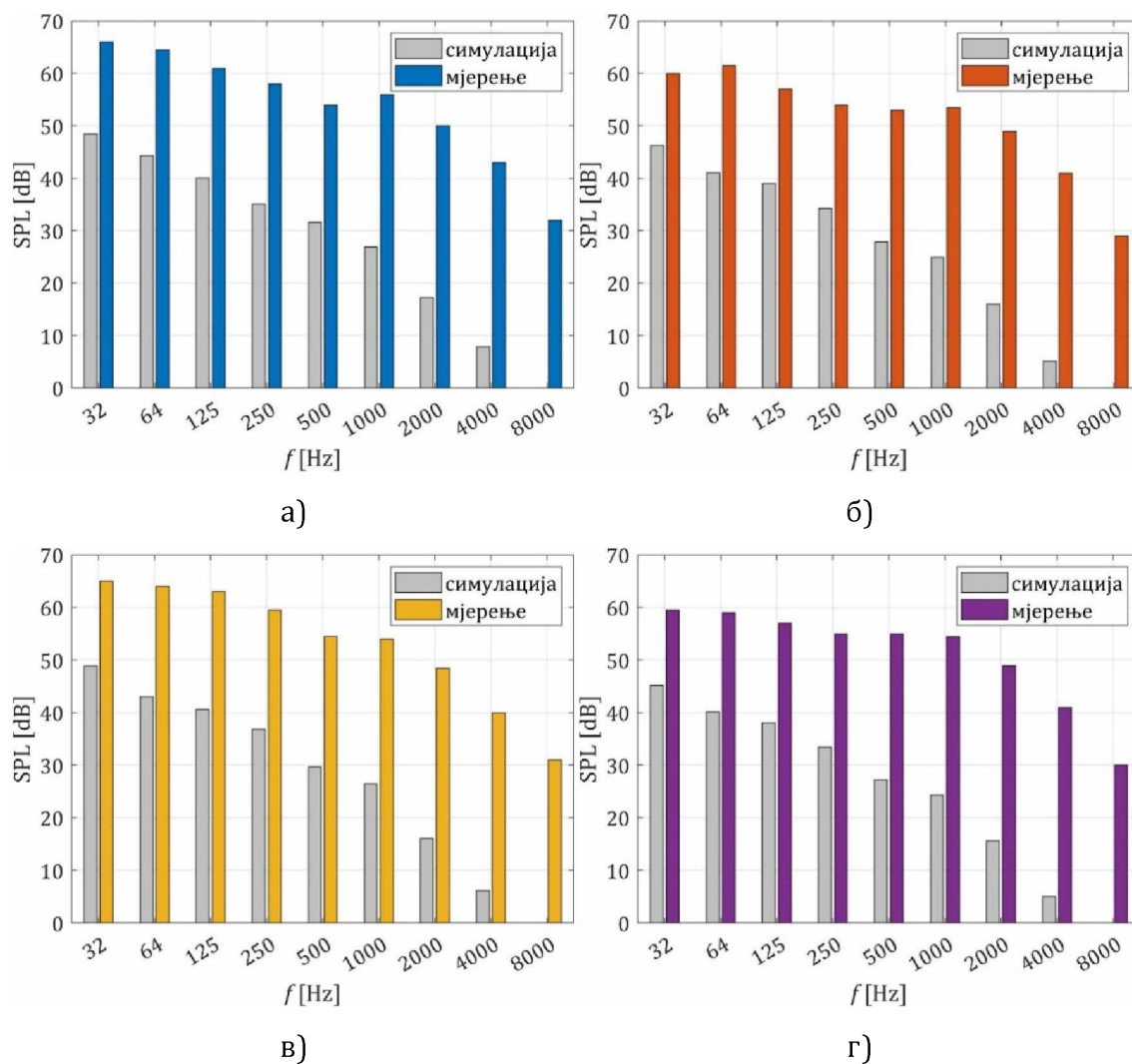
нелинеарних ефеката, који нијесу у потпуности обухваћени симулацијом.

- Рефлексије и шумови из околине – ова позиција је осјетљивија на рефлексију звука од тла и евентуалне сметње из околине (нпр. вегетација или објекти), што у стварним мјерењима може утицати на формирање додатних пикова у вишим фреквенцијама.
- Ограничења геометријског модела – као и у осталим анализама, ни овдје врх лопатице није био укључен у нумеричку геометрију, што може довести до потцјењивања емисије високофреквентних компоненти звука, посебно на микрофонским позицијама које су дијагонално оријентисане у односу на ротор.

Упркос поменутиим ограничењима, општи ниво слагања између нумеричких и експерименталних резултата остаје изузетно висок, што потврђује способност развијеног модела да поуздано предвиди просторно и фреквенцијски зависну дистрибуцију акустичке емисије при већим радним брзинама вјетра.

Слика 7.21. приказује спектар нивоа звучног притиска по једној трећини октаве у зависности од фреквенције за претходно разматране четири позиције микрофона око вјетротурбине (0° , 90° , 180° и 270°) при брзини ветра од 8,8 m/s. Мјерења [56] су извршена у условима нормалног рада, што значи да је систем радио у пуној оперативној способности. Дијаграми јасно показују опадајући тренд звучног притиска са порастом фреквенције. Највиши нивои SPL-а регистровани су у опсегу од 32 до 250 Hz, гдје су вриједности износиле више од 60 dB, док су на највишим фреквенцијама (4000–8000 Hz) вриједности опале на 30–40 dB. То указује на доминацију нискофреквентних компоненти у звучној емисији, што је типично за велике механичке системе, попут турбина, код којих механичке вибрације и аеродинамички шум имају пресудан утицај. Разлике у нивоу звучног притиска између смјерова постоје, али су релативно

мале (2 – 5 dB), што указује на умјерену анизотропију емисије, тј. да извор није потпуно симетричан, али да не постоје изразито доминантни правци емисије.



Слика 7.21. Спектар нивоа звучног притиска по једној трећини октаве за четири позиције микрофона око вјетротурбине при брзини ветра од 8,8 m/s:

- а) 0° – микрофон М1; б) 90° – микрофон М2; в) 180° – микрофон М7;
г) 270° – микрофон М12

Приликом поређења мјерених података са резултатима нумеричке симулације, уочено је просјечно одступање величине 20%, при чему симулација у већини случајева потцјењује ниво звучног притиска у односу на

стварна мјерења. Ово упућује на закључак да модели који се користе у симулацији не уважавају у потпуности све изворе буке и сложеност простирања звучних таласа у реалним атмосферским и теренским условима.

