

The background of the entire page is a photograph of a large white wind turbine standing on a green, grassy hill. The sky is a clear, pale blue. The turbine's three blades are visible, with one blade pointing upwards and the other two angled downwards. The hill in the foreground is covered in lush green grass and some small trees.

Ignacijo Biluš

Luka Kevorkijan

Luka Lešnik

VETRNE TURBINE



Univerzitetna založba
Univerze v Mariboru



Univerza v Mariboru

Fakulteta za strojništvo

Vetrne turbine

Avtorji

Ignacijo Biluš

Luka Kevorkijan

Luka Lešnik

Julij 2025

Naslov <i>Title</i>	Vetrne turbine <i>Wind Turbines</i>
Avtorji <i>Authors</i>	Ignacijo Biluš (Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo)
	Luka Kevorkijan (Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo)
	Luka Lešnik (Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo)
Recenzija <i>Review</i>	Filip Kokalj (Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo)
	Matevž Dular (Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo)
Jezikovni pregled <i>Language editing</i>	Špela Vidmar (AMIDAS d.o.o.)
Tehnična urednika <i>Technical editors</i>	Jan Perša (Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba)
	Marina Bajić (Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba)
Oblikovanje ovitka <i>Cover designer</i>	Jan Perša (Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba)
Grafika na ovitku <i>Cover graphic</i>	Group of wind turbines, foto: Petim Iatifi, unsplash.com, 2022
Grafične priloge <i>Graphic material</i>	Viri so lastni, razen če ni navedeno drugače. Biluš, Kevorkijan, Lešnik, 2025
Založnik <i>Published by</i>	Univerza v Mariboru Univerzitetna založba Slomškov trg 15, 2000 Maribor, Slovenija https://press.um.si , zalozba@um.si
Izdajatelj <i>Issued by</i>	Univerza v Mariboru Fakulteta za strojništvo Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija https://fs.um.si , fs@um.si
Izdaja <i>Edition</i>	Prva izdaja
Vrsta publikacije <i>Publication type</i>	E-knjiga
Dostopno na <i>Available at</i>	http://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/985
Izdano <i>Published at</i>	Maribor, julij 2025



© Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba
/ University of Maribor, University Press

Besedilo / Text © Biluš, Kevorkijan, Lešnik (avtorji), 2025

To delo je objavljeno pod licenco Creative Commons Priznanje avtorstva-Deljenje pod enakimi pogoji 4.0 Mednarodna. / *This work is licensed under the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.*

Licenca dovoli uporabnikom reproduciranje, distribuiranje, dajanje v najem, javno priobčitev in predelavo avtorskega dela, če navedejo avtorja in širijo avtorsko delo/predelavo naprej pod istimi pogoji. Za nova dela, ki bodo nastala s predelavo, bo tako tudi dovoljena komercialna uporaba. Od BY NC SA licence se ta razlikuje samo v tem, da je tu dovoljena tudi komercialna uporaba dela/predelave.

Vsa gradiva tretjih oseb v tej knjigi so objavljena pod licenco Creative Commons, razen če to ni navedeno drugače. Če želite ponovno uporabiti gradivo tretjih oseb, ki ni zajeto v licenci Creative Commons, boste morali pridobiti dovoljenje neposredno od imetnika avtorskih pravic.

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

CIP - Kataložni zapis o publikaciji
Univerzitetna knjižnica Maribor

621.548(0.034.2)

BILUŠ, Ignacijo
Vetrne turbine [Elektronski vir] / avtorji Ignacijo Biluš, Luka Kevorkijan, Luka Lešnik. -
1. izd. - Maribor : Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba, 2025

Način dostopa (URL): <https://press.um.si/index.php/ump/catalog/book/985>
ISBN 978-961-299-011-4 (PDF)
doi: 10.18690/um.fs.6.2025
COBISS.SI-ID 241028611

ISBN 978-961-299-011-4 (pdf)

DOI <https://doi.org/10.18690/um.fs.6.2025>

Cena
Price Brezplačni izvod

Odgovorna oseba založnika
For publisher Prof. dr. Zdravko Kačič,
rektor Univerze v Mariboru

Citiranje
Attribution Biluš, I., Kevorkijan, L., Lešnik, L., (2025). *Vetrne turbine*.
Univerza v Mariboru, Univerzitetna založba.
doi: 10.18690/um.fs.6.2025

Kazalo

Pogostejše uporabljene oznake	iii
1 Uvod.....	1
1.1 Oskrba z energijo v Republiki Sloveniji.....	1
1.2 Obnovljivi viri energije.....	3
1.2.1 Nacionalni cilji rabe obnovljivih virov do leta 2030.....	3
1.2.2 Energija vetra	4
1.2.2.1 Energija vetra v Republiki Sloveniji.....	4
2 Veter kot energijski vir	7
2.1 Nastanek vetrov.....	7
2.1.1 Globalni vetrovi.....	8
2.1.2 Lokalni vetrovi.....	10
2.2 Geostrofski veter.....	12
2.3 Atmosferska mejna plast.....	14
2.3.1 Hitrostni profil po višini.....	16
2.3.2 Vpliv reliefa površja	21
2.3.3 Turbulenca.....	25
2.4 Analiza podatkov iz meritev in ocena razpoložljivosti vetrov	30
2.4.1 Razpoložljiva moč vetra.....	30
2.4.2 Časovna analiza.....	31
2.4.3 Prikaz razpoložljivosti vetra s porazdelitvijo hitrosti	35
2.5 Ocena pridobivanja energije.....	40
2.5.1 Izračun na podlagi razpoložljivosti vetra in karakteristike za eno vetrno turbino	41
2.5.2 Polje vetrnih turbin	43
3 Dinamika toka v vetrnih turbinah z vodoravno osjo.....	45
3.1 Uvod	45
3.2 Teorija navideznega diska.....	46
3.2.1 Ohranitev gibalne količine po teoriji navideznega diska	48
3.2.2 Koeficient moči	49
3.2.3 Betzova limita.....	50
3.2.4 Koeficient potisne sile.....	52
3.3 Teorija rotirajočega diska.....	53
3.3.1 Rotacija tokovne brazde.....	53
3.3.2 Ohranitev vrtilne količine po teoriji rotirajočega diska.....	55
3.4 Teorija vrtnične cevi	59
3.4.1 Uvod	59
3.4.2 Teorija vrtnične cevi	61
3.4.3 Zveza med pritrjeno cirkulacijo in inducirano hitrostjo	62
3.4.4 Vrtinec v korenu lopatice.....	63
3.4.5 Navor in moč	64

3.4.6	Hitrostna polja	65
3.4.6.1	Aksialno polje hitrosti	65
3.4.6.2	Tangencialno polje hitrosti	65
3.4.6.3	Radialno polje hitrosti	66
3.4.6.4	Aksialna potisna sila	67
3.5	Dinamika elementarne lopatice	68
3.5.1	Teorija elementarne lopatice	68
3.5.2	Gibalna enačba elementarne lopatice	71
3.5.3	Moč in navor na rotorju	74
3.6	Realne tokovne razmere	76
3.6.1	Prosti tok in mešanje v tokovni brazdi	76
3.6.2	Sprememba potisne sile zaradi odlepljanja toka	77
3.7	Geometrija lopatic	78
3.7.1	Uvod	78
3.7.2	Oblika lopatice za delovanje pri spremenljivih hitrostih vrtenja	79
3.7.2.1	Poenostavljena oblika lopatice	84
3.7.2.2	Vplivi sile upora na obliko lopatic	85
3.7.2.3	Učinek končnega števila lopatic	88
3.7.2.4	Učinek upora in izgub na lopatici na koeficient moči turbine	90
3.7.3	Optimalna oblika lopatice za delovanje pri konstantnih vrtilnih hitrostih	91
3.8	Obratovalne karakteristike vetrnih turbin	92
3.8.1	Karakteristika $C_p - \lambda$	92
3.8.2	Karakteristika $CM - \lambda$	93
3.8.3	Karakteristika $CT - \lambda$	95
3.8.4	Karakteristika $Kp - 1/\lambda$	95
3.8.4.1	Vpliv vrtilne hitrosti na karakteristiko	97
3.8.4.2	Vpliv nastavitve lopatice na karakteristiko	98
4	Okoljski vidik izrabe vetrne energije	99
4.1	Vpliv na živali in živalski habitat	100
4.2	Vpliv na degradacijo pokrajine (vizualni vpliv)	106
4.3	Vpliv na javno varnost	108
4.4	Vpliv hrupa	110
4.4.1	Lastnosti zvoka in hrupa	112
4.4.2	Jakost zvoka in zvočnega tlaka	112
4.4.3	Meritve zvoka	114
4.4.4	Mehanizmi hrupa vetrnih turbin	115
4.4.5	Aerodinamični hrup	116
4.4.6	Mehanski hrup	117
4.4.7	Določitev hrupa	118
4.4.8	Širjenje hrupa vetrnih turbin	119
4.5	Vpliv vetrnih turbin na elektromagnetno interferenco	120
4.5.1	Vpliv na širjenje signalov	121
4.6	Vpliv na letalski promet	126
4.7	Svetlobni vpliv vetrnih turbin na zdravje ljudi	128
	Literatura	131

Pogostejše uporabljene oznake

A	površina tokovne cevi
A_L	površina ene lopatice
A_{TR}	oslabitev signala med oddajnikom in sprejemnikom
A_{TW}	oslabitev signala med oddajnikom in vetrno turbino
A_{WR}	oslabitev signala med vetrno turbino in sprejemnikom
a	koeficient inducirane aksialne hitrosti
a'	koeficient inducirane tangencialne hitrosti
a'_t	koeficient inducirane tangencialne hitrosti na vrhu lopatice ($r = R$)
B	kalibracijska konstanta (korekcija zaradi materiala in oblike lopatic)
b	radij valja
C	vrednost uporabnega prejetega signala
C_p	koeficient moči
$C_{p,maks}$	najvišja vrednost koeficienta moči
C_T	koeficient potisne sile
$C_{T,emp}$	empirično določena vrednost koeficienta potisne sile
C_L	koeficient vzgonske sile
C_D	koeficient sile upora
C_M	koeficient navora
c	dolžina tetive

c_{∞}	absolutna hitrost neoviranega toka daleč pred ravnino turbine
c_d	absolutna hitrost toka v ravnini turbine
c_b	absolutna hitrost toka v tokovni brazdi za turbino
c_{zv}	hitrost zvoka
D	premer rotorja
d	razdalje nevarnosti padca ledu
d_1	oddaljenosti oddajnika od točke določitve radija prve Fresnelove cone
d_2	oddaljenosti sprejemnika od točke določitve radija prve Fresnelove cone
E	skupna proizvedena energija v opazovanem časovnem obdobju
E_i	proizvedena energija za hitrostni razred vetra i
E_{tot}	skupna proizvedena energija po vseh hitrostnih razredih vetra
$E(U)$	proizvedena energija kot funkcija hitrosti vetra
F	(potisna) sila
$F(U)$	kumulativna porazdelitev verjetnosti
F_p	sila zaradi tlačnega gradienta
F_c	Coriolisova sila
F_L	sila vzgona
F_D	sila upora
f	frekvenca
f_i	relativna frekvenca hitrostnega razreda i
f_v	Prandtlov koeficient izgub na vrhu lopatice
f_k	Prandtlov koeficient izgub v korenu lopatice
f_l	skupni koeficient izgub na lopatici
G	gibalna količina
ΔG	diskriminacijski faktor antene
G_{TR}	dobitek antene sprejemnika v smeri zahtevanega signala
G_{WR}	dobitek antene v smeri odbitega signala
H	višina rotacijske osi rotorja
I	signal motnje
$I_{T,u}$	intenzivnost turbulentnega toka v vzdolžni smeri
$I_{T,v}$	intenzivnost turbulentnega toka v prečni smeri
$I_{T,w}$	intenzivnost turbulentnega toka v navpični smeri
I_{ref}	referenčna vrednost intenzivnosti turbulentnega toka
K_p	koeficient moči pri konstantni vrtilni frekvenci

k	Weibullov parameter oblike
L	višina valja
L_P	jakost (moč) zvoka izvora
$L_{P(A)}$	jakosti hrupa izvora z upoštevanjem lastnosti frekvenčnega filtra A
L_T	raven zvočnega tlaka
M	navor
P	moč
P_T	moč oddajnika
P_{WT}	nazivna moč turbine
p	tlak
p_0	referenčni zvočni tlak
$p(U)$	porazdelitev gostote verjetnosti hitrosti vetra
p_d^+	tlak neposredno pred ravnino diska
p_d^-	tlak neposredno za ravnino diska
R	polmer turbine, oddaljenost od izvora zvoka
R_F	radij (polmer) prve Fresnelove cone
r	razdalja od vrtilišča, polmer
s	razdalja med vetrno turbino in sprejemnikom
ℓ	mešalna dolžina
N	število lopatic turbine
n	normala
t	čas
U	hitrost vetra
$\bar{U}$	časovno povprečna hitrost vetra
U'	oscilacija hitrosti vetra
U^*	torna hitrost
U_g	hitrost geostrofskega vetra
$\bar{U}_{rot}$	časovno povprečna hitrost vetra na višini rotorja vetrne turbine
u	obodna hitrost
v_T	hitrost konice lopatice vetrne turbine
W	moč izvora zvoka
W_0	referenčna zvočna moč
w	relativna hitrost

$X(\alpha)$	funkcija, ki opisuje amplitudo razpršenega signala v smeri α
z_0	parameter hrapavosti tal
α	eksponent v Hellmanovem potenčnem zakonu, koeficient absorpcije zvoka v zraku
β	kot lopatice (kot relativne hitrosti)
δ	natočni kot lopatice
ϕ	zemljepisna širina
φ	nastavni kot lopatice
$\emptyset$	kot vijačnice vrtinca na vrhu lopatice (enak kotu lopatice β)
η_r	izkoristek elementarnega dela lopatice
Γ	funkcija gama
Ω	kotna hitrost Zemlje
ω	kotna frekvenca
ρ	gostota
μ	razmerje polmerov r/R
μ_k	razmerje polmerov v korenu r_k/R , normiran polmer korena rotorja
κ	von Karmanova konstanta
λ	razmerje obodne hitrosti na vrhu lopatice R s hitrostjo vetra, Weibullov parameter merila, valovna dolžina
λ_{opt}	razmerje obodne hitrosti s hitrostjo vetra v preračunski točki, kjer je izkoristek največji
λ_r	razmerje obodne hitrosti na polmeru r s hitrostjo vetra
σ	efektivna površina vetrne turbine
σ_r	geometrijski parameter lopatice (razmerje dolžine tetiv vseh lopatic na polmeru r z obsegom kolobarja polmera r)
τ_{xz}	komponenta strižne napetosti v x-z ravnini
τ_0	komponenta strižne napetosti v x-z ravnini pri tleh
Ψ	empirična funkcija stabilnosti ozračja

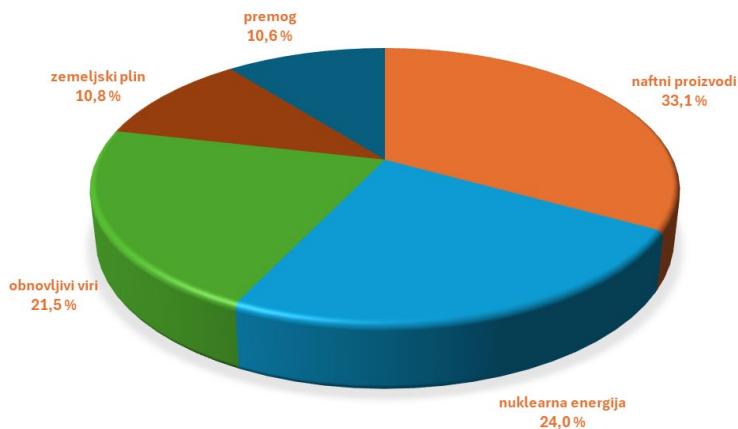
1 Uvod

1.1 Oskrba z energijo v Republiki Sloveniji

V Sloveniji se oskrbujemo iz različnih primarnih virov energije. Več kot polovico energije dobimo iz fosilnih goriv; med njimi največ iz uvožene nafte in naftnih proizvodov (predvsem za potrebe prometa), iz uvoženega zemeljskega plina (predvsem za ogrevanje in industrijo) in iz premoga (predvsem za električno energijo).

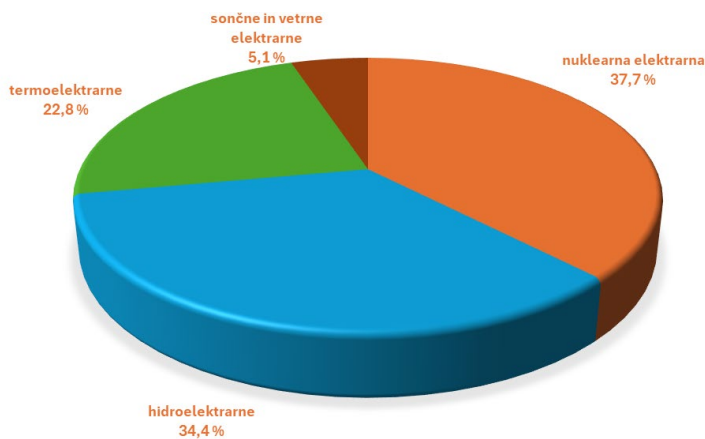
Z domačimi viri energije je Slovenija v letu 2023 zadovoljila 53 % potreb po energiji, preostala količina je bila zagotovljena iz uvoza.

S slike 1.1 je razvidno, da so v strukturi oskrbe s primarno energijo tudi v letu 2023 prevladovali naftni proizvodi, katerih delež je znašal 33,1 %; delež nuklearne energije je znašal 24 %, delež energije iz obnovljivih virov (vključno s hidroenergijo) 21,5 %, delež premoga 10,6 % in delež zemeljskega plina 10,8 %.



Slika 1.1: Struktura oskrbe z energijo v Republiki Sloveniji za leto 2023 [1].