Фактори који доприносе овом одступању подразумевају:

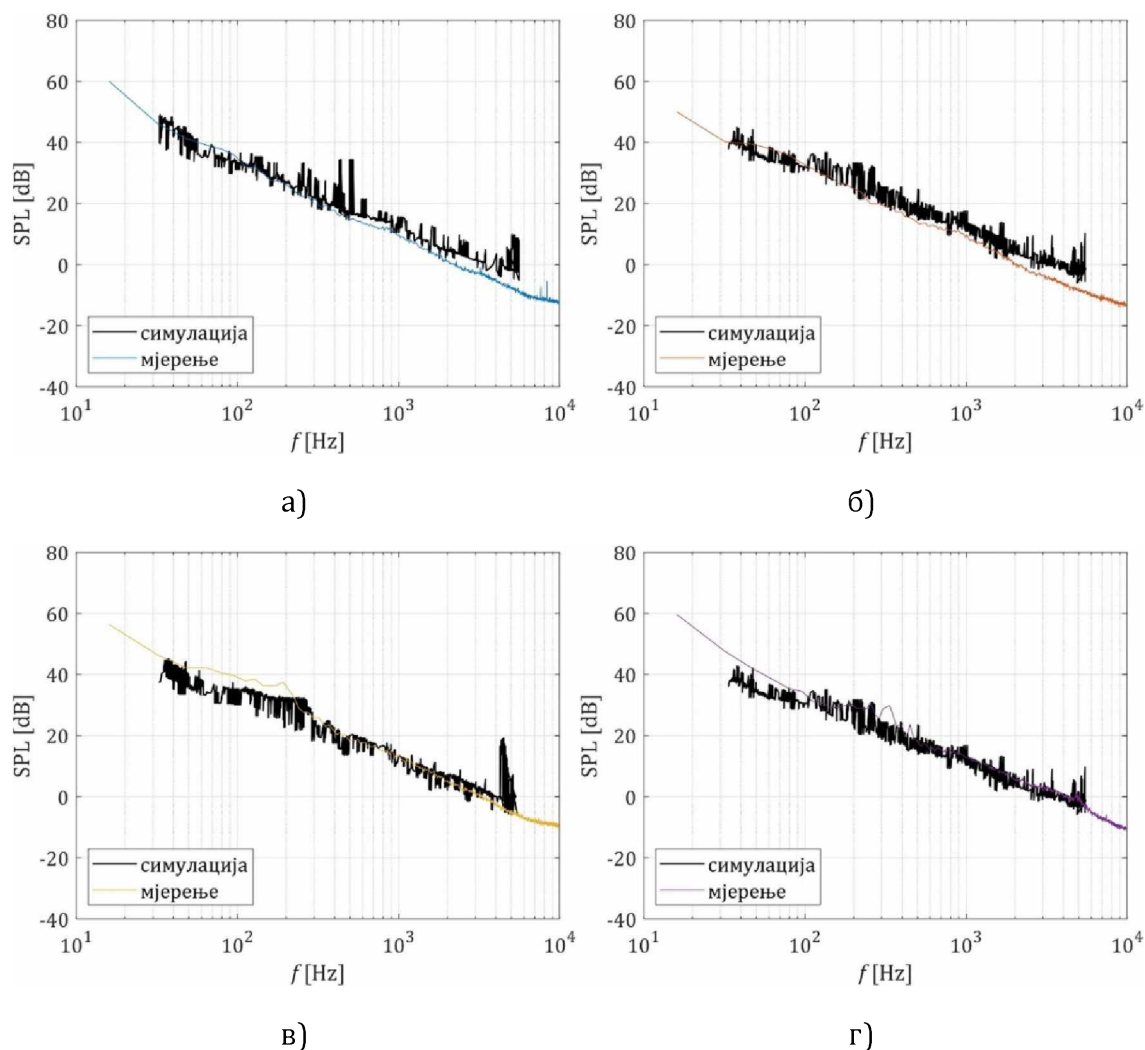
- Идеализацију услова у симулацији, гдје се занемарују сложени ефекти као што су локалне турбуленције, рефлексије од терена и ефекти температурне расподеле по висини;
- Недовољну укљученост секундарних извора буке, као што су механички спојеви, струјне интерференције и аеродинамичке нестабилности;
- Мјерне несигурности, али и реалне варијације услова током експеримента, које је тешко унапријед предвидјети и уградити у симулациони модел.

Упркос томе што симулација потцјењује апсолутне нивое, одступање од око 20% се у инжењерској акустици сматра прихватљивим, посебно када се узму у обзир сложеност звучног поља и динамика околине. Симулација пружа добар квалитативни приказ и може бити корисна у фази пројектовања и процјене утицаја, али је њено коришћење за апсолутне процјене буке потребно надопунити емпиријским корекцијама заснованим на мјерењима.

На слици 7.22 приказани су резултати нумеричке симулације аероакустичке емисије вјетротурбине при просјечној брзини вјетра од 9,1 m/s и њихово поређење са експерименталним мјерењима спроведеним у истим условима. И у мјереним и у нумерички добијеним подацима, уочава се јасан тренд опадања звучног притиска са порастом фреквенције. Такав тренд је очекиван и физички оправдан, будући да:

- на нижим фреквенцијама доминирају позадински шумови (попут вјетра, турбуленција, инфраструктурног шума);

- на вишим фреквенцијама постоји већа апсорпција у атмосфери, као и дисперзија таласа, што доприноси слабљењу сигнала.



Слика 7.22. Спектар нивоа звучног притиска за четири позиције микрофона око вјетротурбине при брзини вјетра од 9,1 m/s: а) 0° – микрофон M1; б) 90° – микрофон M2; в) 180° – микрофон M7; г) 270° – микрофон M12

У оба случаја, криве за различите смјерове (0°, 90°, 180°, 270°) прате веома слични трендови, што указује да су и у мјерењима и у симулацији доминантни фреквенцијски ефекти барем у средњем опсегу (100 Hz – 2 kHz).

Разлике у апсолутном нивоу SPL описане су у наставку.

1. Ниске фреквенције (10 Hz – 100 Hz)

Мјерени подаци показују знатно веће нивое SPL у односу на нумеричке. На примјер, мјерене вриједности могу достићи 60–70 dB, док су симулиране вриједности ближе 40 dB. Ова разлика указује на присуство реалних извора нискофреквентног шума у окружењу током мјерења, као што су: турбулентни вјетар, микрофонски шум, инфраструктурна вибрација (путеви, далеководи), али и рефлексије од терена. Нумерички модел не укључује ове факторе, већ симулира акустичко поље у идеалним условима без позадинских извора шума.

2. Средње фреквенције (100 Hz – 2 kHz)

У овом опсегу мјерења и симулације показују најбоље поклапање – разлика у SPL је мања од 5 dB у већини тачака. То указује на исправно постављене граничне услове у моделу и адекватно дефинисане изворе/пријемнике у симулацији. Такође, симетричност кривих по смјеровима сугерише да је модел успјешно регистровао доминантне ефекте ширења таласа у овом фреквентном опсегу.

3. Високе фреквенције (> 2 kHz):

Измјерени подаци показују виши ниво звучног притиска (SPL) у односу на симулиране резултате. Ова одступања могу се објаснити тиме што током мјерења долази до рефлексија са оближњих објеката, као што су тло или структура микрофона, што повећава енергију у подручју виших фреквенција. Насупрот томе, у нумеричком моделу, уколико није обезбијеђена довољно висока резолуција мреже, јављају се дисперзија и апсорпција таласа при вишим фреквенцијама, што доводи до нижег SPL-а у симулацијама. Иако су у оба случаја све четири криве за различите смјерове сличне по облику, постоје неке нијансе:

- Мјерени подаци: највеће разлике по смјеру примјећују се на фреквенцијама испод 200 Hz. На примјер, у неким случајевима 90° и

180° имају нешто нижи SPL, што може бити посљедица стварног правца доласка вјетра или звучног сигнала.

- Нумерички подаци: смјерови показују скоро идентичне трендове, са нешто више разлика око 300–700 Hz, што може указивати на модалне ефекте у моделу.

Мјерени подаци углавном показују глађе спектралне криве, што је резултат временског осредњавања и могућег филтрирања током обраде. Присуство реалних извора доприноси већој стабилности спектра. С друге стране, нумерички подаци чешће садрже флукутације, нарочито у средњем фреквентном опсегу, што је посљедица резонантних ефеката унутар модела, недовољне густине мреже или ограниченог броја фреквентних тачака коришћених у обради.

Један од значајних изазова у примјени нумеричког модела био је присуство нумеричких сметњи, нарочито у високофреквентном дијелу спектра. Ове сметње су се манифестовали као спектрални шум и осцилације које нијесу имале физичку основу, а потичу од дискретизације и особина коришћених метода рјешавања. Примјеном техника филтрирања и спектралног изглађивања у фази постпроцесирања, ти утицаји су у великој мјери санирани, што је довело до поузданије реконструкције реалних акустичких ефеката који потичу од ротирајућих и турбулентних струјања око лопатица. Захваљујући овоме, значајно је побољшана квалитативна интерпретација добијених резултата, као и могућност поређења са мјереним подацима.

Кључни извор одступања у симулираним резултатима потиче од упрошћене геометрије модела. Из практичних разлога, ради смањења рачунарске сложености и убрзања симулације, у модел није укључена детаљна структура врха, иако је управо тај дио познат као доминантан генератор високофреквентне буке. У том региону, усљед интензивног генерисања

вртложног система, долази до значајног пораста нивоа звучног притиска, који у симулацији остаје потцијењен. Изостанак овог елемента доводи до систематског потцјењивања SPL-а у опсегу изнад 1 kHz, што утиче на тачност модела у том фреквенцијском домену. Поред тога, симулација не обухвата разне структуралне и теренске детаље, попут стуба турбине, каблова, вегетације, неправилности терена и других објеката присутних у реалном окружењу. Ови елементи могу да изазову рефлексије, дифракције и резонантне ефекте, који се у мјереном спектру манифестују као локални пикови или одступања. Њихово изостављање утиче на додатну разлику између симулације и мјерења, посебно у средњем и високом фреквенцијском домену.

Анализом компаративних резултата за различите брзине вјетра, уочено је да нумерички модел, упркос добром квалитативном поклапању, систематски потцјењује апсолутне нивое звучног притиска, у просјеку за око 20% у односу на мјерене податке. Ова разлика је најизраженија у фреквенцијама изнад 1 kHz, гдје је утицај геометријских поједностављења и недостатак комплекса извора буке највећи. Упркос наведеним ограничењима, развијени нумерички модел показује способност да вјерно прикаже доминантне обрасце емисије буке вјетротурбина и у добром степену корелира са експерименталним мјерењима у широком фреквенцијском и оперативном опсегу. Такав модел представља користан алат за иницијалну процјену акустичког утицаја у фази пројектовања и оптимизације конфигурације турбина.

Да би се постигла већа тачност и боља усаглашеност са експерименталним резултатима, препоручује се:

- укључивање детаљне геометрије лопатица, посебно вршних зона,
- моделовање реалног окружења и теренских карактеристика,
- примјена напреднијих метода за симулацију ширења звука.

Са овим побољшањима, нумеричка симулација може постићи виши ниво предиктивне поузданости и представљати суштински алат у анализи и контроли буке из вјетротурбина.

7.2.4. Утицај буке на птице

Птице показују различите степене осјетљивости на нискофреквентни шум, у зависности од врсте и еколошких услова у којима живе. Истраживања су показала да врсте као што су голубови (*Columba Livia*) и дивље кокошке (*Gallus Gallus Domesticus*) могу регистровати звуке фреквенције 20 Hz при интензитету од око 60 dB, што указује на релативно умјерену способност перцепције инфразвука. Насупрот њима, птице попут тигрица (*Melopsittacus Undulatus*) и дивљих патки (*Anas Platyrrhynchos*) имају виши праг чулне осјетљивости, при чему инфразвук детектују тек при интензитету око 90 dB. Посебно је занимљива група сова (породица *Strigidae*), код којих је утврђена знатно већа ојсетљивост на ниске фреквенције – већ од 10 до 20 dB на 250 Hz. [80]

Иако већина птица има аудитивни опсег највеће осјетљивости у зони између 2 и 6 kHz, са доњом границом слуха од око 300 Hz, поједине врсте су способне да детектују и фреквенције испод 20 Hz, што је карактеристично за инфразвук. Ова способност има значајне функционалне и еколошке импликације. На примјер, код златнокриле сјенице (*Vermivora Chrysoptera*) забиљежено је напуштање гнијезда неколико сати прије доласка торнада, што се тумачи као реакција на инфразвучне сигнале које производе олујни системи. [81]

Претходни подаци указују на то да чулна перцепција нискофреквентног звука код птица може играти важну улогу у орјентацији, избјегавању опасности и прилагођавању на промјене у окружењу. На основу резултата приказаних на сликама 7.19–7.22 може се закључити да вјетротурбина која је

предмет разматрања ове дисертације производи звук на који су све горе наведене птице осјетљиве.