Tudi pri proizvodnji električne energije imajo fosilna goriva pomembno vlogo, saj iz njih pridobimo skoraj 23 % celotne električne energije. Več kot 37 % jo proizvedemo iz nuklearne energije, dobro tretjino pa iz hidroenergije. Drugi viri (predvsem biomasa, sončna in geotermalna energija) prispevajo v strukturo virov za proizvodnjo električne energije v Sloveniji manj kot 1 %. Na sliki 1.2 so prikazani deleži posameznega energetskega vira v proizvodnji končne – električne energije za marec 2024. V poletnih mesecih se lahko struktura zaradi daljšega časa dnevnega sončnega obsevanja in zaradi sušnih obdobji nekoliko spremeni.



Slika 1.2: Proizvodnja električne energije v Republiki Sloveniji marca 2024 [2].

1.2 Obnovljivi viri energije

Obnovljivi viri energije (OVE) vključujejo vse vire energije, ki jih zajemamo iz stalnih naravnih procesov. To so sončno sevanje, veter, vodni tok v rekah, fotosinteza, zemeljski toplotni tokovi in tokovi morja. V naravi jih nikoli ne zmanjka, saj se obnavljajo dokaj hitro in so dokaj enakomerno porazdeljeni. V primerjavi s fosilnimi gorivi pri rabi energije iz OVE nastajajo manjše emisije toplogrednih plinov, kar prinaša pozitivne učinke na kakovost okolja. Okolju prijaznejše in učinkovitejše tehnologije rabe OVE privlačijo investicije za obnovo zastarelih tehnologij za pridobivanje energije. Razpršenost in dostopnost OVE omogočata boljšo uskladitev energije z lokalnimi potrebami. S povečevanjem uporabe postajajo OVE cenovno konkurenčnejši fosilnim gorivom.

V Sloveniji sta najpomembnejša obnovljiva vira energije lesna biomasa in energija vodnega toka, v zadnjih letih pa je razvoj najbolj dinamičen pri izkoriščanju sončne energije in bioplina. V svetovnem merilu je energija vodnega toka (hidroenergija) najpomembnejši obnovljivi vir energije, saj je 17 % vse električne energije na svetu proizvedene z izkoriščanjem energije vode [3]. K povečani porabi obnovljivih virov energije bodo poleg navedenih virov energije dodatno prispevali potenciali energije vetra in geotermalne energije.

1.2.1 Nacionalni cilji rabe obnovljivih virov do leta 2030

Slovenija ima zastavljen krovni nacionalni cilj do leta 2030 doseči najmanj 33-odstotni delež OVE v končni bruto rabi energije [4].

Skladno z Nacionalnim energetske in podnebni načrtom (NEPN) so za leto 2030 določeni tudi sektorski ciljni deleži OVE v bruto končni rabi energije [4]:

- sektor toplota in hlajenje = 45 %,
- sektor električna energija = 55 %,
- sektor promet = 26 %.

1.2.2 Energija vetra

Veter se pojavlja v različni meri povsod okoli nas. Iz vidika smotrnosti izrabe energije vetra je pomembna razpoložljivost vetra, torej kolikšen delež časa piha veter in s kakšno hitrostjo. Slovenija ima zelo razgibano in pestro pokrajino, zato ima tudi nekaj območij z veliko razpoložljivostjo vetra, torej območja z veliko razpoložljivostjo energije vetra. Kljub temu pa je, zaradi zavetrne lege napram Alpam, po razpoložljivosti vetra v Evropi ne moremo uvrstiti med bolj vetrovne države Evrope, kamor uvrščamo nekatere države zahodne Evrope.

1.2.2.1 Energija vetra v Republiki Sloveniji

Razgiban relief Slovenije ima velik vpliv na nastanek vetrov, po eni strani je vzrok nastanka lokalnih vetrov (pobočni vetrovi), po drugi strani pa vpliva na vetrove tako, da jih preusmerja. Tako je največji potencial za izrabo energije vetra [5]:

- v osrednjem delu Julijskih Alp (severni del Škofjeloškega hribovja),
- v osrednjem delu Karavank,
- v osrednjem delu Kamniško-Savinjskih Alp (Menina planina, Čemšeniška planina, Mrzlica),
- na Pohorju,
- v Kočevskem rogu,
- na območju Goteniške gore, Velike gore, Blok in Krima,
- na območju Snežnika, Javornikov, Postojnskih vrat in Hrušice,
- na območju Podgorskega Krasa, Slavnika in Rodiškega Krasa ter
- na območju Divaškega Krasa, Senožeškega Krasa, Nanosa, Trnovskega gozda ter Banjščice.

Poleg zgoraj naštetih večjih območij pa je še nekaj manjših območij, npr. Kanin, Peca, Golte, Košenjak, Boč, Orlica, Bohor, Dole pri Litiji in del Gorjancev.

Od naštetih območij jih je večina popolnoma neizkoriščenih iz vidika pridobivanja vetrne energije, v splošnem je vpeljava vetrnih elektrarn v Sloveniji počasnejša kot v nekaterih drugih državah Evropske unije. Eden najpomembnejših razlogov za to je velika ozaveščenost prebivalstva o pomembnosti zaščite narave in biotske pestrosti,

kar se odraža v različnih ukrepih na državni ravni, s katerimi Republika Slovenija poskuša omejiti prekomerno poseganje v okolje, ki bi lahko imelo škodljiv vpliv.

Eden pomembnejših ukrepov je bila leta 2004 določitev območij Natura 2000 z Uredbo o posebnih varstvenih območjih (Uradni list RS, št. 49/04, 110/04, 59/07, 43/08, 8/12, 33/13, 35/13 – popr., 39/13 – odl. US in 3/14). S tem so bila določena posebna varstvena območja, ki so bila prepoznana kot izjemno pomembna za ohranjanje biotske pestrosti, kar vključuje zagotavljanje ugodnega stanja živalskih in rastlinskih habitatov.

Izkazalo se je, da veliko območij s primerno razpoložljivostjo vetra sovpada z območji Natura 2000 ali pa se nahajajo v bližini (ali znotraj) območij z drugimi varstvenimi kriteriji (ti kriteriji so na primer zaščita varovalnih gozdov, zaščita voda, zaščita izjemnih krajin, zaščita kulturne dediščine).

Ob tem pa je treba upoštevati še morebiten vpliv na ljudi, bodisi njihovo zdravje ali udobje. Običajno se to odraža v potrebi po dovolj veliki oddaljenosti vetrnih turbin od poselitvenih območij, čeprav za to ni enotnih predpisov in priporočil. Pri tem pa se upoštevajo drugi predpisi, na primer predpisi iz varstva pred hrupom.

Tako imamo trenutno v Sloveniji štiri delujoče vetrne elektrarne, in sicer:

- 1 vetrno turbino z močjo 2,3 MW v Dolenji vasi,
- 2 vetrni turbini z močjo 910 kW in 250 kW pri Razdrtem ter
- 1 vetrno turbino z močjo 1 MW v Malem logu.

Glede na zastavljene cilje v NEPN glede rabe OVE pa je do leta 2030 predvidena postavitev vetrnih elektrarn na 12 prepoznanih potencialnih območjih za postavitev vetrnih elektrarn, s skupno močjo med 330 MW in 480 MW, s pričakovano ocenjeno vrednostjo 415 MW [4]:

- Porezen – Podbrdo od 15 do 23 vetrnih turbin skupne moči med 45 MW in 69 MW,
- Rogatec–Črnivec–Ojstri vrh od 11 do 16 vetrnih turbin skupne moči med 33 MW in 48 MW,

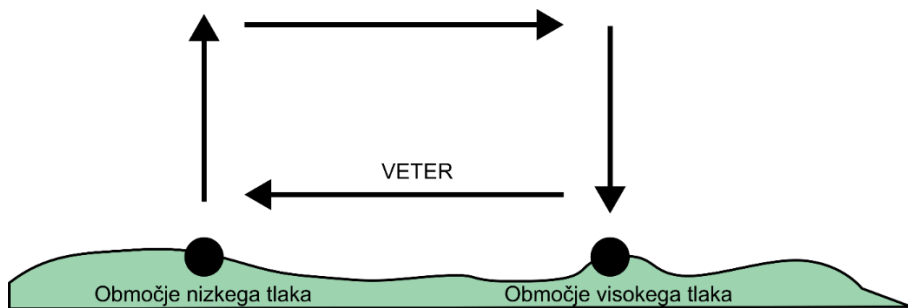
- Špitalič–Trojane–Motnik od 9 do 13 vetrnih turbin skupne moči med 27 MW in 39 MW,
- Mrzlica od 2 do 4 vetrne turbine skupne moči med 6 MW in 12 MW,
- Golte od 2 do 4 vetrne turbine skupne moči med 6 MW in 12 MW,
- Črni vrh–Zaloška planina od 5 do 8 vetrnih turbin skupne moči med 15 MW in 24 MW,
- Velika gora od 12 do 16 vetrnih turbin skupne moči med 36 MW in 48 MW,
- Novokrajski vrhi od 2 do 3 vetrne turbine skupne moči 6 MW ali 9 MW,
- Hrpelje–Slope–Mrše od 3 do 5 vetrnih turbin skupne moči med 9 MW in 15 MW,
- Senožeška brda od 38 do 51 vetrnih turbin skupne moči med 114 MW in 153 MW,
- Grgar–Trnovo od 1 do 2 vetrni turbini skupne moči 3 MW ali 6 MW,
- Banjšice–Lokovec od 10 do 15 vetrnih turbin skupne moči med 30 MW in 45 MW.

2 Veter kot energijski vir

2.1 Nastanek vetrov

Zemlja je izpostavljena sevanju Sonca, zaradi česar se površina, ki je izpostavljena sevanju (del Zemlje, kjer je dan), segreva. Ker je Zemlja okrogla, je na ekvatorju sevanje na enoto površine najvišje in se znižuje proti poloma. Zaradi razlik v segrevanju površine Zemlje se zrak nad površino različno segreva. Tam, kjer se zrak bolj segreva, se ta bolj razteza in dviguje proti višjim slojem atmosfere, zaradi česar prihaja do padanja zračnega tlaka in do pojava območja nizkega zračnega tlaka, ki je nižji od območij, kjer se površina Zemlje in zrak nad njo manj segrevata. Posledica tako vzpostavljenega tlačnega gradienta v horizontalni smeri je gibanje zraka, ki ga imenujemo veter.

Veter torej vedno piha od območja visokega tlaka k območju nizkega tlaka, kot je prikazano na sliki 2.1. Kroženje zraka med območjem visokega tlaka in območjem nizkega tlaka obsega še dvigovanje zraka v območju nizkega tlaka, ki v višjih plasteh potuje proti območju z visokim tlakom in se tam spušča nazaj proti zemeljski površini. S tem osnovnim principom nastanka vetra in kroženja zraka opišemo nastanek vetrov na globalni in na lokalni ravni.

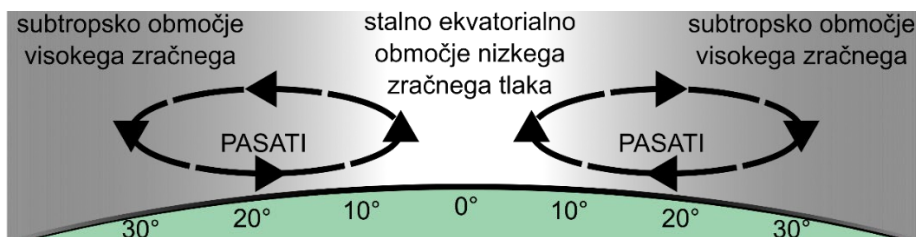


Slika: 2.1: Kroženje zraka med območjem z visokim zračnim tlakom in območjem z nizkim zračnim tlakom.

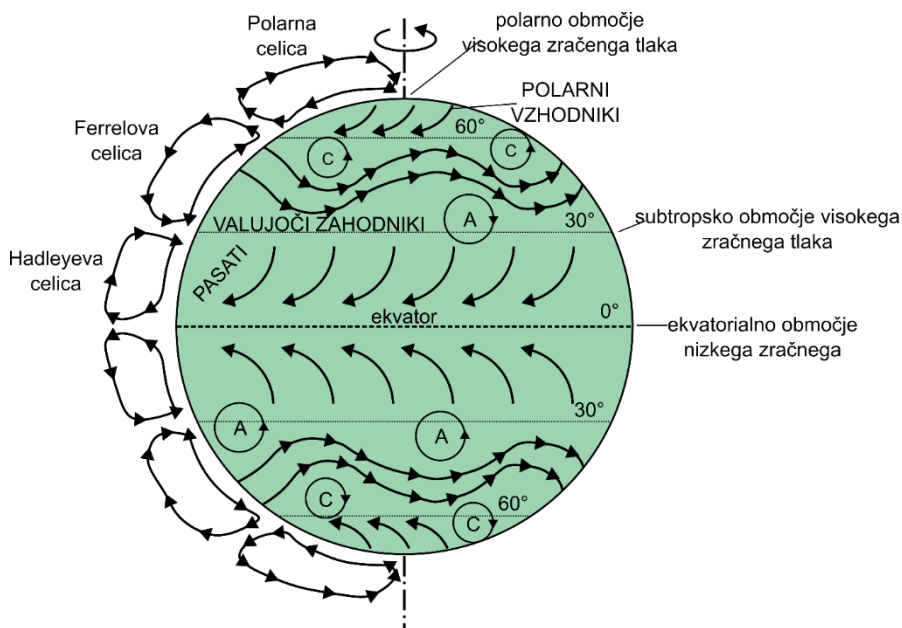
2.1.1 Globalni vetrovi

Pri obravnavi planetarnega kroženja zraka oziroma vzpostavitve globalnih vetrov se omejimo na idealizirano obravnavo, kjer zanemarimo vpliv porazdelitve kopna in morja, kopenskega reliefa in letnih časov.

Na ekvatorju se zemeljsko površje močno segreva zaradi velikega obsevanja površja, saj sončni žarki vpadajo pod velikim vpadnim kotom. Ozračje se zato ob ekvatorju močno segreva, zato je tam prisotno območje nizkega zračnega tlaka, ki ga imenujemo stalno ekvatorialno območje nizkega zračnega tlaka. Od stalnega ekvatorialnega območja nizkega zračnega tlaka se vroč tropski zrak dviga v višje sloje atmosfere in potuje proti poloma. Zaradi vrtenja Zemlje deluje na gibajoče zračne mase tudi Coriolisova sila, zaradi katere se gibanje zraka odklanja od severne oziroma južne smeri proti vzhodu. Ko zračne mase dosežejo 30. vzporednik, se tam začnejo spuščati proti površju, zato se tam vzpostavi območje visokega zračnega tlaka, ki ga imenujemo subtropsko območje visokega zračnega tlaka. Kroženje zraka med ekvatorjem in 30. vzporednikom (Hadleyjeva celica), prikazano na sliki 2.2, je zaključeno z vzpostavitvijo vetrov, ki pihajo nazaj proti ekvatorju in jih imenujemo pasati. Pasati najprej pihajo od severa proti jugu (oziroma od juga proti severu na južni polobli), zaradi Coriolisove sile pa se odklanjajo v smeri proti zahodu, torej pihajo v smeri jugozahoda (oziroma severozahoda na južni polobli).



Slika 2.2: Nastanek pasatov in ponazoritev kroženja zraka v Hadleyjevi celici med ekvatorjem in 30. vzporednikom.



Slika 2.3: Idealiziran prikaz globalnih vetrov in globalnega kroženja zraka.

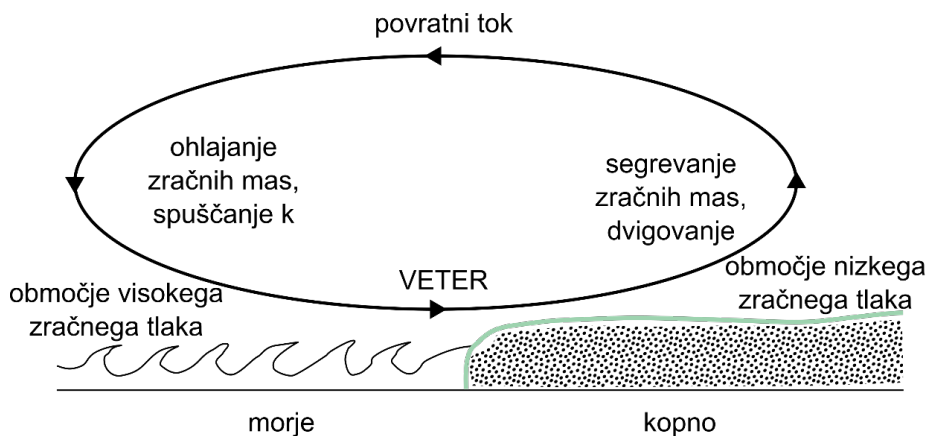
Del zraka, ki se spušča pri 30. vzporedniku, pa se ne usmeri nazaj proti ekvatorju, ampak nadaljuje pot proti severu (oziroma jugu na južni polobli). Pri tem se smer teh vetrov odklanja proti vzhodu zaradi Coriolisove sile, torej prehaja veter iz južnega (oziroma severnega na južni polobli) v zahodnega, zato se za njih uporablja poimenovanje zahodni vetrovi. Ti vetrovi se pojavljajo v obliki valov, zato se imenujejo tudi Rossbyjevi ali planetarni valovi. V območju okoli 60. vzporednika se srečajo s polarnimi vzhodnimi vetrovi, ki pihajo s severnega pola (oziroma južnega pola na južni polobli), kjer je stalno prisotno območje visokega zračnega tlaka, ki ga imenujemo polarno območje visokega zračnega tlaka. Pri srečanju zahodnih vetrov

s polarnimi vzhodnimi vetrovi se vzpostavi polarna fronta, ob kateri se stekajoče zračne mase ponovno dvigujejo v višje predele atmosfere. Del zračnih mas se ponovno preusmeri nazaj proti 30. vzporedniku, s tem je zaključeno kroženje zraka med 30. vzporednikom in 60. vzporednikom (Ferrellova celica), del zračnih mas pa potuje proti polu, s čimer je zaključeno kroženje zraka med 60. vzporednikom in polom (polarna celica). Na sliki 2.3 so prikazani vsi globalni vetrovi oziroma globalna kroženja zraka.