8. ЗАКЉУЧАК

Циљ ове докторске дисертације био је истраживање и анализа феномена генерисања нискофреквентне буке током рада вјетротурбина, са фокусом на развоју и валидацији нумеричких модела који могу поуздано да опишу аеродинамичке и акустичке процесе у условима реалног струјања. Истраживање је имало двоструку орјентацију:

- детаљну аеродинамичку анализу турбуленције и струјања око лопатица вјетротурбине као примарног узрочника буке,
- испитивање ефикасности рада и акустичког понашање турбине.

Извршена је аеродинамичка анализа вјетротурбина поређењем CFD и BEMT метода са експерименталним подацима, као и анализа нестационарног струјања око вјетротурбине при промјенљивим брзинама. Резултати су показали да се, уз примјену CFD метода, могу прецизно моделирати сложени аеродинамички феномени који се јављају у реалним условима рада вјетротурбина, посебно у окружењу са варијабилним брзинама вјетра по висини.

Поређењем CFD симулација са експерименталним подацима утврђено је да савремени CFD модели пружају висок степен тачности у предвиђању аеродинамичких перформанси, док је BEMT модел показао нешто мање преклапање са подацима мјерења. Иако BEMT метода има своје предности у погледу брзине симулације, њена ограничења произилазе из поједностављења које укључује, те је стога погоднија за грубе процјене и оптимизацију дизајна.

Анализа нестационарног струјања око лопатица вјетротурбине, нарочито у условима промјенљивих брзина вјетра, открила је сложене

аеродинамичке обрасце који укључују области велике брзине на врховима лопатица и рецикулације близу коријена. Такође, интеракције између лопатица и вртлога, као и утицај турбуленције, значајно утичу на аеродинамичку ефикасност. Ови резултати истичу важност прецизног моделирања и оптимизације дизајна вјетротурбине како би се смањили губици енергије и побољшала ефикасност рада вјетротурбина. Поређење ових резултата добијених симулацијом са експерименталним подацима и даље је кључно за валидацију и усавршавање нумеричких модела. Будућа истраживања могу проширити овај рад укључивањем реалнијих услова околине и напреднијих техника симулације, као што су LES (*Large Eddy Simulation*) и мултифизичке симулације које интегришу структурну динамику са аеродинамичким понашањем. Ово ће омогућити детаљније разумијевање и даљи развој вјетротурбина са побољшаним аеродинамичким перформансама и ефикасношћу.

Поред тога, значајан допринос овом истраживању дају експериментална мјерења спроведена на локацији реалне вјетротурбине, у складу са примијењеним методама. Циљ тих мјерења био је да се анализира усмјереност буке, утицај брзине вјетра на ниво звука, као и присуство инфразвучних компоненти и модулација амплитуде.

Посебна пажња посвећена је истраживању корелације буке са радним режимом турбине, како би се идентификовали различити извори звучног загађења. На тај начин, извршена је верификација и валидација развијених нумеричких модела кроз поређење са мјереним подацима у реалним условима рада турбине. Добијени резултати потврдили су поузданост примијењене методологије.

Са акустичког аспекта, испитана су три различита модела: *Broadband* модел – модел широкопојасног шума, *QBlade* BEMT модел и *Ffowcs Williams–Hawkings* (FW-H) модел.

Спроведена нумеричка анализа, заснована на широкопојасном акустичком моделу, представља поуздану основу за квантификацију и просторну визуелизацију аероакустичке буке генерисане радом вјетротурбине. Модел је омогућио симулацију интеракције турбулентног струјања са лопатицама и процјену нивоа звучног притиска у различитим тачкама у простору. Резултати су показали да су највиши нивои акустичке емисије концентрисани дуж ивица лопатица ротора, што указује на то да су аеродинамичка турбуленција, вртлози и резонантне појаве у граничном слоју главни извори буке. Примјена оваквих симулација има широк спектар употребе – од оптимизације дизајна лопатица вјетротурбина, преко побољшања енергетске ефикасности, до минимизовања акустичког утицаја на становништво и природну средину. Модел широкопојасног шума, иако једноставан и рачунарски ефикасан, показао је ограничења у спектралној анализи и просторном дефинисању извора.

Акустичке перформансе анализиране у *QBlade*-у путем симулације звучног притиска показују значајне информације о буци коју генерише рад ротора вјетротурбине. Резултати симулације, засновани на аналитичким моделима као што је BPM модел, показују добро поклапање са експерименталним подацима, нарочито у погледу опадања SPL-а са повећањем фреквенције. Највиши нивои буке примијећени су у ниским фреквенцијама (100–300 Hz), што одговара експерименталним мјерењима. Симулирана смањења SPL-а на високим фреквенцијама (> 10 kHz) такође су у складу са стварним подацима, потврђујући тачност модела. Иако је модел у већини случајева прецизан, уочена су мала одступања у одређеним дјеловима фреквенцијског спектра. Ова одступања су узрокована различитим факторима као што су комплексност самог процеса буке, појединачни услови рада турбине и прецизност примијењених аналитичких модела. Све у свему, симулације у *QBlade*-у пружају корисне увиде у акустичке перформансе и могу бити корисне за оптимизацију дизајна и смањење буке у вјетротурбинама.

Основни циљ FW-H модела био је да се квантификују и визуелизују кључне акустичке особине система, као што су временске варијације звучног притиска, фреквенцијска расподела и просторна дистрибуција емитоване буке. Симулације су спроведене за различите брзине вјетра, а резултати су упоређени са експерименталним подацима, што је омогућило боље сагледавање акустичког поља и могућих ограничења модела.

Резултати показују високу сагласност између симулација и стварних мјерења у ниским и средњим фреквенцијским опсезима, док се у вишим фреквенцијама јављају одступања, што је проузроковано недовољним укључивањем фактора као што су: рефлексије, локалне турбуленције и окружење. Ова одступања указују на потребу за додатним побољшањем модела како би се боље укључили ови ефекти. Иако је симулациони модел користан за предвиђање акустичког поља и процјену утицаја буке, одступања у неким дјеловима спектра указују на потребу за емпиријским корекцијама у фазама пројектовања и процјене утицаја. Међутим, с обзиром на сложеност акустичког поља и динамику околине, разлика од око 20% између симулације и експерименталних података може се сматрати прихватљивом у инжењерској пракси. Овај модел даје значајан допринос разумијевању аероакустичких карактеристика вјетротурбина, као и могућностима оптимизације у циљу смањења буке и побољшања ефикасности у различитим радним условима.