2.1.2 Lokalni vetrovi

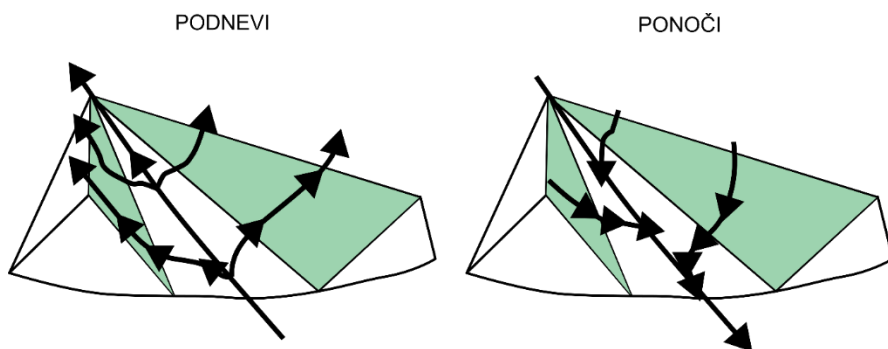
Tudi lokalni ali krajevni vetrovi nastanejo zaradi razlik v tlaku, ki so posledica različnega segrevanja površja oziroma zraka nad njim. Dva najbolj značilna sistema lokalnega kroženja zraka sta kroženje zraka z obalnimi vetrovi in kroženje zraka s pobočnimi vetrovi.

Obalni vetrovi nastanejo podnevi, v sončnem vremenu, saj se takrat lahko vzpostavi velika razlika v temperaturi med kopnim in morjem oziroma v manjši meri tudi med kopnim in večjimi jezери. V nadaljevanju se bomo omejili na obravnavo morske obale, torej vzpostavitev kroženja zraka z vetrom med kopnim in morjem. Kopno se podnevi segreva hitreje kot morje, zato tlak zraka nad kopnim pade pod vrednost tlaka zraka nad morjem, torej se pojavi tlačni gradient iz kopnega proti morju. Zaradi razlike tlaka se pojavi veter, ki piha z območja visokega zračnega tlaka nad morjem proti območju nizkega zračnega tlaka nad kopnim. Na Jadranu imenujemo takšen veter maestral, ki nosi hladen in vlažen zrak z morja na kopno, torej nas na razgretim kopnem hladi. Iz splošnega principa kroženja zraka sledi, da se segret zrak nad kopnim dviguje, v višjih plasteh atmosfere se vzpostavi povraten tok zraka, torej s kopnega na morje, kjer se nad morjem zrak spušča v nižje plasti atmosfere. Prikaz tega kroženja zraka med morjem in kopnim je viden na sliki 2.4. Ponoči pride do obratnega pojava, ker se kopno ohlaja bolj kot morje in se vzpostavi obraten temperaturni in tlačni gradient kot podnevi. Takrat piha veter s kopnega proti morju. Na Jadranu se na njegovi vzhodni obali ta veter imenuje burin.



Slika 2.4: Pojav obalnega vetra pri kroženju zraka nad morjem in kopnim podnevi.

V razgibanem reliefu površja nastanejo ob sončnem vremenu predvsem na prisojnih pobočjih pobočni vetrovi. Prisojne lege pobočij se zaradi velikega vpadnega kota sončnih žarkov bolj segrevajo kot okolica, zrak ob pobočju se začne dvigovati in vzpostavi se kroženje zraka z vzponskim vetrom, ki piha iz doline navzgor proti vrhu pobočja. Za ta veter se uporablja ime dolinski veter ali dolnik. Ponoči, ko se temperaturno-tlačne razmere obrnejo, pa piha gorski veter ali gornik, kjer se hladen zrak zaradi večje gostote spušča ob pobočju navzdol. Opisani nastanek pobočnih vetrov se lahko pojavlja ob osamljenem, izpostavljenem pobočju, lahko pa se pojavlja v dolinah na prisojni legi gorovja. Ta situacija je prikazana na sliki 2.5, s prikazanim nastankom vetra podnevi in ponoči.



Slika 2.5: Nastanek pobočnih vetrov na prisojnem pobočju. Levo: prikaz smeri vetra podnevi. Desno: prikaz smeri vetra ponoči. Obsijane površine so obarvane zeleno.

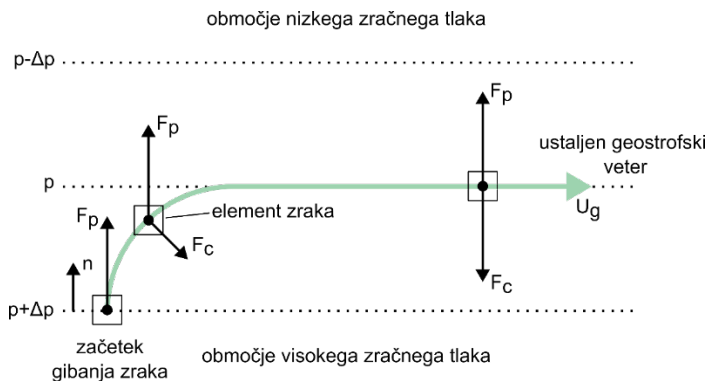
V Sloveniji se pojavljata še dva značilna lokalna vetrova, burja in fen. Burja je sunkovit, suh in hladen veter, ki se pojavlja praviloma pozimi, ko prodre hladen zrak s severa do gorskih pregrad (Visoke dinarske planote, npr. Nanos, Trnovski gozd, Velebit) in se zaradi velike temperaturne razlike preliva čez grebene. Zaradi spuščanja zraka iz visokih nadmorskih višin pridobi ta še dodatno hitrost, ki v sunkih doseže hitrost do 200 km/h. Fen se pojavlja na zavetrni strani gorskih grebenov, kjer pride do pretakanja zraka prek visoke gorske pregrade. Poznamo fen s padavinami in višinski fen, v obeh primerih gre za suh in tople veter [7].

2.2 Geostrofski veter

Obravnavo vetra iz vidika dinamike tekočin začnimo najprej na višini, dovolj daleč od površja, da to nima vpliva na tok zraka. Zanimajo nas ravnovesne razmere, ko je vsota vseh sil, ki delujejo na element zraka, enaka nič, zato govorimo v tem primeru o ravnovesnih vetrovih. V nadaljevanju lahko v skladu z definicijo, da je veter horizontalno gibanje zraka, zanemarimo vpliv teže, ki deluje le v vertikalni smeri. Ker smo se omejili na veter dovolj daleč od površja, zanemarimo še silo trenja med zrakom in površjem. Tako nam preostaneta le še dve sili, ki ju bomo upoštevali, to je sila zaradi tlačnega gradienta v horizontalni smeri in Coriolisova sila. Veter, kjer sta v ravnovesju le gradientna in Coriolisova sila, je geostrofski veter. Za element zraka lahko zapišemo silo zaradi tlačnega gradienta:

$$F_p = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \quad (2.1)$$

kjer je ρ gostota zraka in n normala na izobare, kot je razvidno na sliki 2.6.



Slika 2.6: Prikaz nastanka geostrofskega vetra s silami, ki delujejo na element zraka.

Coriolisovo silo, ki je pravokotna na smer gibanja elementa zraka, pa zapišemo kot:

$$F_c = 2\Omega \sin(\phi) U \quad (2.2)$$

kjer je Ω kotna hitrost Zemlje in znaša $7,2921 \cdot 10^{-5}$ rad/s, ϕ je zemljepisna širina in U hitrost vetra. Zaradi preglednosti enačb v nadaljevanju vpeljemo Coriolisov parameter:

$$f = 2\Omega \sin(\phi) \quad (2.3)$$

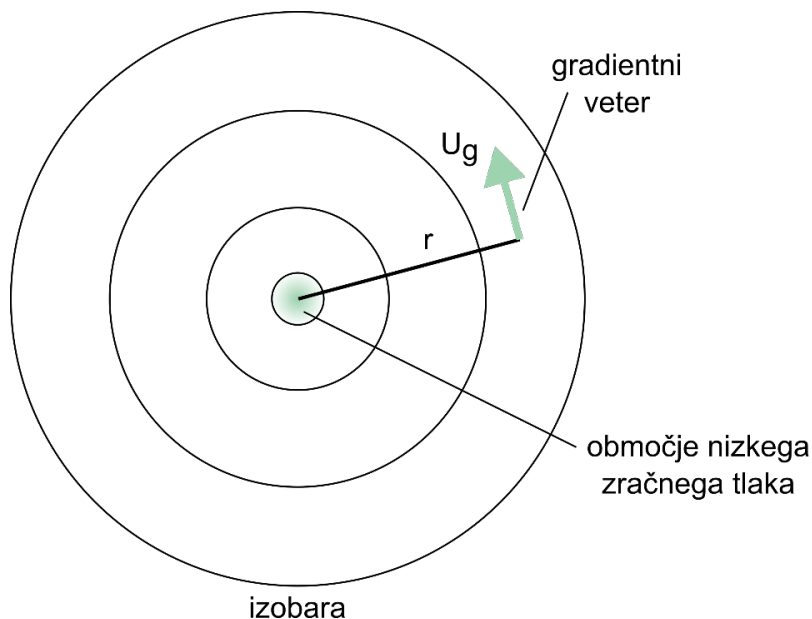
Ker privzamemo, da je kotna hitrost Zemlje konstantna, vidimo, da na velikost Coriolisove sile vpliva le zemljepisna širina, na kateri opazujemo nastanek geostrofskega vetra in njegovo hitrost. Ustaljen geostrofski veter, kjer sta v ravnovesju sila zaradi tlačnega gradienta in Coriolisova sila, ima smer vzporedno z izobarami, takrat velja:

$$fU_g = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \quad (2.4)$$

kjer je v ustaljenem stanju hitrost geostrofskega vetra U_g . Iz enačbe 2.4 lahko zdaj izrazimo ustaljeno hitrost geostrofskega vetra:

$$U_g = -\frac{1}{f\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \quad (2.5)$$

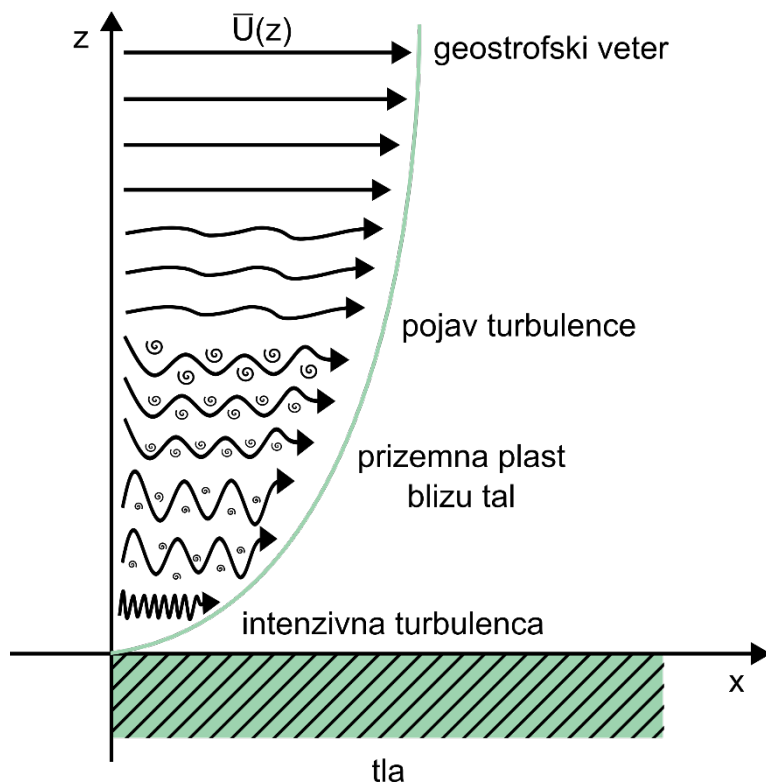
Izpeljana hitrost vetra velja ob predpostavki, da so izobare ravne. V resnici se lahko pojavijo ukrivljene izobare, takrat je smer vetra še vedno vzdolž izobar, temu vetru pa pravimo gradientni veter, kar je prikazano na sliki 2.7. Gradientni veter je značilen za pojav ciklona in anticiklona, kjer so izobare koncentrično razporejene okoli središča zaključenega območja nizkega zračnega tlaka v primeru ciklona oziroma visokega zračnega tlaka v primeru anticiklona. Na sliki 2.7 je tako skicirana situacija ob pojavu ciklona.



Slika 2.7: Prikaz gradientnega vetra v primeru koncentričnih izobar ciklona.

2.3 Atmosferska mejna plast

Iz vidika vetrnih turbin, ki so v primerjavi z višino atmosfere umeščene zelo blizu površja Zemlje, je treba upoštevati dejstvo, da se v bližini površja Zemlje v toku zraka vzpostavi turbulentna mejna plast. Tej turbulentni mejni plasti pravimo atmosferska mejna plast. Nad atmosfersko mejno plastjo je prosto ozračje, kjer nastopi geostrofski veter, ki smo ga obravnavali v prejšnjem poglavju. V atmosferski mejni plasti se zaradi trenja toka ob tleh vzpostavi vertikalni hitrostni gradient. Ob tem na prenos gibalne količine v atmosferski mejni plasti še dodatno vpliva vertikalni temperaturni in s tem povezan vertikalni tlačni gradient. Med plastmi zraka pride zato do intenzivnega, turbulentnega prenosa gibalne količine. Shematsko je celotno gibanje zraka po višini prikazano na sliki 2.8, kjer je prikazan višinski hitrostni profil.



Slika 2.8: Shematski prikaz vetra s hitrošnim profilom po višini.

Debelina atmosferske mejne plasti ni enakomerna, ampak je odvisna od reliefa površja, lokalnega temperaturnega in tlačnega polja ter od hitrosti vetra. Tipična debelina mejne plasti je od 1 do 2 km, sicer pa se lahko pojavlja v mnogo tanjšem sloju, tudi z debelino le nekaj deset metrov, ali v debelejšem sloju, ki presega 4 km. Pogosto se zato privzame 1 km kot srednja vrednost debeline atmosferske mejne plasti.

Najnižjemu sloju v bližini tal, do približno 10 % debeline atmosferske mejne plasti, pravimo prizemna plast. Tudi v prizemni plasti se debelina spreminja podobno, kot to velja za celotno atmosfersko mejno plast, tipično je njena debelina od nekaj metrov do nekaj sto metrov. Pomemben vpliv na debelino prizemne plasti ima vertikalni temperaturni profil, na podlagi katerega lahko določimo tri značilna stanja statične stabilnosti plasti ozračja: stabilno, nevtralno in nestabilno stanje.

Prizemna plast je statično stabilna, kadar ima zrak pri tleh nižjo temperaturo kot okoliški zrak nad njim. Ta situacija se pojavi predvsem pozimi, ko so tla in zrak nad njimi zelo hladni. Takrat je zrak v višjih plasteh toplejši, posledično ima manjšo gostoto kot zrak tik nad tlemi in posledično ne pride do intenzivnega dvigovanja zraka iz nižjih plasti v višje oziroma do turbulentnega mešanja hladnega in toplega zraka po višini. Ker je torej zrak po višini razslojen in so sloji stabilni, so horizontalne hitrosti vetra različne za različne sloje, saj ob odsotnosti mešanja plasti ne prihaja do izenačitve hitrosti med sloji. Pojavi se torej izrazit gradient hitrosti po višini, hkrati se lahko v nekaterih primerih zgodi tudi, da se po višini spreminja smer vetra.

Poleti, ko se tla močno segrejejo, nastane obratna situacija, torej zrak pri tleh je toplejši kot okoliški zrak nad njim. Temu stanju pravimo statično nestabilno stanje. Zdaj ima hladnejši zrak v višjih slojih višjo gostoto kot toplejši zrak pri tleh. Zato pride do intenzivnega turbulentnega mešanja zraka po višini, kjer se topel zrak od tal dviguje in hladnejši zrak spušča iz višjih slojev. V tem primeru zrak ni izrazito razslojen in zato se tudi hitrost vetra ne spreminja bistveno po višini, torej je gradient hitrosti vetra po višini majhen.

Nevtralno stanje nastane, če se zrak pri tleh v primerjavi z zrakom nad njim bistveno ne segreva niti se ne ohlaja. Takrat ne pride niti do bistvene razslojenosti zraka (z izrazitim višinskim temperaturnim gradientom) niti do intenzivnega mešanja. To stanje nastane pri velikih hitrostih vetra in je gradient temperature po višini majhen (padec temperature približno $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ na 100 m višine), vzpostavi se adiabatni temperaturni profil. Vzpostavljen profil hitrosti po višini oziroma gradient hitrosti je tako v bistveno večji meri posledica učinka trenja med zrakom in tlemi, vpliv temperature je zanemarljiv [8].

2.3.1 Hitrostni profil po višini

Podrobneje bomo obravnavali razmere v atmosferski mejni plasti pri nevtralnem stanju statične stabilnosti atmosfere nad ravnim površjem (ravnim reliefom). V tem primeru lahko privzamemo, da so lastnosti atmosferske mejne plasti odvisne le od hrapavosti tal in Coriolisove sile.