Резултати симулација указали су да облик и геометријске карактеристике лопатица директно утичу на амплитуду и домет емитоване буке. Посебно је уочено да вршни дио лопатице генерише најинтензивније акустичке поремећаје. Међутим, треба напоменути да су одређена одступања у геометрији настала због поједностављења модела, у којем није узет у обзир врх лопатице. Ово је урађено из разлога рачунарских капацитета и оптимизације мреже, што значи да су неки детаљи изостављени како би се

омогућило брже рачунарско рјешавање. Потврђено је и да пасивне мјере попут модификација врха лопатице и обраде површине могу знатно умањити буку без губитка ефикасности.

На основу добијених резултата, све постављене хипотезе су потврђене.

- X1: CFD модели успјешно описују генерисање нискофреквентне буке.
- X2: Бука садржи компоненте унутар осјетљивости слуха птица.
- X3: Храпавост и геометрија лопатица утичу на ниво и ширење буке.
- X4: Модели велике тачности и мање сложености омогућавају процјену утицаја на животну средину.

Научни допринос овог рада огледа се у развоју свеобухватног CFD-FW-H система за симулацију аеродинамике и буке, који је експериментално валидован кроз компарацију са реалним подацима, чиме је постигнута висока тачност симулација у различитим радним условима. Овај систем представља значајан корак у унапређењу разумијевања аеродинамике и акустичких карактеристика лопатица турбина, са посебним акцентом на изворе буке који потичу од различитих дјелова турбине. Практичан значај овог рада је у његовој примјени у различитим фазама пројектовања турбина, укључујући оптимизацију аеродинамичких својстава ради повећања ефикасности и смањења акустичког загађења. Такође, резултати могу значајно допринијети планирању локација за изградњу вјетроелектрана, што укључује како минимизацију буке у близини насељених подручја, тако и оптимизацију постављања турбина у односу на вјетар и друге факторе који утичу на перформансе и животну средину. Ово је од посебне важности у контексту заштите природе, нарочито у погледу утицаја на локалне екосистеме и заштиту животињских врста, као што су птице које су осјетљиве на акустичке и аеродинамичке промјене.

За будућа истраживања препоручује се проширење на LES симулације, које ће омогућити боље праћење нестационарне турбуленције и њених ефеката на динамику струјања и акустичке карактеристике. LES симулације омогућавају прецизније моделовање велике турбулентне струје и њихову интеракцију са површинама турбине, што је важно за разумевање и минимизовање акустичког зрачења. Такође, препоручује се имплементација мултифизичких модела који укључују вибрације, акустичке повратне спреге и утицаје околине, као што су атмосферски услови и интеракције са другим објектима у близини. Ово би омогућило интегрисан приступ у анализи и оптимизацији цјелокупног система, у контексту различитих инжењерских и еколошких захтјева, као и боље разумевање комплексних повратних ефеката између аеродинамике и акустике.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] IEA – International Energy Agency. https://www.iea.org/energy-system/renewables/wind?utm_source
- [2] IRENA, Renewable Energy and Jobs: Annual Review 2024. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Oct/IRENA_Renewable_energy_and_jobs_2024.pdf
- [3] Manwell JF, McGowan JG, Rogers AL. Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. Chichester: John Wiley & Sons Ltd; 2009.
- [4] Jonkman J, Butterfield S, Musial W, Scott G. Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory; 2009.
- [5] International Renewable Energy Agency. Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050. <https://www.irena.org/publications/2019/Apr/Global-energy-transformation-A-roadmap-to-2050-2019Edition>
- [6] Pavlović M. Izbor materijala za lopatice vjetroturbina. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu; 2023.
- [7] National Renewable Energy Laboratory. Smola napravljena od biomase unapređuje metodu za proizvodnju lopatica vjetroturbina koje se mogu reciklirati. Okvir.net; 2024.
- [8] Betz A. Wind-Energie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht; 1920.
- [9] Joukovski V. Theoretical Studies on the Aerodynamics of Wind Turbines. 1920.
- [10] Glauert H. The Elements of Aerofoil and Airscrew Theory. Cambridge: The University Press; 1948.

- [11] Sørensen JN. Aerodynamic Aspects of Wind Energy Conversion. *Annu Rev Fluid Mech.* 2011;43(1):427-448. doi:10.1146/annurev-fluid-122109-160801.
- [12] Sørensen JN. General Momentum Theory for Horizontal Axis Wind Turbines. Cham: Springer; 2016.
- [13] Sørensen JN. Aerodynamic Analysis of Wind Turbines. *Comprehensive Renewable Energy.* 2022;2:172-193. doi:10.1016/B978-0-12-819727-1.00127-8.
- [14] Abobark AT, et al. Computational Fluid Dynamics (CFD) Investigation of NREL Phase VI Wind Turbine Performance Using Various Turbulence Models. *Processes.* 2024;12(9):1994. doi:10.3390/pr12091994.
- [15] Pajčin MP, et al. Comparative analysis of numerical computational techniques for determination of the wind turbine aerodynamic performances. *Thermal Science.* 2021;25(4A):2503-2515. doi:10.2298/TSCI200216175P.
- [16] Eolos Wind Research Station. Eolos Wind Research Station. University of Minnesota. <https://eolos.umn.edu/eolos-wind-researchstation>
- [17] Lighthill MJ. On Sound Generated Aerodynamically, I. General Theory. *Proc R Soc Lond A.* 1952;211:564-587.
- [18] Powell A. Mechanisms of Aerodynamic Sound Production. AGARD Report 466, April 1963.
- [19] Powell A. Theory of Vortex Sound. *J Acoust Soc Am.* 1964;36(1):177-195.
- [20] Blake WK. *Mechanics of Flow-Induced Sound and Vibration, Vol. II: Complex Flow Structure Interactions.* New York: Academic Press Inc., Harcourt Brace Jovanovich, Publishers; 1986. p. 426-973.
- [21] Ffowcs Williams JE, Hall LH. Aerodynamic Sound Generation by Turbulent Flow in the Vicinity of a Scattered Half Plane. *J Fluid Mech.* 1970;40(4):657-670.
- [22] Wagner S, Bareiß R, Guidati G. *Wind turbine noise.* Berlin: Springer; 2012.

- [23] Buck S, Oerlemans S, Palo S. Experimental characterization of turbulent inflow noise on a full-scale wind turbine. *J Sound Vib.* 2016;385:219-238.
- [24] Oerlemans S. Wind turbine noise: primary noise sources. National Aerospace Laboratory NLR; 2011.
- [25] Hansen K, Kelso R, Doolan C. Reduction of flow induced tonal noise through leading edge tubercle modifications. 16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference; 2010.
- [26] Paruchuri C, Subramanian N, Joseph P, Vanderwel C, Kim J, Ganapathisubramani B. Broadband noise reduction through leading edge serrations on realistic aerofoils. 21st AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference; 2015.
- [27] Huang X. A theoretical study of serrated leading edges in aerofoil and vortical gust interaction noise. *Adv Aerodyn.* 2019;1(10).
<https://link.springer.com/article/10.1186/s42774-019-0010-y>
- [28] Geyer TF, Sarradj E, Fritzsche C. Experimental study of airfoil leading edge combs for turbulence interaction noise reduction. *Aerospace.* 2019;2(2):14.
<https://www.mdpi.com/2624-599X/2/2/14>
- [29] Wang L, Liu L, Zhang X, Zhang S. Noise reduction mechanism of airfoils with leading-edge serrations and surface ridges inspired by owl wings. *Phys Fluids.* 2021;33(1):015123.
<https://pubs.aip.org/aip/pof/article-abstract/33/1/015123/1061174>
- [30] Zhu H, Xu H, Zhang W, Ma Y, Li C. Turbulence airfoil interaction noise reduction by leading-edge serration under different inflow conditions. *AIAA SciTech Forum.* 2024; Paper No. AIAA-2024-3224.
<https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2024-3224>
- [31] Williams J, Hall L. Aerodynamic sound generation by turbulent flow in the vicinity of a scattering half plane. *J Fluid Mech.* 1970;40(4):657.
- [32] Herr M. Design criteria for low-noise trailing-edges. 13th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference; 2007.

- [33] Finez A, Jacob M, Jondeau E, Roger M. Broadband noise reduction with trailing edge brushes. 16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference; 2010.
- [34] Avallone F, Ragn D. Turbulent-boundary-layer trailing-edge noise reduction technologies including porous material. Wind Energy Eng. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99353-1.00002-5>
- [35] Geyer T, Sarradj E, Fritzsche C. Measurement of the noise generation at the trailing edge of porous airfoils. Exp Fluids. 2009;48(2):291-308.
- [36] Kinzie K, Drobietz R, Petitjean B, Honhoff S. Concepts for wind turbine sound mitigation. AWEA Wind Power; 2013.
- [37] Gstrein F, et al. Airfoil trailing-edge noise reduction by application of finlets. Am Inst Aeronaut Astronaut. <https://doi.org/10.2514/1.1060699>
- [38] Luesutthiviboon S. Assessing and improving trailing-edge noise reduction technologies for industrial wind-turbine applications. [Dissertation (TU Delft), Delft University of Technology]; 2022. <https://doi.org/10.4233/uuid:23e2f72e-2502-4f4a-9504-ba607bae0364>
- [39] Madsen H, Fuglsang P. Numerical investigation of different tip shapes for wind turbine blades. RISO-R-891(EN); 1996.
- [40] Fleig O, Iida M, Arakawa C. Wind turbine blade tip flow and noise prediction by large-eddy simulation. J Sol Energy Eng. 2004;126(4):1017.
- [41] Maizi M, Mohamed M, Dizene R, Mihoubi M. Noise reduction of a horizontal wind turbine using different blade shapes. Renew Energy. 2018;117:242-256.
- [42] Deshmukh S, Bhattacharya S, Singh V, Kumar R. Aerodynamic and aeroacoustic study of horizontal axis wind turbine with winglets. B.Tech Thesis, Department of Mechanical Engineering, MNNIT Allahabad, India; 2018.
- [43] Iswahyudi S, Wibowo SB, Suyitno S, Suprihanto A. Aerodynamic performance and noise characteristics of modified blade tip of small HAWT. J Eng Technol Sci. 2024;56(5):639-651. doi:10.5614/j.eng.technol.sci.2024.56.5.8.

- [44] Li B, Ye Y, Dai Y. Aerodynamic noise distribution in wind turbines with different microporous blade tip structures. *Fluid Dyn Mater Proc.* 2024;20(12):2809–2842. doi:10.32604/fdmp.2024.054011.
- [45] Lighthill MJ. On sound generated aerodynamically, II. Turbulence as a source of sound. *Proc R Soc Lond A.* 1954;222:1-32.
- [46] Ramachandran RC, Raman G, Dougherty RP. Wind turbine noise measurement using a compact microphone array with advanced deconvolution algorithms. *J Sound Vib.* 2014;333:3058–3080.
- [47] Wagner S, Bareiß R, Guidati G. *Wind turbine noise.* Berlin: Springer Berlin Heidelberg; 1996.
- [48] Blake WK. *Mechanics of flow-induced sound and vibration, Volume 2: Complex flow-structure interactions.* New York: Academic Press; 2017.
- [49] <https://presentacijavetroagregati.wordpress.com/2015/04/>
- [50] Vectorstock. Single wind turbine vector. <https://www.vectorstock.com/royalty-free-vector/single-wind-turbine-vector-15494171>
- [51] Das A, Talapatra PK. Modelling and analysis of a mini vertical axis wind turbine. *Int J Emerg Technol Adv Eng.* 2016;6(6):2250-2459.
- [52] Tchakoua P, Wamkeue R, Ouhrouche M, Slaoui-Hasnaoui F, Tameghe TA, Ekemb G. Wind turbine condition monitoring: State-of-the-art review, new trends, and future challenges. *Energies.* 2014;7:2595–2630.
- [53] Liu B, et al. Estimating hub-height wind speed based on a machine learning algorithm: implications for wind energy assessment. *Atmos Chem Phys.* 2023;23:3181–3193. doi:10.5194/acp-23-3181-2023.
- [54] Babadi Soltanzadeh M, et al. Isfahan wind turbine modeling. *Majlesi J Energy Manag.* 2012;2(4).
- [55] Tumewu Y, Petrone C. Numerical simulation of the influence of platform pitch motion on power generation steadiness in floating offshore wind turbines. *Environ Sci Sustain Dev.* 1(2):9. doi:10.21625/essd.v1i2.39.