Tok zraka v mejni plasti, kot je prikazan na sliki 2.8, obravnavamo kot nestisljiv, dvodimenzionalen tok. Po Prandtlovi analizi mejne plasti pri toku čez ravno ploščo je kontinuitetna enačba zapisana za smer x :

$$\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_z}{\partial z} = 0 \quad (2.6)$$

in enačba ohranitve gibalne količine zapisana za smer x:

$$\frac{\partial U_x}{\partial t} + U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + U_z \frac{\partial U_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{xz}) \quad (2.7)$$

kjer je U_x komponenta hitrost v smeri toka, U_z komponenta hitrosti pravokotna na smer toka in τ_{xz} komponenta strižne napetosti v obravnavani ravnini. Na tleh, kjer velja $U_x = 0$ in $U_z = 0$, se enačba (2.7) poenostavi:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{xz}) \quad (2.8)$$

V mejni plasti je gradient tlaka $\frac{\partial p}{\partial x}$ zanemarljiv, zato pri integriranju enačbe (2.8) upoštevamo $\frac{\partial p}{\partial x} \neq f(z)$:

$$\int_0^z \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) dz = \int_{\tau_0}^{\tau_{xz}} d(\tau_{xz}) \quad (2.9)$$

kjer smo vpeljali $\tau_{xz}|_{z=0} = \tau_0$ in $\tau_{xz}|_z = \tau_{xz}$, tako dobimo rešitev integrala:

$$\tau_{xz} = \tau_0 + z \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (2.10)$$

Po Prandtlovi teoriji lahko izrazimo strižno napetost z vpeljavo mešalne dolžine ℓ :

$$\tau_{xz} = \rho \ell^2 \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial z} \right)^2 \quad (2.11)$$

V enačbi (2.11) smo horizontalno komponento hitrosti (smer x na sliki 2.8) zapisali z $\bar{U}$, ki pomeni povprečno hitrost (ki ne vključuje več oscilacij zaradi turbulence), kjer smo opustili zapis indeksa smeri.

Enačba (2.10) se lahko dodatno poenostavi ob upoštevanju, da je tlačni gradient pri tleh zelo majhen, posledično je drugi člen na desni strani enačbe (2.10) zanemarljiv. Poenostavljeno enačbo vstavimo v enačbo (2.11), da izrazimo vertikalni gradient hitrosti:

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial z} = \frac{1}{\ell} \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \frac{U^*}{\ell} \quad (2.12)$$

kjer je U^* torna hitrost, definirana kot:

$$U^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (2.13)$$

Prandtlova mešalna dolžina je odvisna od oddaljenosti opazovanega elementa toka od stene (z), za tok ob ravnih, gladkih tleh jo izrazimo s faktorjem proporcionalnosti:

$$\ell = \kappa z \quad (2.14)$$

kjer je faktor proporcionalnosti κ von Karmanova konstanta ($\kappa = 0,4$).

Ob upoštevanju enačbe (2.14) lahko zdaj integriramo enačbo (2.12) od višine z_0 do z :

$$\int_0^{\bar{U}(z)} d\bar{U} = \frac{U^*}{\kappa} \int_{z_0}^z \frac{1}{z} dz \quad (2.15)$$

kjer dobimo kot rešitev enačbe (2.15) logaritemski profil hitrosti:

$$\bar{U}(z) = \frac{U^*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2.16)$$

kjer je z_0 višina lahko različna od 0 (gladka tla), saj lahko upoštevamo parameter hrapavosti tal kot višino, zato pravimo, da je z_0 parameter hrapavosti tal. Hrapavost površja, kot jo opisuje parameter hrapavosti, je odvisna od naravnih (npr. poraščenost z drevesi) ali umetnih struktur (npr. stanovanjski bloki v mestu) na

površju. V tabeli 1 so zbrane vrednosti parametra hrapavosti za različne primere površja.

Tabela 1: Vrednosti parametra hrapavosti tal za različne primere površja [8], [9].

Površje	z_0 [m]
Mirujoča gladina jezera	0,0001–0,001
Razburkano morje, ravna puščava	0,001
Travnik na ravnini	0,01
Kmetijske površine, ravna polja s posamičnimi drevesi, ravnina s posamičnimi zgradbami	0,03
Vasi, pokrajina z grmičevjem in drevesi	0,1
Gozdovi, predmestja z nižjimi stavbami (manjši bloki, hiše)	0,3–1,6
Središča večjih mest z večjimi stavbami (nebotičniki)	2

Iz enačbe (2.16), zapisane pri dveh različnih višinah (z_1 in z_2), dobimo iz razmerja hitrosti ($\bar{U}(z_2)/\bar{U}(z_1)$) izraz za izračun hitrosti $\bar{U}(z_2)$ na višini z_2 :

$$\bar{U}(z_2) = \bar{U}(z_1) \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right)} \quad (2.17)$$

Če na višini z_1 od tal z znanim parametrom hrapavosti z_0 izmerimo hitrost vetra $\bar{U}(z_1)$, lahko izračunamo hitrosti vetra $\bar{U}(z_2)$ na višini z_2 , kar je priročno za določitev hitrosti vetra na višini rotorja posamezne vetrne turbine na podlagi meritev hitrosti vetra.

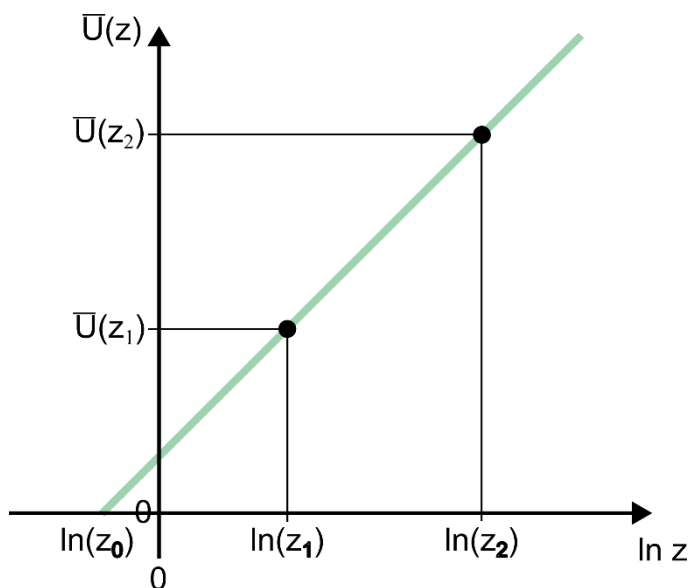
Eksperimentalna določitev profila hitrosti po višini, ki torej vključuje vsaj dve meritvi hitrosti na dveh različnih in med seboj dovolj oddaljenih višinah, lahko služi tudi za lokalno določitev parametra hrapavosti. Enačbo (2.17) preoblikujemo s pretvorbo logaritma kvocienta v razliko logaritmov, da dobimo:

$$\frac{\bar{U}(z_2)}{\ln z_2 - \ln z_0} = \frac{\bar{U}(z_1)}{\ln z_1 - \ln z_0} \quad (2.18)$$

Potem lahko izračunamo parameter hrapavosti kot:

$$z_0 = e^{\left[\frac{\bar{U}(z_1) \ln z_2 - \bar{U}(z_2) \ln z_1}{\bar{U}(z_1) - \bar{U}(z_2)} \right]} \quad (2.19)$$

Lahko pa tudi uporabimo grafično določitev na podlagi enačbe (2.18), ki za logaritemsko absciso definira premico. Na sliki 2.9 je vrisana premica skozi dve merilni točki, v skladu z enačbo (2.18) nam presečišče premice z absciso podaja ničlo premice ($\ln z_0$), torej parameter hrapavosti površja. Tako lahko zdaj razumemo parameter hrapavosti površja tudi kot višino nad tlemi, kjer je hitrost vetra enaka nič, kar smo tudi upoštevali pri integraciji v enačbi (2.15).



Slika 2.9: Grafična določitev parametra hrapavosti na podlagi dveh meritev hitrosti na dveh višinah.

Poudariti je potrebno, da tako določen parameter hrapavosti površja velja za ožje območje določitve, torej območje meritve profila hitrosti po višini. Za večja območja, kjer je načrtovana izgradnja polja vetrnih turbin na veliki površini, je treba upoštevati morebitno spreminjanje parametra hrapavosti in posledično spreminjanje profila hitrosti vetra po višini na celotnem območju.

Obravnavo hitrostnega profila po višini smo začeli s predpostavko o nevtralni statični stabilnosti ozračja. Za preostala primera, statično stabilne in statično nestabilne atmosfere, je vpeljan korekcijski člen, s katerim je upoštevana razslojenost zraka po višini, ki spremeni profil hitrosti:

$$\bar{U}(z) = \frac{U^*}{\kappa} \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - \Psi \right] \quad (2.20)$$

kjer je Ψ empirična funkcija stabilnosti ozračja. Za nestabilno ozračje velja $\Psi < 0$, za stabilno ozračje pa $\Psi > 0$. Za nevtravno statično stabilnost ozračja velja $\Psi = 0$.

Včasih se za določitev hitrosti vetra na višini rotorja uporabi poenostavljen izraz, t. i. Hellmanov potenčni zakon, ki podaja razmerje hitrosti na dveh višinah kot:

$$\frac{\bar{U}(z_1)}{\bar{U}(z_2)} = \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^\alpha \quad (2.21)$$

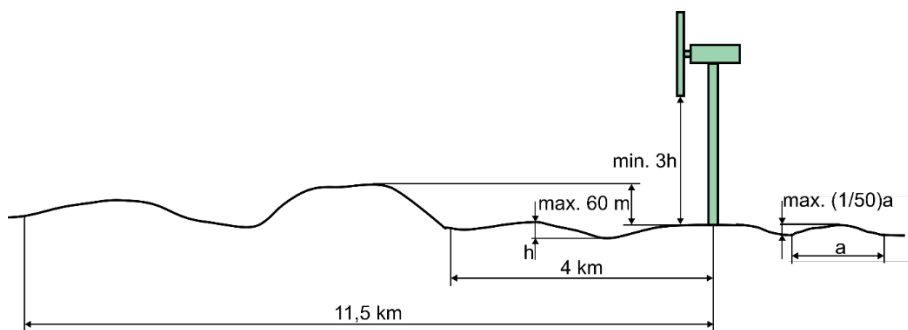
kjer je α eksponent z vrednostjo 0,14. Težava je, da je eksponent α poleg tega, da je odvisen od stanja površja, odvisen tudi od višine oziroma intervala višine (z_1, z_2). Zato je uporaba enačbe (2.21) omejena le na primere, ko je z dvema meritvama hitrosti (na dveh višinah, z_1 in z_2) empirično določen eksponent α , ki pa velja le za dejansko mesto merjenja in tako ni splošno uporaben. Kljub temu pa se pogosto uporablja v priročnikih, priporočilih in v mednarodnem standardu za Sisteme za proizvodnjo električne energije na veter Mednarodne komisije za elektrotehniko IEC 61400 [10].

2.3.2 Vpliv reliefa površja

Logaritemski višinski profil hitrosti smo izpeljali ob predpostavki ravnih tal. Površje Zemlje ima poleg večjih ravnih območij tudi bolj razgiban relief v obliki hribov in dolin, ki vplivajo na tok zraka. Zaradi razgibanega reliefa se lahko višinski profil hitrosti spremeni, kar pomeni, da vetrna turbina obratuje pri drugačnih pogojih, kot nastanejo na ravnem površju. Izbira lokacije postavitve vetrne turbine (oziroma običajno polja vetrnih turbin) tako bistveno vpliva na skupno proizvedeno električno energijo in posledično na ekonomičnost projekta.

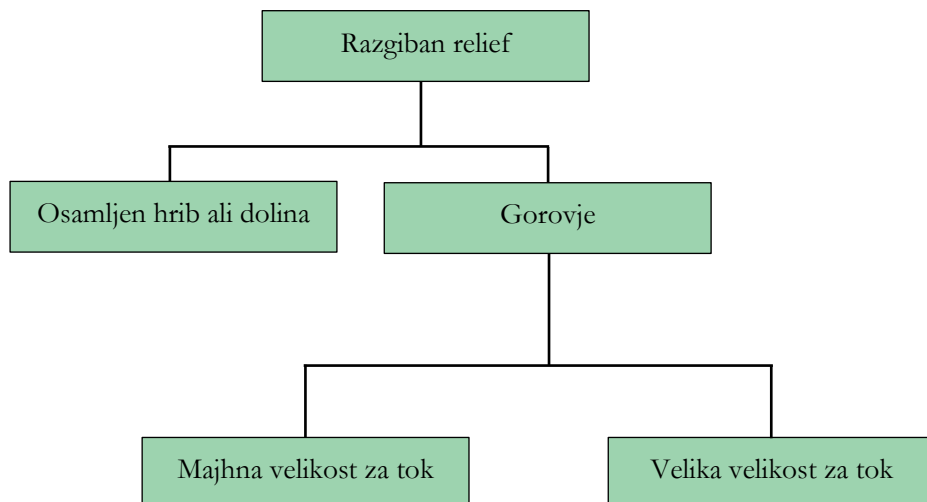
Da bi lažje klasificirali razgiban relief, najprej definiramo ravno površje. Površje smatramo kot ravno, iz stališča vetrne turbine postavljene v tok zraka nad njim, kadar so izpolnjeni pogoji, prikazani na sliki 2.10:

- v krogu polmera 11,5 km od mesta postavitve vetrne turbine, razlika v nadmorski višini med mestom postavitve vetrne turbine in okoliškim površjem nikjer ne presega 60 m,
- 4 km pred vetrno turbino in 4 km za vetrno turbino ni hribov, katerih razmerje višine proti širini presega 1:50,
- višina med najnižjo točko rotorja vetrne turbine in tlemi je vsaj trikrat večja kot maksimalna višinska razlika površja v območju 4 km pred vetrno turbino.



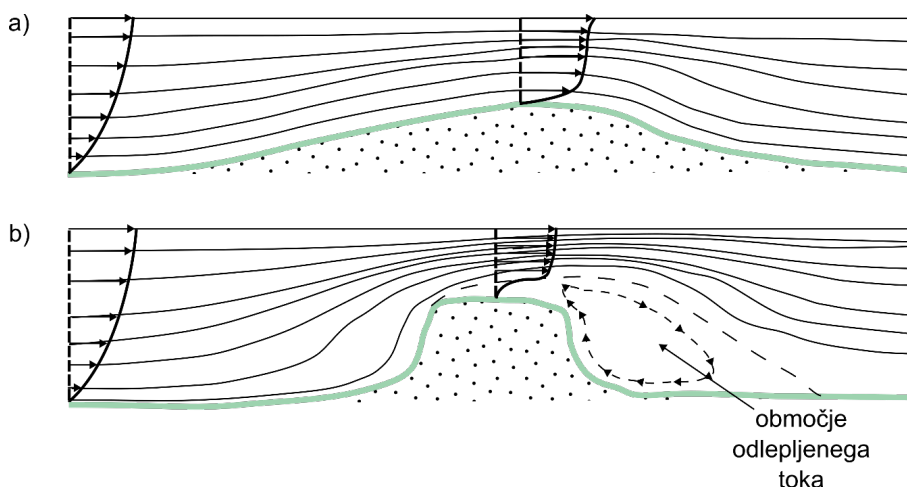
Slika 2.10: Pogoji, ki definirajo ravno površje okoli vetrne turbine.

Površje v okolici vetrne turbine, ki ne zadosti zgoraj navedenim pogojem, se smatra kot površje z razgibanim reliefom. V določenih primerih pa se lahko površje klasificira kot ravno tudi, ko niso izpolnjeni ti pogoji. Pri tem se predvsem upoštevata smer in hitrost vetra in ali posamezno odstopanje od sicer ravnega površja lahko pomembno vpliva na tok zraka čez vetrno turbino. Razgibano površje lahko v splošnem klasificiramo po velikosti in številčnosti sprememb v reliefu (izboklin in vdolbin), kot je to prikazano v diagramu na sliki 2.11.



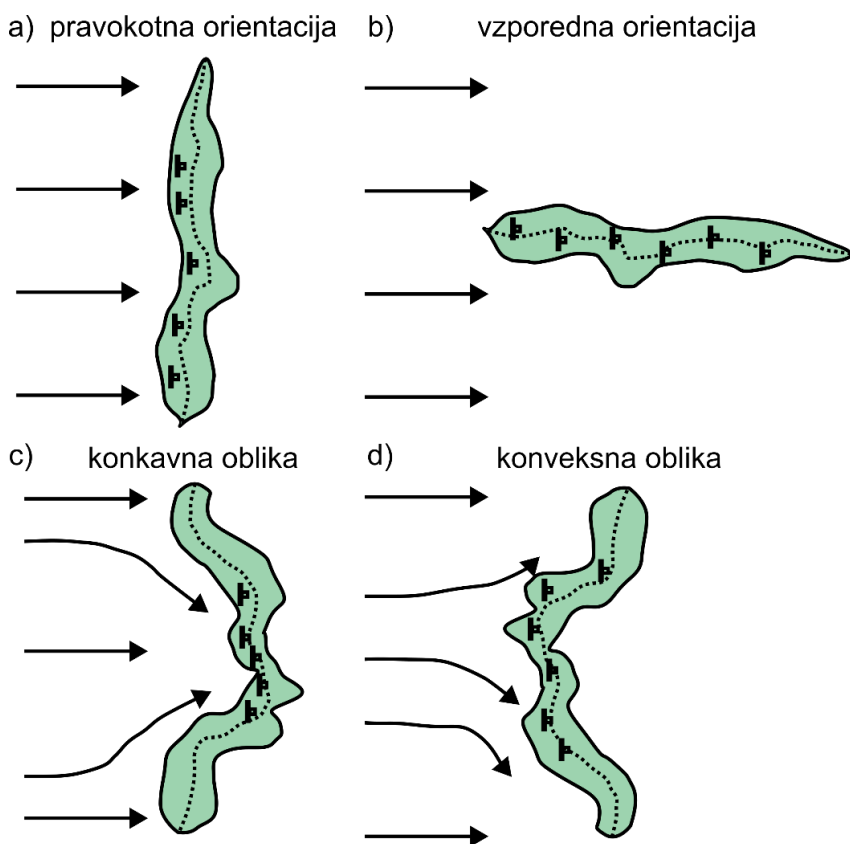
Slika 2.11: Razdelitev razgibanega reliefa iz vidika toka zraka nad njim.