- [56] University of Minnesota. Wind turbine generated sound.
<https://cse.umn.edu/safl/feature-stories/wind-turbine-generated-sound>
- [57] Herb W, Lueker M, Feist C, Stone N. Analysis of the 2012 Eolos turbine noise data set. University of Minnesota; 2017.
- [58] Junru W. Handbook of contemporary acoustics and its applications. University of Vermont, USA; 2016.
- [59] Chen C. Elements of human voice. Columbia University, USA; 2016.
- [60] Mortell MP, Seymour BR. Nonlinear waves in bounded media (The mathematics of resonance). University College Cork, Ireland, University of British Columbia, Canada; 2017.
- [61] Pinder JN. Mechanical noise from wind turbines. Wind Eng. 1992;16(3):158-168.
- [62] Goldstein ME. Aeroacoustics. McGraw-Hill International Book Co., New York; 1976.
- [63] Leishman JG. Challenges in modeling the unsteady aerodynamics of wind turbines. Wind Energy. 2002;5:85-132.
- [64] Cal RB, Lebron J, Castillo L, Kang HS, Meneveau C. Experimental study of the horizontally averaged flow structure in a model wind-turbine array boundary layer. J Renew Sustain Energy. 2010;2:013106.
- [65] Anderson JD Jr. Computational Fluid Dynamics. McGraw-Hill, New York; 1995.
- [66] Morris PJ, Long LN, Brentner KS. An aeroacoustic analysis of wind turbines. 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit; 2004 Jan 5-8; Reno, Nevada.
- [67] Crighton DG. Basic principles of aerodynamic noise generation. Department of Applied Mathematical Studies, University of Leeds, Leeds, England; 1975.
- [68] Hirscherberg A, Reainstra SW. An introduction to aeroacoustics. Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands; 2004.

- [69] Barlas E, Zhu W, Shen W, Dag K, Moriarty P. Consistent modelling of wind turbine noise propagation from source to receiver. *J Acoust Soc Am*. 2017;142(5):3297-3310.
- [70] Ffowcs-Williams JE, Hawkings DL. Theory relating to the noise of rotating machinery. *J Sound Vib*. 1969;10(1):10-21.
- [71] Ffowcs-Williams JE, Hawkings DL. Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion. *Philos Trans R Soc Lond A Math Phys Sci*. 1969;264(1151):321-342.
- [72] Mo J, Lee Y. Numerical simulation for prediction of aerodynamic noise characteristics on a HAWT of NREL Phase VI. *J Mech Sci Technol*. 2011;25(0):1341-1349.
- [73] Wagner S, Bareiss R, Guidati G. Wind turbine noise. Berlin: Springer; 1996.
- [74] Amiet RK. Acoustic radiation from an airfoil in a turbulent stream. *J Sound Vib*. 1975;41(4):407-420.
- [75] Ferrer E, Munduate X. Wind turbine blade tip comparison using CFD. In: *The Science of Making Torque from Wind*. J Phys. 2007.
- [76] Wang Z, Wu SF. Helmholtz equation-least-squares method for reconstructing the acoustic pressure field. *J Acoust Soc Am*. 1997;102(4):2020-2032.
- [77] Council of Canadian Academies. Understanding the evidence: Wind turbine noise. Ottawa (ON): The Expert Panel on Wind Turbine Noise and Human Health, Council of Canadian Academies; 2015.
- [78] Pedersen E, Waye KP. Perception and annoyance due to wind turbine noise a dose response relationship. *J Acoust Soc Am*. 2004;116(6):3460-3470.
- [79] Pedersen E, Waye KP. Wind turbine noise, annoyance and self-reported health and well-being in different living environments. *Occup Environ Med*. 2007;64(7):480-486.
- [80] Zeyl JN, den Ouden O, Koppl C, Assink J, Christensen-Dalsgaard J, Patrick SC, Clusella-Trullas S. Infrasonic hearing in birds: a review of audiometry and

hypothesized structure–function relationships. *Biological Reviews* 2020;95(4):1036-1054. <https://doi.org/10.1111/brv.12596>

- [81] Dooling PJ, Popper AH. *The Effects of Highway Noise on Birds*. Center for Comparative and Evolutionary Biology of Hearing, University of Maryland. 2007

ПРИЛОГ I – Листа канала система за прикупљање података

Channel #	Sensor Type	Description
1	Timing Signal	TTL every 5 seconds at base of tower
2	GCU Fan Mic	Behind GCU fan center body, 3 in B&K wind screen
3	Wind Speed	Met tower 10 m height wind speed (m/s)
4	Wind Direction	Met tower 10 m height wind direction (deg) CW from north
5	0° Mic	0° directivity array microphone
6	10° Mic	10° directivity array microphone
7	20° Mic	20° directivity array microphone
8	30° Mic	30° directivity array microphone
9	40° Mic	40° directivity array microphone
10	50° Mic	50° directivity array microphone, Bad LAN-XI Channel
11	60° Mic	60° directivity array microphone
12	70° Mic	70° directivity array microphone
13	80° Mic	80° directivity array microphone
14	90° Mic	90° directivity array microphone
15	100° Mic	100° directivity array microphone
16	110° Mic	110° directivity array microphone
17	120° Mic	120° directivity array microphone

18	130° Mic	130° directivity array microphone
19	140° Mic	140° directivity array microphone
20	150° Mic	150° directivity array microphone
21	160° Mic	160° directivity array microphone
22	170° Mic	170° directivity array microphone
23	180° Mic	180° directivity array microphone
24	190° Mic	190° directivity array microphone
25	200° Mic	200° directivity array microphone
26	210° Mic	210° directivity array microphone
27	220° Mic	220° directivity array microphone
28	230° Mic	230° directivity array microphone
29	240° Mic	240° directivity array microphone
30	250° Mic	250° directivity array microphone
31	260° Mic	260° directivity array microphone
32	270° Mic	270° directivity array microphone
33	280° Mic	280° directivity array microphone
34	290° Mic	290° directivity array microphone
35	300° Mic	300° directivity array microphone
36	310° Mic	310° directivity array microphone
37	320° Mic	320° directivity array microphone
38	330° Mic	330° directivity array microphone

39	340° Mic	340° directivity array microphone
40	350° Mic	350° directivity array microphone
41	Infra1	Infrasound Microphone B&K Type 4193 #1, HPfilt = 0.1 Hz
42	Infra2	Infrasound Microphone B&K Type 4193 #2, HPfilt = 0.1 Hz
43	Infra3	Infrasound Microphone B&K Type 4193 #3, HPfilt = 0.1 Hz
44	Laser Tach	Once per revolution, aligned with center of a blade
45	Magnetic Pickup	48 per revolution from hub bolts
46	N-S Seismic Accel.	Orientated North-South at spill deck, HPfilt = 0.1 Hz
47	E-W Seismic Accel.	Orientated East-West at spill deck, HPfilt = 0.1 Hz
48	Main Shaft Accel. X	Accel. on main shaft near hub X
49	Main Shaft Accel. Y	Accel. on main shaft near hub Y
50	Main Shaft Accel. Z	Accel. on main shaft near hub Z
51	GB Break Accel. X	Accel. on gearbox aligned with starboard break X
52	GB Break Accel. Y	Accel. on gearbox aligned with starboard break Y
53	GB Break Accel. Z	Accel. on gearbox aligned with starboard break Z
54	GB Side Mount Accel. X	Accel. on port gearbox mount X
55	GB Side Mount Accel. Y	Accel. on port gearbox mount Y
56	GB Side Mount Accel. Z	Accel. on port gearbox mount Z
57	Generator Accel. X	Accel. on generator near the gearbox X
58	Generator Accel. Y	Accel. on generator near the gearbox Y
59	Generator Accel. Z	Accel. on generator near the gearbox Z

60	Tower Side Mount Accel. X	Accel. on port tower mount X - rotated 180o on Z axis
61	Tower Side Mount Accel. Y	Accel. on port tower mount Y - rotated 180o on Z axis
62	Tower Side Mount Accel. Z	Accel. on port tower mount Z - rotated 180o on Z axis
63	GB Main Shaft Accel. X	Accel. Mounted on gearbox above main shaft X
64	GB Main Shaft Accel. Y	Accel. Mounted on gearbox above main shaft Y
65	GB Main Shaft Accel. Z	Accel. Mounted on gearbox above main shaft Z
65	GB Main Shaft Accel. Z	Accel. Mounted on gearbox above main shaft Z
66	Aft Port Mic.	Ambient microphone in the aft port region, type 4165
67	Garage Door Mic.	Ambient microphone near the garage door, type 4165
68	Aft Starboard Mic.	Ambient microphone in the aft starboard region, type 4939
69	Forward Port Mic.	Ambient microphone in the forward port region, type 4939
70	Generator Outlet Mic.	Microphone in generator outlet tube, type 4165, 1/2" bullet
71	Generator Inlet Mic.	Microphone at generator inlet filter, type 4939, 1/4" bullet
72	GB Oil Fan Mic.	Microphone near gearbox oil cooler fan, type 4165, 1/2" bullet, intermittent cable breaks
73	Forward Starboard Mic.	Ambient microphone in the forward starboard region, type 4939
74	Scoop Fan Mic.	Micropohone at the exit of scoop fan #1, type 4165, 1/2" bullet
75	Mid. Port Mic.	Ambient microphone in the middle port region, type 4165

БИОГРАФИЈА АУТОРА

Видосава Вилотијевић рођена је 12. новембра 1993. године у Шавнику. Основно образовање стекла је у Основној школи „25. мај” у родном граду, коју је завршила 2008. године. Средње образовање наставила је у Гимназији „Стојан Церовић” у Никшићу, гдје је матурирала 2012. године.

Основне студије завршила је на Машинском факултету у Подгорици, на смјеру Енергетика, у јулу 2015. године. Специјалистичке студије завршава на истом смјеру у септембру 2016. године, одбранивши рад под називом „Варијанте хидроенергетског искоришћења ријеке Комарнице”.

Звање магистра техничких наука стиче у октобру 2018. године, након успјешне одбране магистарског рада под називом „Одабир инсталисаног протока код малих хидроелектрана”, на Машинском факултету у Подгорици. Тренутно је студент докторских студија на истом факултету.

Током периода од јануара до октобра 2017. године била је ангажована на Машинском факултету у Подгорици у оквиру програма „Стручно оспособљавање лица са стеченим високим образовањем”, који спроводи Влада Црне Горе у сарадњи са Управом за кадрове.

Од октобра 2017. године ради као сарадник у настави на Машинском факултету у Подгорици, у области термо и хидроенергетике.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Потписана: Видосава Вилотијевић

Број индекса/уписа: 1/2018

ИЗЈАВЉУЈЕМ

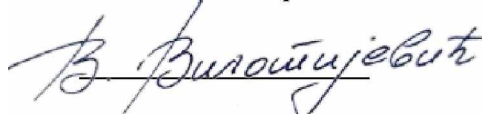
да је докторска дисертација под насловом:

Нумеричко симулирање и анализа података аеродинамичке буке генерисане радом вјетротурбина

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација ни у цјелини ни у дјеловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других установа високог образовања, да су резултати коректно наведени, и
- да нијесам повриједила ауторска и друга права интелектуалне својине која припадају трећим лицима.

У Подгорици, мај 2025.

Потпис докторанда



ИЗЈАВА О ИСТОВЈЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОН- СКЕ ВЕРЗИЈЕ ДОКТОРСКОГ РАДА

Име и презиме аутора: Вилосава Вилотијевић

Број индекса/уписа: 1/2018

Студијски програм: Машинство

Наслов рада: Нумеричко симулирање и анализа података
аеродинамичке буке генерисане радом
вијетротурбина

Ментор: проф. др Игор Вушановић

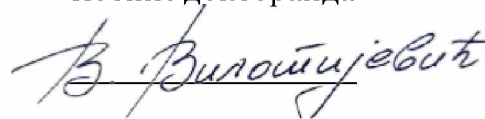
Потписани ментор: проф. др Игор Вушановић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истовјетна електронској верзији коју сам предала за објављивање у Дигитални архив Универзитета Црне Горе.

Истовремено изјављујем да дозвољавам објављивање мојих личних података у вези са добијањем академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и мјесто рођења, назив дисертације и датум одбране рада.

У Подгорици, мај 2025.

Потпис докторанда



ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку да у Дигитални архив Универзитета Црне Горе похрани моју докторску дисертацију под насловом:

**Нумеричко симулирање и анализа података аеродинамичке буке
генерисане радом вјетротурбина**

која је моје ауторско дјело.

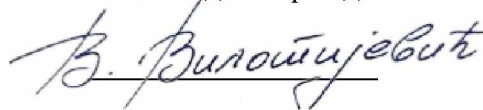
Дисертацију са свим прилозима предала сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални архив Универзитета Црне Горе могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (*Creative Commons*) за коју сам се одлучила:

1. Ауторство
2. Ауторство – некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – дијелити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – дијелити под истим условима

У Подгорици, мај 2025.

Потпис докторанда



1. Ауторство – Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дјела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дјела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дјела.
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дјела, без промјена, преобликовања или употребе дјела у свом дјелу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дјела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дјела.
4. Ауторство – некомерцијално – дијелити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дјела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дјела и прерада.
5. Ауторство – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дјела, без промјена, преобликовања или употребе дјела у свом дјелу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дјела.
6. Ауторство – дијелити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дјела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дјела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.