Poglejmo si vpliv osamljenega hriba (ali umetne strukture, stavbe) na tok zraka, ki za tok predstavlja oviro. Izkaže se, da veter pri obtekanju ovire (hrib, stavba) običajno pospeši, nad oviro pa se v vetru pojavi spremenjen višinski profil hitrosti, kot je prikazano na sliki 2.12.



Slika 2.12: Sprememba toka zraka pri obtekanju spremembe na reliefu v primeru: a) položnega hriba, b) strmega hriba.

Odvisno od oblike ovire se lahko pojavi tudi odlepljanje toka, v primeru hribov, če je naklon hriba večji od 30 %, v primeru stavb pa praviloma v vseh primerih (večina stavb je iz vidika toka oglatih s pravokotnim prereзом). V primeru odlepljanja toka se za oviro vzpostavi območje recirkulacije z zmanjšano hitrostjo vetra in povečano turbulenco toka.



2.13: Prikaz različnih primerov slemena s postavljenim poljem vetrnih turbin: a) pravokotna orientacija slemena na smer vetra, b) vzporedna orientacija slemena na smer vetra, c) konkavna oblika slemena in d) konveksna oblika slemena.

Zaradi pospešitve toka zraka pri obtekanju hriba na vetru priležni legi je ta lahko zanimiva lokacija za postavitev vetrne turbine (polja vetrnih turbin). Kot poseben primer navedimo postavitev vetrnih turbin na slemenu. Sleme je strmo pobočje podolgovate oblike z enakomernim naklonom, vrh slemena je ozek v primerjavi z dolžino slemena. V Sloveniji je več hribov z obliko slemena, na primer Pohorje in Kolovrat. Primer postavitve vetrnih turbin na slemenu je vetrna elektrarna Trtar-

Krtolin na Hrvaškem, kjer je postavljeno polje vetrnih turbin na slemenu hribov Trtar in Krtolin nad Šibenikom [11]. Pri slemenih je treba upoštevati njihovo orientacijo glede na veter in obliko slemena, različni primeri so prikazani na sliki 2.13. Iz vidika orientacije je najbolj ugodna pravokotna orientacija pobočja glede na smer vetra, najmanj pa vzporedna. Gledano v smeri vetra ločimo dve obliki slemen, konkavno in konveksno. Pri konkavnih slemenih se tok zraka preusmerja od koncev slemena proti sredini, zato so bolj primerna za postavitev vetrnih turbin kot konveksna slemena, kjer se zrak preusmerja stran od slemena.

Predstavljene značilnosti toka zraka pri obtekanju osamljenega hriba se pojavijo tudi v primeru gorovij, če so dovolj nizka, da predstavljajo majhno velikost za tok. Pri tem je privzet kriterij, da je majhna velikostna skala za tok do 10 % debeline atmosferske mejne plasti. Za gorovja, ki so veliko višja, je analiza toka kompleksnejša, še posebej v kombinaciji z velikimi dolinami. Tudi v primeru vdolbin reliefa, torej dolin, je težje prikazati posplošen vpliv doline na tok zraka zaradi velikega števila vplivnih parametrov, ki določajo, kakšen tok se bo vzpostavil v dolini. Nekateri pomembnejši parametri so: stabilnost ozračja, naklon in hrapavost površja, dolžina in širina doline, orientacija vetra glede na dolino (prečno, vzdolžno), prisotnost drugih ovir v dolini. En možen primer toka čez kompleksen relief velike velikosti je tok vzdolž (paralelno) nizke, dolge doline, obdane z visokim gorovjem, ki predstavlja kanal, v katerem se hitrost toka poveča.

2.3.3 Turbulenca

Hitrost vetra po času ni konstantna, ampak se spreminja. Za analizo časovnih sprememb toka zraka (sprememb hitrosti vetra) se ločeno obravnavajo spremembe na kratkih časovnih intervalih in na dolgih časovnih intervalih.

Počasne spremembe toka zraka (na dolgih časovnih intervalih) so običajno povezane tudi z večjo prostorsko dimenzijo. Značilno jih spremljajo večje spremembe vremena, ki lahko trajajo od nekaj minut do nekaj ur, npr. pojav neviht s sunki vetra, pojav tornadov, na dnevni ravni npr. pojav lokalnih vetrov zaradi razlik v zračnem tlaku (pobočni vetrovi) in na večdnevni do večtedenski ravni npr. prehod ciklona ali anticiklona.

Na drugi strani se hitre spremembe vetra na kratkih časovnih intervalih pojavljajo tudi z manjšo prostorsko dimenzijo, povezujemo jih s pojavom turbulence v toku. Turbulentni tok je mogoče analizirati na mikroskopski ravni, kjer ugotovimo, da poleg molekularnega prenosa gibalne količine (difuzije) zaradi interakcije med molekulami tekočine (zraka) poteka še turbulentni prenos gibalne količine (vrtinčna, turbulentna difuzija) zaradi naključnega gibanja delcev tekočine v vrtincih. Za inženirsko prakso, predvsem za tokove na večji skali (kot je na primer veter v naravi, tok zraka čez vetrno turbino), je smiselno analizirati turbulentni tok iz makroskopskega vidika, kjer uporabimo statistični opis toka. Pri tem je glavna izražena lastnost turbulence v toku oscilacija makroskopskih veličin toka, med drugim hitrosti. Na določenem časovnem intervalu Δt , za veter je običajno to 10 minut, lahko povprečimo časovno odvisno hitrost $U(t)$ in jo razdelimo na časovno povprečeno vrednost $\bar{U}$ in na oscilacijo hitrosti U' , kot je prikazano na sliki 2.14 [12].

Pri obravnavi hitrostnega profila po višini v poglavju 2.3.1 smo v enačbi (2.11) že vpeljali časovno povprečeno hitrost. Zdaj zapišimo definicijo časovno povprečne hitrosti kot:

$$\bar{U} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} U(t) dt \quad (2.22)$$

Potem lahko izrazimo oscilacijo hitrosti vetra kot razliko hitrosti vetra in njegove povprečne hitrosti:

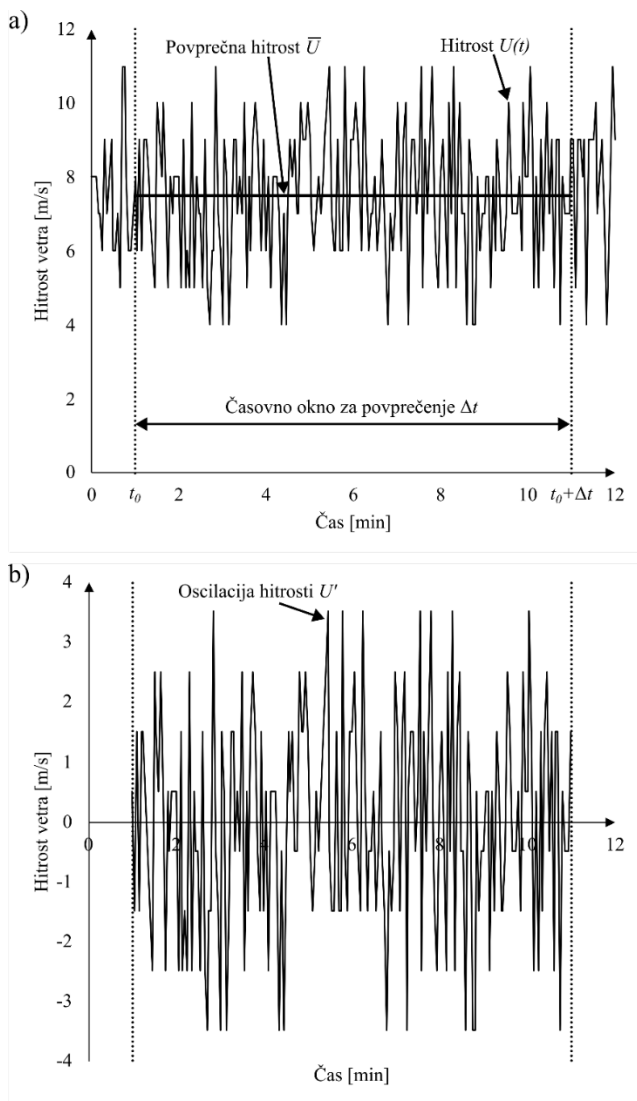
$$U' = U(t) - \bar{U} \quad (2.23)$$

Poglejmo še časovno povprečno vrednost kvadrata hitrosti $U(t)$, torej $\overline{U^2}$:

$$\begin{aligned} \overline{U^2} &= \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} U^2(t) dt = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} (\bar{U} + U')^2 dt \\ &= \bar{U}^2 + \frac{2\bar{U}}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} U' dt + \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} U'^2 dt \end{aligned} \quad (2.24)$$

Ker je časovno povprečje oscilacije hitrosti enako nič, sledi iz enačbe (2.24), da je povprečna vrednost kvadrata hitrosti:

$$\overline{U'^2} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} U'^2 dt = \overline{U^2} - \bar{U}^2 \quad (2.25)$$



Slika 2.14: Prikaz hitrosti vetra po času: a) časovno povprečenje na časovnem intervalu $\Delta t = 10 \text{ min}$, b) oscilacija hitrosti.

Zdaj integral v enačbi (2.25) ni enak nič (srednja vrednost kvadrata oscilacije hitrosti $\overline{U'^2}$ ni enaka nič), torej ugotovimo, da povprečna vrednost kvadrata hitrosti ni enaka kvadratu povprečne hitrosti:

$$\overline{U^2} \neq \bar{U}^2 \quad (2.26)$$

Povprečno vrednost kvadrata hitrosti $\overline{U'^2}$ lahko razumemo tudi kot varianco, torej statistično mero za razpršenost vrednosti trenutne hitrosti $U(t)$ okoli časovno povprečne vrednosti $\bar{U}$, kar je očitno, če zapišemo enačbo (2.25) z upoštevanjem zveze, podane z enačbo (2.23):

$$\overline{U'^2} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} (U(t) - \bar{U})^2 dt \quad (2.27)$$

Uporabimo še definicijo za standardni odklon:

$$\sigma_U = \sqrt{\overline{U'^2}} \quad (2.28)$$

Za opis turbulence v toku je vpeljana intenzivnost turbulentnega toka $I_{T,u}$, ki je definirana kot razmerje med standardnim odklonom hitrosti toka (vetra) in časovno povprečno hitrostjo za smer u (vzdolž smeri vetra):

$$I_{T,u} = \frac{\sigma_U}{\bar{U}} = \frac{\sqrt{\overline{U'^2}}}{\bar{U}} \quad (2.29)$$

Vrednosti intenzivnosti turbulentnega toka so običajno v območju od 1 do 40 odstotkov časovno povprečne vrednosti hitrosti toka. Glede na predstavljeno statistično obravnavo turbulence velja, da so oscilacije hitrosti toka normalno porazdeljene s srednjo vrednostjo $\bar{U}$ in standardnim odklonom σ_U

Pri določitvi intenzivnosti turbulentnega toka iz meritev se je treba zavedati, da lahko na njeno vrednost vpliva izbira velikosti časovnega intervala za povprečenje in odzivnost izbranega merilnika hitrosti vetra.

Pomemben vzrok za pojav turbulence v atmosferski mejni plasti je hrapavost površja v kombinaciji z razgibanim reliefom. Intenzivnost turbulentnega toka je zato pogosto izražena s parametrom hrapavosti površja, ki je običajno poznana za predvideno lokacijo postavitve vetrne turbine (oziroma se določi po prej opisanem postopku) in tako je možno hitro oceniti intenzivnost turbulence v fazi projektiranja. Pri tem se uporabi empirična zveza med standardnim odklonom hitrosti toka in torni hitrostjo:

$$\sigma_U \approx 2,5U^* \quad (2.30)$$

Če zdaj izrazimo torni hitrost U^* iz enačbe (2.30) in jo vstavimo v enačbo (2.16), ki podaja višinski profil hitrosti, dobimo intenzivnost turbulence po višini, izraženo s parametrom hrapavosti z_0 :

$$I_{T,u}(z) = \frac{\sigma_U}{\bar{U}(z)} = \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (2.31)$$

Standardni odklon hitrosti σ_U je po višini nespremenljiv, časovno povprečna hitrost vetra $\bar{U}(z)$ po višini mejne plasti narašča, torej se intenzivnost turbulence po višini zmanjšuje. Iz eksperimentov sledi še posplošena ugotovitev, da z naraščanjem hitrosti vetra intenzivnost turbulence pada.

Standard IEC 61400 [10] podaja drugačno zvezo za oceno standardnega odklona hitrosti toka vetra na višini rotorja vetrne turbine:

$$\sigma_U = I_{ref}(0,75\bar{U}_{rot} + b) \quad (2.32)$$

Kjer je b empirični parameter z vrednostjo 5,6 m/s, $\bar{U}_{rot}$ časovno povprečna hitrost vetra na višini rotorja vetrne turbine in I_{ref} referenčna vrednost intenzivnosti turbulentnega toka pri hitrosti 15 m/s in znaša 0,12 za območja z nizko intenziteto turbulence, 0,16 za območja s srednjo intenziteto turbulence in 0,18 za območja z visoko intenziteto turbulence. V referenčni vrednosti intenzivnosti turbulentnega toka I_{ref} je torej zajet vpliv hrapavosti površja.

Do zdaj smo analizirali turbulenco vzdolž smeri vetra, ki pri vetru nad ravnim površjem običajno prevladuje. Iz teorije turbulentnega toka pa je znano, da je turbulenca trodimenzionalen pojav. Standard IEC 61400 [10] tako podaja prečno komponento intenzivnosti turbulentnega toka (v prečni smeri na smer vetra) $I_{T,v}$:

$$I_{T,v} = \frac{\sigma_v}{\bar{U}} = 0,7I_{T,u} \quad (2.33)$$

in navpično komponento $I_{T,w}$:

$$I_{T,w} = \frac{\sigma_w}{\bar{U}} = 0,5I_{T,u} \quad (2.34)$$

2.4 Analiza podatkov iz meritev in ocena razpoložljivosti vetrov

Če imamo na voljo podrobne meritve hitrosti vetra na določeni lokaciji, lahko za to lokacijo na podlagi analize teh podatkov ocenimo, kakšna je razpoložljivost vetra (hitrost oziroma moč). To lahko prikažemo v diagramih kot potek hitrosti ali moči vetra po času, kot porazdelitev frekvence posameznih hitrosti vetra po času ali v grafični obliki z rožami vetrov.

2.4.1 Razpoložljiva moč vetra

Moč vetra določimo z vpeljavo navideznega diska v toku s presekom A , ki je lahko enak preseku rotorja vetrne turbine, zato govorimo o konceptu gnanega diska. Podrobnejša analiza dinamike toka na konceptu gnanega diska bo predstavljena v naslednjem poglavju o dinamiki toka v vetrnih turbinah z vodoravno osjo, za določitev moči vetra potrebujemo le definicijo masnega toka čez gnani disk:

$$\frac{dm}{dt} = \rho AU \quad (2.35)$$

kjer je ρ gostota zraka in U hitrost vetra.

V splošnem je moč definirana kot sprememba kinetične energije po času, kar zapišemo ob predpostavki, da je hitrost toka zraka po času konstantna in po preseku gnanega diska uniformna, kot:

$$P = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} m U^2 \right) = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} U^2 \quad (2.36)$$

Z upoštevanjem enačbe (2.35) za masni tok zraka v enačbi (2.36) izrazimo moč vetra čez gnani disk:

$$P = \frac{1}{2} \rho A U^3 \quad (2.37)$$

Iz enačbe za moč vetra (2.37) je razvidno, da je moč vetra proporcionalna kubu hitrosti vetra. Na hitrost vetra seveda ne moremo vplivati, prav tako ne na gostoto zraka, torej je edina spremenljivka, na katero imamo vpliv v fazi projektiranja vetrne turbine, presek rotorja oziroma njegov premer. Čeprav na gostoto in hitrost vetra ne moremo vplivati, je v fazi izbire lokacije postavitve vetrne turbine dobro poznati spremembe obeh parametrov, saj nista niti gostota zraka niti hitrost vetra po času konstantni. Gostota zraka je odvisna od temperature zraka, ki se lahko spreminja po času (npr. po mesecih). Vendar pa je že iz enačbe (2.37) razvidno, da ima bistveno večji vpliv na razpoložljivo moč vetra spreminjanje hitrosti vetra, zato bo v nadaljevanju podrobneje predstavljena analiza sprememb hitrosti vetra po času.

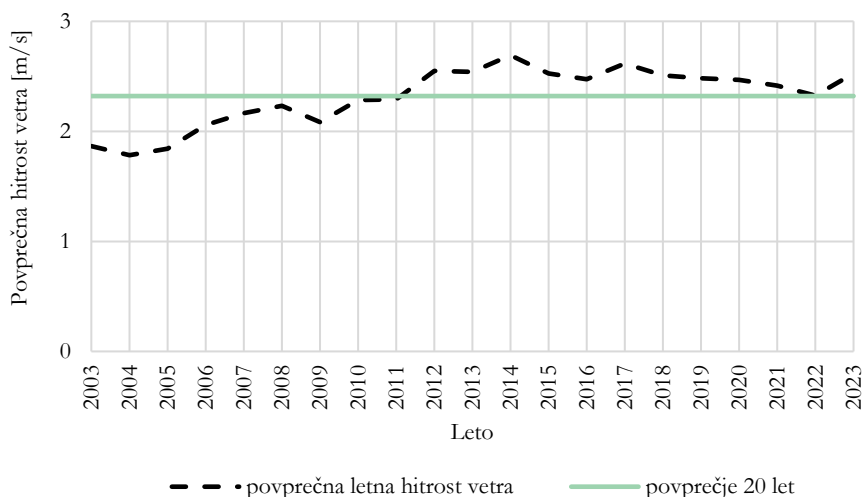
2.4.2 Časovna analiza

Spremembe hitrosti vetra lahko analiziramo na različnih časovnih intervalih, tipična je delitev po naslednjih časovnih intervalih:

- večletne spremembe,
- letne spremembe,
- dnevne spremembe,
- kratkotrajne (urne, minutne) spremembe.

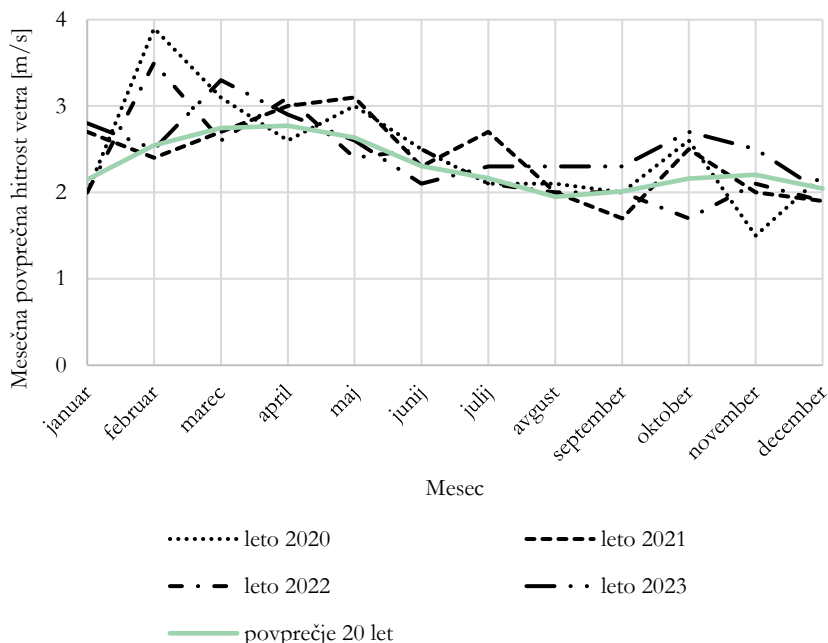
Poznavanje sprememb v hitrosti vetra na vseh časovnih intervalih je pomembno pri načrtovanju vetrnih elektrarn (oziroma pri izbiri lokacije postavitve vetrnih elektrarn). Ker je predvidena obratovalna doba za vetrne turbine običajno od 20 do 25 let, je pomembno poznati oziroma napovedati dolgoročne, večletne spremembe hitrosti vetra. Na sliki 2.15 je primer prikaza podatkov večletnih meritev hitrosti, kjer so v grafu prikazane letne povprečne vrednosti hitrosti vetra med letoma 2003 in 2023 ter 20-letno povprečje za letališče Edvarda Rusjana v Mariboru. Iz prikaza

podatkov na sliki 2.15 je razvidno, da je povprečna hitrost po letih naraščala, tako so bile hitrosti vetra od leta 2003 do leta 2011 pod dolgoletnim povprečjem in od leta 2012 do leta 2023 nad dolgoletnim povprečjem.



Slika 2.15: Prikaz letnih povprečnih vrednosti hitrosti vetra in 20-letnega povprečja za letališče Edvarda Rusjana v Mariboru [13].

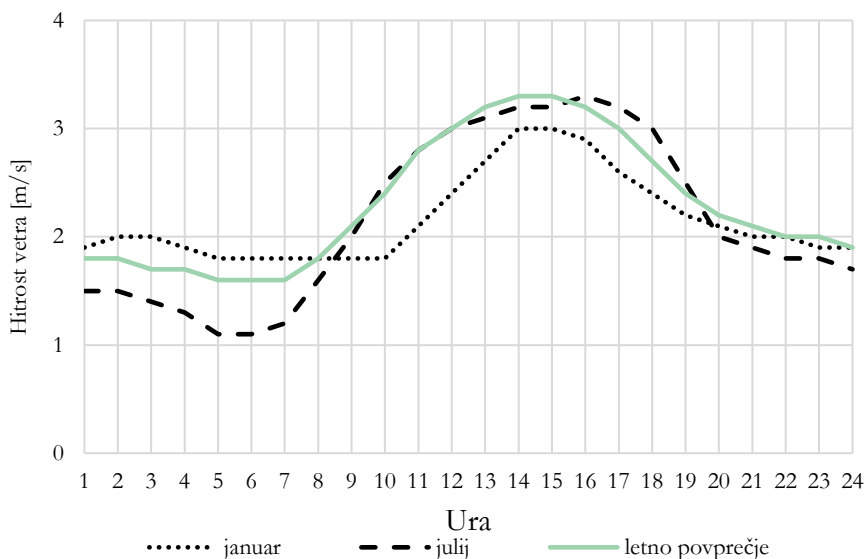
Za posamezno leto je v grafu na sliki 2.15 prikazana letna povprečna hitrost vetra, vendar pa se ta po mesecih lahko tudi bistveno spreminja. Te spremembe povezujemo s spremembami vremena po letnih časih. Iz grafičnega prikaza dolgoletnih povprečnih hitrosti vetra po mesecih na sliki 2.16 je razvidno, da se največje hitrosti vetra na letališču Edvarda Rusjana v Mariboru pojavljajo spomladi (marec, april), najmanjše hitrosti pa ob koncu poletja oziroma na začetku jeseni (avgust, september). Na sliki 2.16 je še prikazan potek mesečnih povprečnih hitrosti vetra za štiriletno obdobje, za leto 2020, 2021, 2022 in 2023, iz česar je razvidno, da je na podlagi zgolj enoletnega spremljanja hitrosti vetra po mesecih težje ugotoviti vpliv letnega časa (meseca) na hitrost vetra. Na primer v prikazanem štiriletnem obdobju leto 2020 zelo odstopa od dolgoletnega povprečja. Poleg razlik v povprečni hitrosti vetra je razviden tudi nekoliko spremenjen potek hitrosti vetra po letu, kjer je bila največja mesečna povprečna hitrost vetra v februarju in najmanjša mesečna povprečna hitrost vetra v novembru.



2.16: Prikaz mesečnih povprečnih hitrosti za posamezno leto štiriletnega obdobja in prikaz dolgoročnega (20-letnega) povprečja hitrosti vetra po posameznih mesecih leta na letališču Edvarda Rusjana v Mariboru [13].

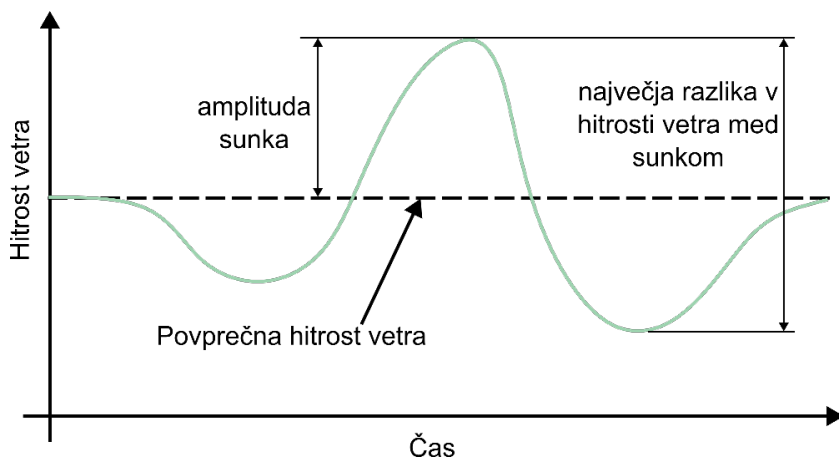
Pri pregledu nastanka vetrov smo v poglavju Lokalni vetrovi že omenili, da se zaradi razlik v segrevanju površja (ob obali ali ob pobočju) med dnevom in nočjo pojavi sprememba v smeri vetra. Poleg tega pa se skozi dan bistveno spremeni tudi hitrost vetra, tako ima veter običajno največje hitrosti podnevi, ko se površje bolj segreva kot ponoči, ko so hitrosti vetra običajno najmanjše. Dnevne spremembe hitrosti vetra se spreminjajo skozi leto, tako so v splošnem na severni polobli največje razlike v hitrosti vetra med dnevom in nočjo spomladi in poleti, najmanjše pa pozimi. Poleg tega se pojavljajo razlike v dnevnih spremembah tudi med posameznimi leti. Spremljanje dnevnih sprememb hitrosti vetra je seveda bolj kompleksno (treba je imeti meritve vsaj po urah), prav tako napoved, saj so dnevne spremembe v hitrosti vetra povezane z več dejavniki, med drugim zemljepisno širino, nadmorsko višino in razgibanostjo okoliškega reliefa. Na sliki 2.17 je prikazan potek hitrosti vetra na letališču Edvarda Rusjana v Mariboru po urah za povprečen dan v letu 2023 (povprečje posamezne urne meritve skozi celo leto) in za povprečen dan v januarju in juliju (povprečje urne meritve skozi posamezen mesec). Opazimo, da je splošen

potek hitrosti vetra po urah enak v januarju in v juliju, z nižjimi hitrostmi vetra ponoči kot podnevi, kjer seveda upoštevamo, da je januarja dan krajši kot julija.



2.17: Prikaz hitrosti vetra po urah v dnevu na letališču Edvarda Rusjana v Mariboru. Prikazano je letno povprečje, ki ga lahko razumemo kot povprečen dan v letu, in povprečji za januar in julij, ki predstavljata povprečna dneva v januarju in juliju [13].

Kratkotrajne spremembe, ki jih zaznamo znotraj ene ure oziroma minute, so večinoma posledica turbulence, kar smo podrobneje predstavili v poglavju 2.3.3 Turbulenca. V kaotičnem poteku hitrosti vetra, ki ga analiziramo v krajšem (nekajminutnem) časovnem intervalu in je posledica turbulence, pa lahko prepoznamo diskretne, ponovljive dogodke s podobnim vzorcem pojava izrazitega kratkotrajnega povišanja hitrosti vetra. Tem dogodkom pravimo sunki vetra, tipičen potek enega sunka vetra je prikazan na sliki 2.18.



Slika 2.18: Potek hitrosti med sunkom vetra z označeno amplitudo in največjo razliko hitrosti.

2.4.3 Prikaz razpoložljivosti vetra s porazdelitvijo hitrosti

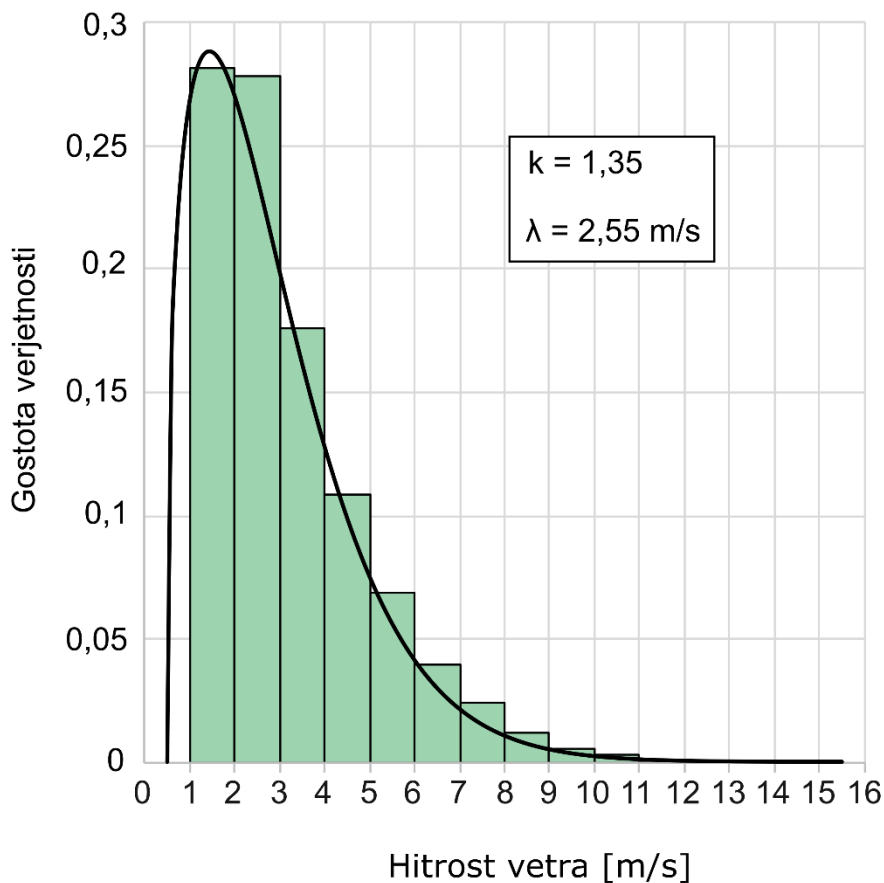
Slabost analize sprememb hitrosti vetra po času za različne časovne intervale, kot je bila predstavljena v prejšnjem poglavju, je v tem, da podatki niso predstavljeni kompaktno in na način, ki bi omogočal enostavnejši vpogled v to, kolikšen delež časa je na voljo določena hitrost vetra. Brez poznavanja podatka o deležu časa, ko je na voljo veter z določeno hitrostjo, je težje presoditi o primernosti lokacije za postavitev vetrne turbine (oziroma polja vetrnih turbin). Zato se pogosto podatke predstavi v obliki frekvenčne porazdelitve hitrosti vetra, iz česar je lažje razbrati, kolikšna je razpoložljivost vetra z določeno hitrostjo.

Podatke iz meritev hitrosti vetra najprej razvrstimo v posamezne hitrostne razrede, pri tem se običajno uporabi širina hitrostnega razreda 1 m/s. Za vsak hitrostni razred i lahko izračunamo relativno frekvenco, ki podaja delež časa t_i , ko je veter pihal s hitrostjo U_i , od skupnega časa merjenja T :

$$f_i = \frac{t_i}{T} \quad (2.38)$$

Podatke lahko prikažemo v obliki histograma, ki prikazuje porazdelitev relativne frekvence, kot je prikazano na sliki 2.19 na primeru meritev hitrosti vetra na letališču Edvarda Rusjana v Mariboru. Na sliki 2.19 je prikazana tudi krivulja porazdelitve

gostote verjetnosti hitrosti vetra, s katero preidemo iz diskretnega matematičnega opisa na zvezen opis.



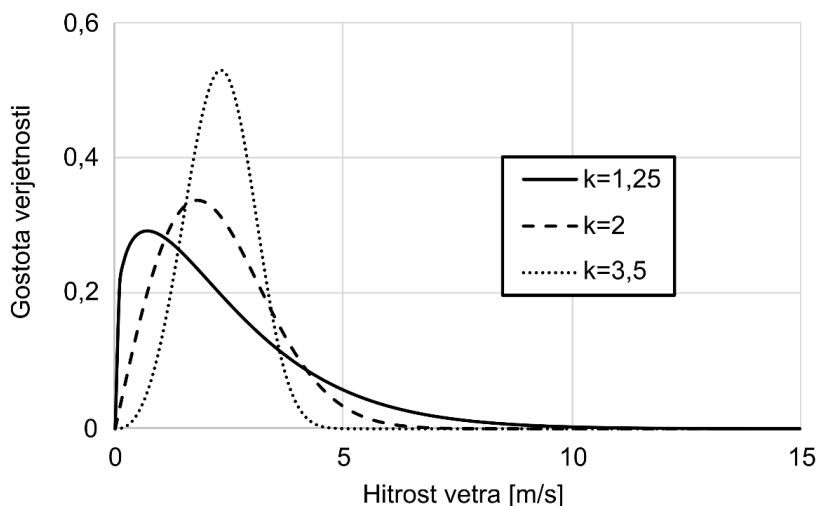
2.19: Porazdelitev hitrosti vetra na letališču Edvarda Rusjana v Mariboru. Prikazana je porazdelitev relativne frekvence hitrosti vetra s histogramom in Weibullova porazdelitev gostote verjetnosti s krivuljo, za katero sta izpisana parametra porazdelitve [13].

Porazdelitev gostote verjetnosti opišemo z Weibullovo porazdelitvijo:

$$p(U) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{U}{\lambda} \right)^{k-1} e^{-(U/\lambda)^k} \quad (2.39)$$

ki je definirana z dvema parametroma: k je parameter oblike in λ je parameter merila.

Parameter oblike k določa obliko porazdelitvene krivulje in nam pove, kolikšen je raztros hitrosti vetra okoli povprečne vrednosti. Parameter oblike k lahko tudi v grobem povežemo z geografsko lego vetrov, kjer ločimo tri značilna področja. Majhne vrednosti ($k \rightarrow 1$) pomenijo večji raztros hitrosti vetra okoli povprečne hitrosti, kar je običajno značilnost vetrov v polarnem pasu. Zmerne vrednosti ($k \approx 2$) so običajne za vetrove v zmerno toplem pasu (področje valujočih zahodnikov). Za velike vrednosti parametra oblike ($k \approx 3 - 4$) je značilna najmanjša spremenljivost hitrosti vetra okoli povprečne vrednosti, takšni so običajno vetrovi v tropskem pasu (področje pasatov). Na sliki 2.20 so predstavljeni trije značilni primeri Weibullove porazdelitve.



2.20: Primeri Weibullovih porazdelitev gostote verjetnosti za hitrost vetra za tri vrednosti oblikovnega parametra.

Povprečno hitrost vetra $\bar{U}$ lahko zdaj določimo za Weibullovo porazdelitev gostote verjetnosti hitrosti vetra po definiciji za srednjo vrednost porazdelitve gostote verjetnosti:

$$\bar{U} = \int_0^{\infty} U p(U) dU = \lambda \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (2.40)$$

kjer je Γ funkcija gama.

Zvezen opis s porazdelitvijo gostote verjetnosti omogoča izračun verjetnosti, da se na lokaciji pojavi veter s hitrostjo U med spodnjo mejo U_{min} in zgornjo mejo U_{max} :

$$F(U_{min} \leq U \leq U_{max}) = \int_{U_{min}}^{U_{max}} p(U) dU \quad (2.41)$$

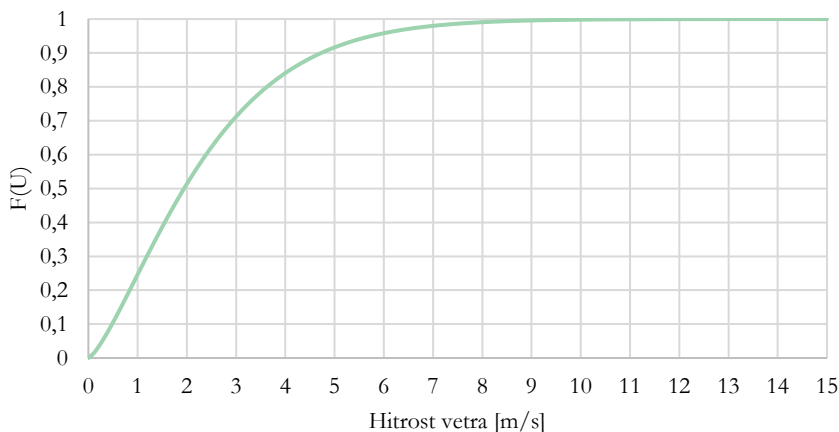
Poseben primer je kumulativna porazdelitev verjetnosti $F(U)$, ki podaja verjetnost, da je hitrost vetra manjša ali enaka hitrosti U . Z vpeljavo nove spremenljivke ($U' \leq U$) in zapisom integrala v enačbi (2.41) v mejah od 0 do U dobimo kumulativno porazdelitev verjetnosti:

$$F(U) = \int_0^U p(U') dU' \quad (2.42)$$

Za Weibullovo porazdelitev gostote verjetnosti je rešitev enačbe (2.42) podana z izrazom:

$$F(U) = 1 - e^{-(U/\lambda)^k} \quad (2.43)$$

Primer Weibullove kumulativne verjetnosti, kot jo podaja enačba (1.41), je za letališče Edvarda Rusjana v Mariboru prikazan v grafu na sliki 2.21.



Slika 2.21: Kumulativna porazdelitev verjetnosti hitrosti vetra za letališče Edvarda Rusjana v Mariboru [13].

Pogosto se uporablja enostavnejša Rayleigheva porazdelitev gostote verjetnosti za hitrost vetra, ki je poseben primer Weibullove porazdelitve za parameter oblike $k = 2$. Enačba (2.40) se poenostavi v:

$$\bar{U} = \lambda \frac{\sqrt{\pi}}{2} \quad (2.44)$$

kjer smo upoštevali $\Gamma\left(\frac{3}{2}\right) = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$. Če izrazimo iz enačbe (2.44) parameter merila λ in vstavimo izraz v enačbo (2.39) ob upoštevanju $k = 2$, dobimo izraz za Rayleighevo porazdelitev gostote verjetnosti, ki je definirana le z enim parametrom, povprečno hitrostjo vetra $\bar{U}$:

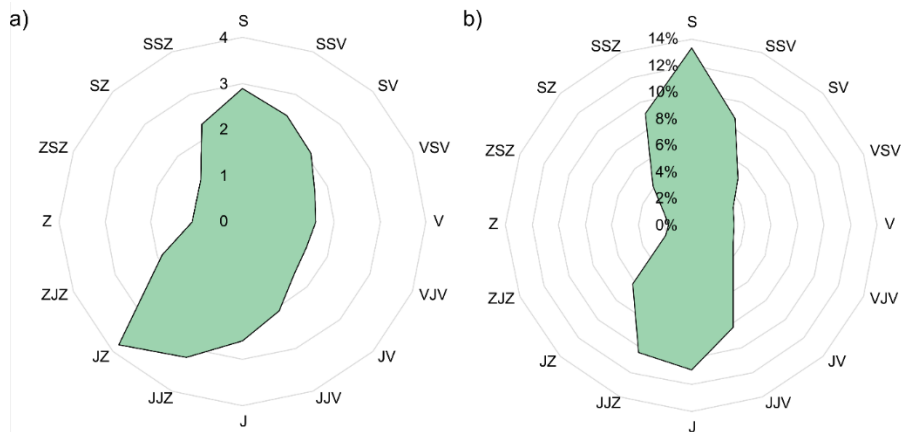
$$p(U) = \frac{\pi}{2} \left(\frac{U}{\bar{U}} \right) e^{\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{U}{\bar{U}} \right)^2 \right]} \quad (2.45)$$

Njena kumulativna porazdelitev verjetnosti je:

$$F(U) = 1 - e^{\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{U}{\bar{U}} \right)^2 \right]} \quad (2.46)$$

Proizvajalci vetrnih turbin pogosto uporabijo Rayleighevo porazdelitev za izračun referenčnih vrednosti proizvedene energije vetrne turbine.

Do zdaj smo časovne spremembe vetra obravnavali kot spremembe hitrosti vetra. Poleg hitrosti se spreminja še smer vetra. Poznavanje razpoložljivosti vetra glede na smer ima pomembno vlogo pri določitvi postavitve polja vetrnih turbin, saj je smiselno postaviti vetrno turbino glede na prevladujočo smer vetra. Poleg tega je v primeru večjega števila vetrnih turbin treba upoštevati njihovo relativno lego, da ne pride do zastiranja oziroma drugih neželenih učinkov (vpliv tokovne brazde ene vetrne turbine na drugo). Meritve hitrosti vetra po smereh prikažemo z rožo vetrov, kjer prikažemo povprečno hitrost za posamezno smer. Primer rože vetrov je na sliki 2.22 za meritve hitrosti vetra na letališču Edvarda Rusjana v Mariboru. Poleg hitrosti vetra lahko z rožo vetrov prikažemo tudi porazdelitev relativne frekvence vetra glede na smer za letališče Edvarda Rusjana v Mariboru, kar je tudi prikazano na sliki 2.22.



Slika 2.22: Roža vetrov za letališče Edvarda Rusjana v Mariboru: a) prikaz povprečnih hitrosti vetra v m/s, b) prikaz relativne frekvence vetra po smereh neba. Po obodu so prikazane kratice za smeri neba, glavne smeri so: S – sever, V – vzhod, J – jug in Z – zahod. Koncentrični krogi predstavljajo hitrost vetra (m/s), pri vsakem je pripisana vrednost [13].

S slike 2.22 je torej razvidno, da se največje povprečne hitrosti vetra na letališču Edvarda Rusjana v Mariboru pojavljajo iz smeri jugozahoda, največji delež časa pa veter v povprečju piha iz smeri severa in juga. Pri odločanju o postavitvi vetrnih turbin je treba najti najbolj ugodno kombinacijo hitrosti in smeri vetra, ob upoštevanju, da moč vetra narašča s tretjo potenco. Za primer, prikazan na sliki 2.22, bi bila najverjetneje ugodna postavitev vetrnih turbin proti vetru s smerjo med jugozahodom in jugom, saj v povprečju veter iz teh smeri piha dokaj pogosto, hkrati pa ima v povprečju ta veter najvišje povprečne hitrosti. Pri postavitvi vetrne turbine proti vetru iz severne smeri bi sicer res veter pihal malo pogosteje, vendar s precej nižjo hitrostjo kot v primeru jugozahodne do južne smeri, kar pomeni izrazito manjšo moč vetra iz severne smeri.

2.5 Ocena pridobivanja energije

Na podlagi analize meritev hitrosti vetra, ki smo jo predstavili v predhodnem poglavju, je ob znani karakteristiki vetrne turbine mogoče napovedati, koliko energije bo v opazovanem časovnem obdobju lahko vetrna turbina proizvedla. Natančnost napovedi je zaradi velike spremenljivosti hitrosti tako na kratkih kot dolgih časovnih intervalih odvisna od reprezentativnosti vzorca meritev, izvedenega v izbranem časovnem intervalu. Za ugotavljanje reprezentativnosti meritev, izvedenih na lokaciji, kjer je predvidena postavitev vetrne turbine, v določenem

krajšem časovnem obdobju (eno leto), se lahko naredi primerjava teh meritev s podatki iz bližnjih meteoroloških postaj za daljša časovna obdobja (več let, desetletij). Če se načrtuje postavitve polja več vetrnih turbin, pa je treba upoštevati še vpliv vetrnih turbin na veter, ki so mu izpostavljene preostale vetrne turbine. Zaradi krajšega časa obratovanja od predvidenega skozi življenjsko dobo vetrne turbine (npr. zaradi okvar) je za pričakovati, da bo dejanska količina proizvedene energije manjša od napovedane.

2.5.1 Izračun na podlagi razpoložljivosti vetra in karakteristike za eno vetrno turbino

Za znano porazdelitev relativne frekvence hitrosti vetra, kot je podana s histogramom na sliki 2.19, lahko ob znanem histogramu moči izračunamo proizvedeno energijo po posameznem hitrostnem razredu. Za vsak hitrostni razred vetra se proizvedena energija po času T izračuna kot:

$$E_i = f_i P_i T \quad (2.47)$$

Če torej seštejemo prispevke proizvedene energije po hitrostnih razredih, dobimo skupno proizvedeno energijo po času T :

$$E_{tot} = \sum E_i = T \sum f_i P_i \quad (2.48)$$

Podobno, kot smo to naredili pri časovni analizi razpoložljivosti vetra, kjer smo prešli iz diskretnega na zvezni opis, lahko tudi pri izračunu proizvedene energije preidemo na zvezni opis s porazdelitvijo gostote verjetnosti hitrosti vetra (U) (bodisi Weibullova bodisi Rayleigheva) in z analitično krivuljo karakteristike turbine $P(U)$:

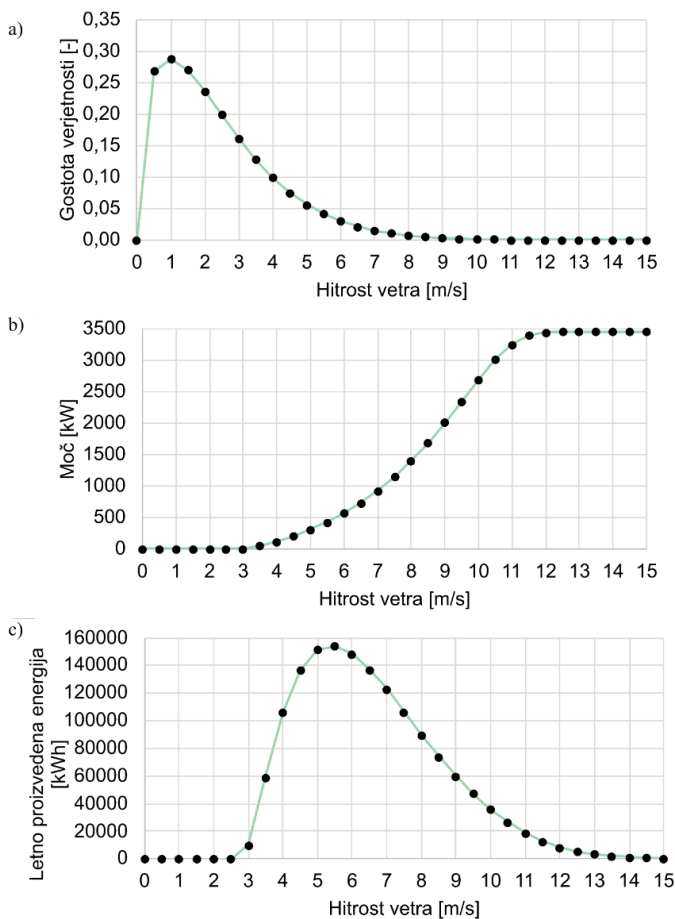
$$E(U) = p(U)P(U)T \quad (2.49)$$

Na sliki 2.23 je prikazan primer izračuna ocenjenega poteka proizvodnje energije v odvisnosti od hitrosti vetra po enačbi (2.49) na letni ravni, če bi na letališču Edvarda Rusjana v Mariboru postavili vetrno turbino Vestas V112-3.45. Opazimo, da se z največjo verjetnostjo pojavlja veter s hitrostjo 1 m/s, vetrna turbina pa obratuje z maksimalno močjo pri hitrostih vetra nad 12 m/s, produkt obeh, ki nastopata v enačbi (2.49), pa doseže maksimum pri 5,5 m/s.

Skupno proizvedeno energijo v opazovanem časovnem obdobju T dobimo potem z integriranjem (površina pod krivuljo na sliki 2.23 c):

$$E = T \int_0^{\infty} p(U)P(U)dU \quad (2.50)$$

Integral v enačbi (2.50) se reši numerično, kjer se med točkami iz meritev karakteristike vetrne turbine privzame linearna zveza med hitrostjo vetra in močjo vetrne turbine.



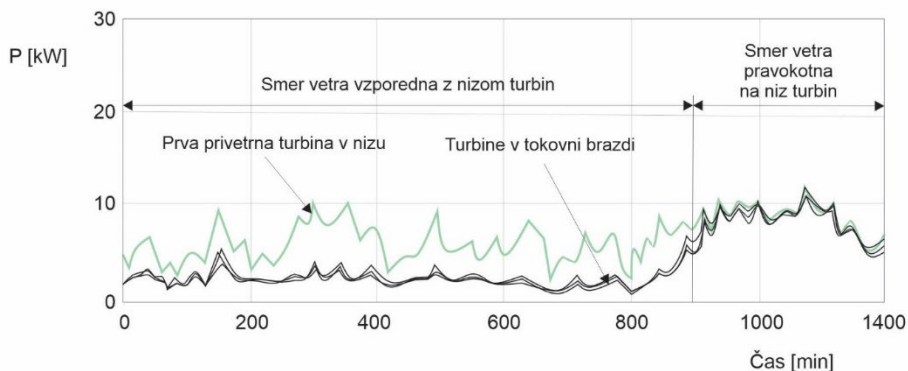
Slika 2.23: Prikaz ocene proizvedene energije v primeru, da bi vetrno turbino Vestas V112-3.45 postavili na letališču Edvarda Rusjana v Mariboru. Prikazani so grafi: a) porazdelitve gostote verjetnosti hitrosti vetra, b) karakteristika vetrne turbine in c) izračunan potek letno proizvedene energije v odvisnosti od hitrosti vetra.

2.5.2 Polje vetrnih turbin

Vetrna turbina vpliva na tok zraka za njo s tokovno brazdo, ki jo ustvarjajo lopatice. Če je v tok za vetrno turbino postavljena še ena vetrna turbina, je za to vetrno turbino treba upoštevati, da je izpostavljena učinku tokovne brazde, ki se kaže v zmanjšani hitrosti toka zraka in povečani turbulenci. Posledično bo druga vetrna turbina, postavljena za prvo, proizvedla manj energije kot prva.

Poenostavljeno lahko obravnavamo tokovno brazdo kot cilindrično območje za vetrno turbino, katerega premer je nekoliko večji od premera rotorja vetrne turbine. V tem območju je zmanjšanje hitrosti vetra odvisno od tega, koliko gibalne količine vetra se pretvori na prvi vetrni turbini. Z oddaljevanjem od prve turbine v smeri vetra se premer tega cilindričnega območja povečuje, razlike v hitrosti zraka med brazdo in prostim tokom pa se zmanjšujejo, dokler se povsem ne izenačijo in se ponovno vzpostavi nevznemirjen (prosti) tok.

Primer vpliva ene vetrne turbine na proizvodnjo energije preostalih vetrnih turbin je prikazan na sliki 2.24. Viden je očiten upad moči vetrnih turbin, ki so izpostavljene tokovni brazdi prve vetrne turbine (za skoraj polovico moči prve vetrne turbine).



Slika 2.24: Zmanjšanje moči vetrnih turbin zaradi vpliva tokovne brazde prve vetrne turbine.

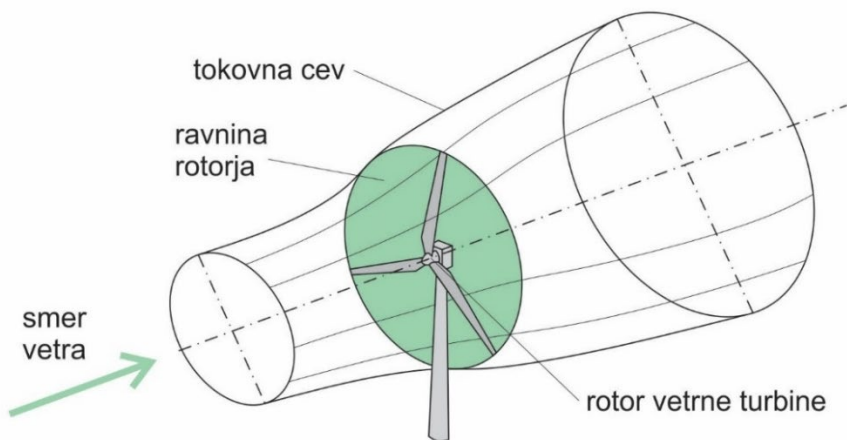
3 Dinamika toka v vetrnih turbinah z vodoravno osjo

3.1 Uvod

Vetrne turbine so naprave za izkoriščanje kinetične energije vetra. Za uspešno pretvorbo in izrabo dela kinetične energije vetra se mora znižati hitrost tistega dela toka, ki teče skozi rotor. Tako je kinetična energija tekočinskega toka za rotorjem nižja od kinetične energije pred rotorjem. Ob predpostavki, da lahko ločimo zrak na del, ki teče skozi rotor, in del, na katerega rotor ne vpliva, lahko narišemo navidezno tokovno cev – ovojnico tokovnega kanala. Čez mejo tokovne cevi ni pretoka, zato v tokovni cevi velja zakon ohranitve mase. Tokovna cev je krožnega prereza in ker za primer nestisljivega medija gostota ostane konstantna, mora premer tokovne cevi (zaradi znižane hitrosti vetra za turbino) narasti (slika 3.1).

Pri pretvorbi kinetične energije v tokovni cevi trenuten padec hitrosti na mestu rotorja ni niti zaželen niti fizikalno izvedljiv, saj bi bil povezan z visokimi pojemki in ekstremnimi obremenitvami. Zato se hitrost pritekajočega zraka pred turbino zmanjšuje postopoma, hkrati pa raste statični tlak, saj delo še ni bilo opravljeno. Po prehodu skozi rotor statični tlak pade pod raven atmosferskega tlaka. Območje podtlaka za turbino imenujemo območje tokovne brazde. Daleč za turbino tlak v brazdi ponovno naraste na vrednost atmosferskega tlaka, kar se odraža na dodatnem

znižanju hitrosti zračnega toka. Integralno se tako v tokovni cevi zaradi delovanja turbine zniža hitrost toka in s tem kinetična energija, statični tlak pa ostane nespremenjen.



Slika 3.1: Razširitev tokovne cevi vetrnih turbin.

3.2 Teorija navideznega diska

Uvodoma opisan koncept toka skozi tokovno cev (slika 3.1), v kateri je nameščena turbina, ne definira nadaljnje pretvorbe pridobljene kinetične energije. To lahko pretvorimo v koristno delo ali v obliki generiranih turbulentnih struktur disipiramo v toploto. Obravnavo aerodinamike vetrnih turbin lahko brez poznavanja konkretne oblike turbine izvedemo s pomočjo teorije navideznega diska, ki ga postavimo v ravnino na mesto postavitve rotorja turbine. Ta teorija poenostavi delovanje vetrne turbine tako, da jo obravnava kot navidezni disk, skozi katerega zrak teče enakomerno, brez upoštevanja oblike lopatic ali interakcije med zrakom in lopaticami. Kljub temu omenjena teorija ponuja osnovni vpogled v to, kako se na rotorju energija vetra pretvarja v mehansko energijo. Teorija navideznega diska bo predstavljena v nadaljevanju.

S slike 3.1 je razvidno, da je pred rotorjem oziroma navideznim diskom presek tokovne cevi manjši, za rotorjem pa je tokovna cev večjega preseka. Povečanje preseka tokovne cevi je posledica veljavnosti zakona ohranitve mase in zmanjšanja

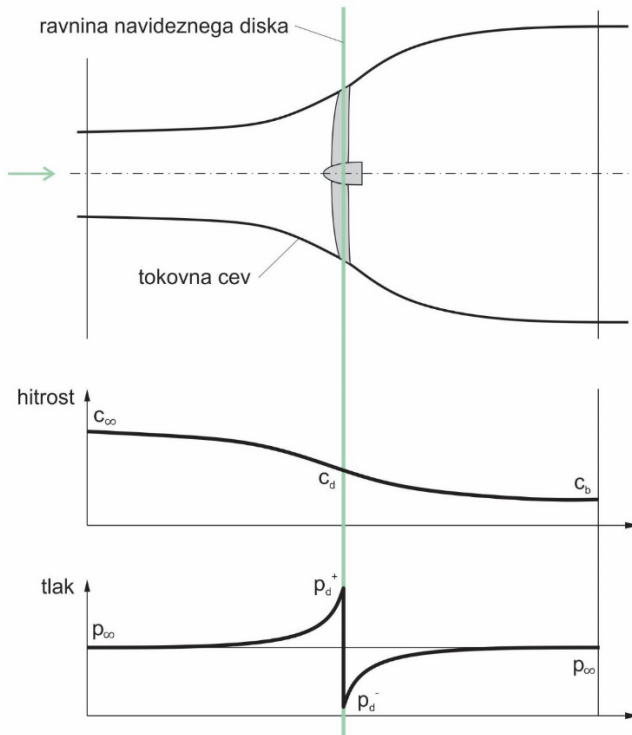
hitrosti zraka, ki je neposredno povezana z energijo, ki jo turbina izloči iz vetra. Masni pretok $\dot{m}$ zraka, ki potuje skozi tokovno cev, je produkt gostote zraka ρ , preseka tokovne cevi A in absolutne hitrosti toka c :

$$\dot{m} = \rho c_{\infty} A_{\infty} = \rho c_d A_d = \rho c_b A_b \quad (3.1)$$

Spremembi hitrosti in tlaka sta prikazani na diagramih na sliki 3.2. Indeks ∞ prikazuje pogoje daleč pred diskom, kjer je tok nemoten; indeks d popisuje razmere na disku; indeks b pa definira pogoje daleč za tokovno brazdo, ki jo povzroča disk.

Ugotovili smo, da disk, postavljen v tokovno cev, povzroči tokovno motnjo in spremembo absolutne hitrosti. Hitrost pretoka skozi disk c_d lahko zapišemo kot funkcijo hitrosti neoviranega toka c_{∞} , in sicer kot

$$c_d = c_{\infty}(1 - a) \quad (3.2)$$



Slika 3.2: prememba energije v ravnini navideznega diska.

Kjer $-a c_\infty$ predstavlja zmanjšanje hitrosti, ki ga povzroči disk. Koeficient a zato imenujemo koeficient inducirane aksialne hitrosti. Inducirana aksialna hitrost pri vetrni turbini dejansko predstavlja zmanjšanje absolutne hitrosti vetra, ki nastane zaradi pretvorbe kinetične energije vetra v mehansko energijo rotorja vetrne turbine.

3.2.1 Ohranitev gibalne količine po teoriji navideznega diska

Zraku, ki teče skozi navidezni disk, se spremeni hitrost za vrednost $c_\infty - c_b$. Pripadajoča sprememba gibalne količine G je potem:

$$\Delta G = (c_\infty - c_b) \rho c_d A_d \quad (3.3)$$

Sunek sile F , ki povzroči spremembo gibalne količine, je v celoti posledica spremembe tlaka na v ravnini navideznega diska ($p_d^+ - p_d^-$), saj je tlak zunaj tokovne cevi enak atmosferskemu tlaku. Tako je:

$$F = (p_d^+ - p_d^-) A_d = (c_\infty - c_b) \rho c_\infty A_d (1 - a) \quad (3.4)$$

kjer smo za hitrost c_d uporabili enačbo 3.2. Za izračun razlike tlakov ($p_d^+ - p_d^-$) na odsekih tokovne cevi tik pred in tik za navideznim diskom uporabimo Bernoullijevo enačbo.

Bernoullijeva enačba pri stacionarnih pogojih definira totalno energijo toka kot vsoto kinetične energije, statičnega tlaka in potencialne energije oziroma:

$$\frac{1}{2} \rho c^2 + p + \rho gh = konst. \quad (3.5)$$

V odseku pred diskom je tako:

$$\frac{1}{2} \rho_\infty c_\infty^2 + \rho_\infty g h_\infty = \frac{1}{2} \rho_d c_d^2 + p_d^+ + \rho_d g h_d \quad (3.6)$$

Predpostavimo nestisljiv ($\rho_\infty = \rho_d$) in horizontalen ($h_\infty = h_d$) tok. Potem je v odseku pred diskom:

$$\frac{1}{2}\rho c_\infty^2 + p_\infty = \frac{1}{2}\rho c_d^2 + p_d^+ \quad (3.7)$$

In podobno v brazdi:

$$\frac{1}{2}\rho c_b^2 + p_\infty = \frac{1}{2}\rho c_d^2 + p_d^- \quad (3.8)$$

Če odštejemo enačbi 3.7 in 3.8, dobimo:

$$(p_d^+ - p_d^-) = \frac{1}{2}\rho(c_\infty^2 - c_b^2) \quad (3.9)$$

V kombinaciji z enačbo 3.4 tako lahko zapišemo:

$$\frac{1}{2}\rho(c_\infty^2 - c_b^2)A_d = (c_\infty - c_b)\rho c_\infty A_d(1 - a) \quad (3.10)$$

in

$$c_b = c_\infty(1 - 2a) \quad (3.11)$$

Iz enačbe 3.11 je razvidno, da se celotna sprememba oziroma padec aksialne komponente hitrosti v tokovni cevi razdeli na 50-odstotni del pred navideznim diskom in enak del v brazdi za diskom oziroma za ravnino turbine. Ugotovitev iz predstavljene izpeljave je skladna s potekom hitrosti, prikazanim v diagramu na sliki 3.2.

3.2.2 Koefficient moči

Za izračun moči, odvedene na disku, potrebujemo spremembo oziroma sunek sile. Sila zaradi spremembe gibalne količine zraka na mestu postavitve diska v tokovno cev je skladno z enačbo 3.4 enaka:

$$F = (p_d^+ - p_d^-)A_d = 2\rho A_d c_\infty^2 a(1 - a) \quad (3.12)$$

Če sila F deluje v območju, kjer je v tokovno cev postavljen navidezni disk, potem je odvedena moč

$$P = F c_d = 2 \rho A_d c_\infty^3 a(1 - a)^2 \quad (3.13)$$

Koeficient moči, ki podaja, kolikšen del moči vetra je odveden, je v splošnem podan z izrazom:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A_d c_\infty^3} \quad (3.14)$$

Kjer imenoalec predstavlja razpoložljivo moč vetra (toka zračne mase) za primer brez motnje (diska) v tokovni cevi. Tako lahko s kombinacijo izrazov 3.13 in 3.14 zapišemo za koeficient moči enačbo:

$$C_p = 4 a(1 - a)^2 \quad (3.15)$$

Iz zgornjega izraza je razvidno, da je koeficient moči po teoriji navideznega diska odvisen samo od tretje potence koeficienta inducirane aksialne hitrosti oziroma od spremembe hitrosti vetra v tokovni cevi.

3.2.3 Betzova limita

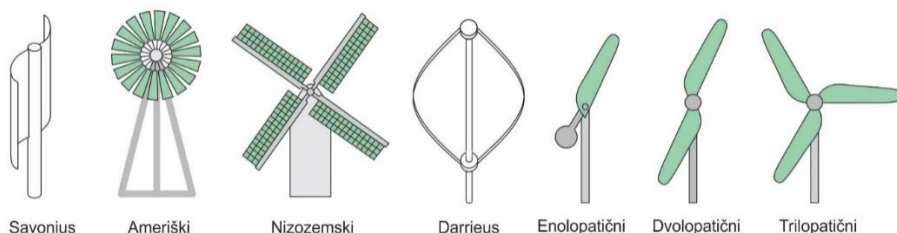
Za najbolj učinkovito izrabo kinetične energije vetra je treba določiti maksimalno vrednost koeficienta moči. Lokalni ekstrem koeficienta moči dobimo z odvajanjem enačbe 3.15:

$$\frac{dC_p}{da} = 4(1 - a)(1 - 3a) = 0 \quad (3.16)$$

Maksimum odvoda funkcije nastopi pri vrednosti $a = \frac{1}{3}$. Takrat je:

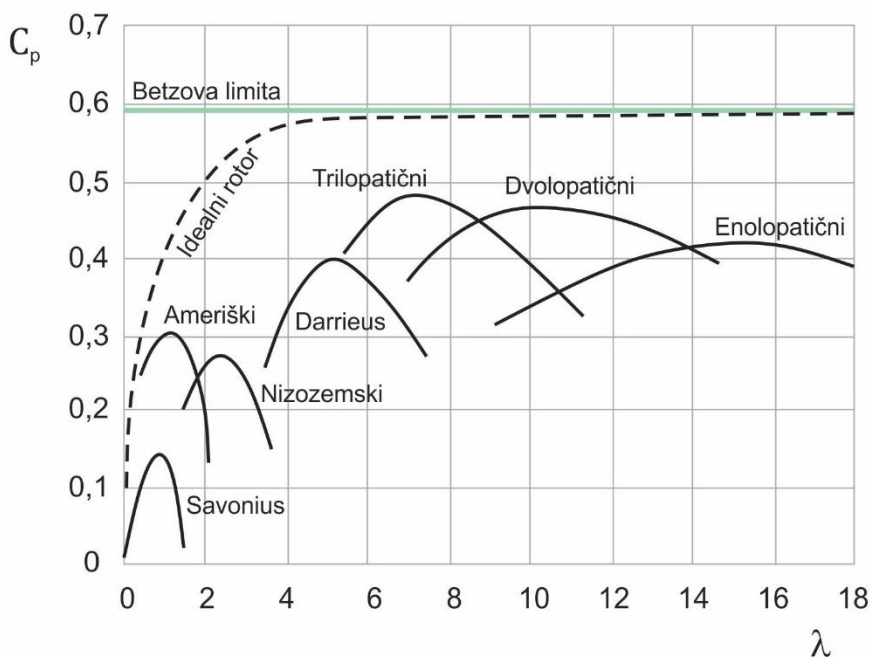
$$C_{p,maks} = \frac{16}{27} = 0,593 \quad (3.17)$$

Maksimalna vrednost koeficienta moči $C_{p,maks}$ je po nemškem aerodinamiku Albertu Betzu znana kot Betzova limita. Betzova limita predstavlja največji delež kinetične energije vetra, ki ga lahko teoretično zajame/pretvori vetrna turbina. Različne izvedbe vetrnih turbin, prikazane na sliki 3.3, se teoretični meji 59,3 % bolj ali manj približajo.



Slika 3.3: Rotorji različnih vetrnih turbin [14].

Dejanske vrednosti izkoristka oziroma koeficienta moči C_p različnih vetrnih turbin so zaradi trenja, aerodinamičnega upora, mehanskih omejitev in neidealnih tokovnih razmer nižje od Betzove limite. Odvisne so od razmerja obodne hitrosti na vrhu lopatice s hitrostjo vetra $\lambda = u / c_\infty$, kot je razvidno s slike 3.4.

Slika 3.4: Odvisnost koeficienta moči C_p od razmerja hitrosti λ [14].

S slike 3.4 je razvidno, da so dejanske vrednosti koeficienta moči oziroma izkoristka kinetične energije vetra za vetrne turbine med 40 in 50 %. V poglavjih, ki sledijo, bo razložena dinamika toka skozi rotor konvencionalnih vetrnih turbin s horizontalno

osjo ter pojasnjene razlike med dejanskimi obratovalnimi karakteristikami in teoretično Betzovo karakteristiko.

3.2.4 Koeficient potisne sile

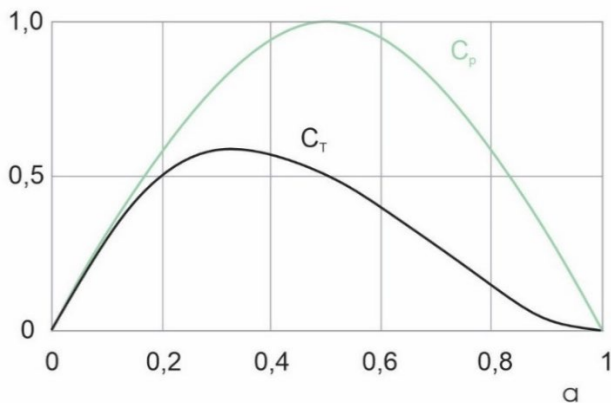
Poleg moči in učinkovitosti energijske izrabe je pri načrtovanju vetrnih turbin zelo pomembna tudi potisna sila na rotor, saj predstavlja ključen parameter za izbiro in dimenzioniranje nosilnih stebrov ter načina temeljenja. Koeficient potisne sile ali aerodinamični koeficient potiska C_T je definiran kot razmerje med dejansko potisno silo F na rotor in teoretično potisno silo na površino diska A_d , ki izhaja iz hitrosti c_∞ .

$$C_T = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho A_d c_\infty^2} \quad (3.18)$$

V kombinaciji enačb 3.12 in 3.18 lahko zapišemo koeficient potisne sile kot

$$C_T = 4 a (1 - a) \quad (3.19)$$

Iz enačbe 3.19 je razvidno, da je tudi koeficient potisne sile, podobno kot koeficient moči, odvisen od spremembe hitrosti v tokovni cevi. Koeficient C_T je pomemben pri analizi aerodinamičnih lastnosti turbin in je pogosto prikazan v diagramih obratovalnih karakteristik, ki bodo predstavljene v poglavju 3.8.



Slika 3.5: Potek koeficientov C_p in C_T v odvisnosti od a .

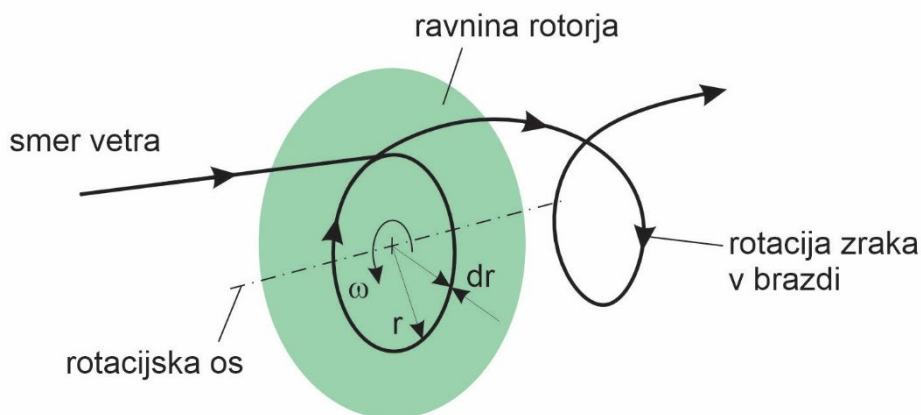
Za vrednosti $a \geq \frac{1}{2}$ hitrost v brazdi, definirana z enačbo $c_b = c_\infty(1 - 2a)$, postane enaka nič oziroma negativna. V teh primerih ne velja zapisan zakon ohranitve gibalne količine po teoriji navideznega diska in je potrebna empirična modifikacija $C_{T,emp}$, ki bo opisana v poglavju 3.6.2. Na sliki 3.5 je prikazan potek koeficienta moči C_p in koeficienta potisne sile C_T od koeficienta inducirane aksialne hitrosti a .

3.3 Teorija rotirajočega diska

Način pretvorbe vetru odvedene energije v koristno energijo je odvisen od posameznega modela turbine. Večina vetrnih turbin je izvedenih z rotorjem, na katerega je nameščeno končno število lopatic, ki se s kotno frekvenco ω vrtijo okoli osi, vzporedne s smerjo vetra. Rotorske lopatice pri vrtenju opišejo disk in ustvarijo tlačno razliko, ki ima za posledico spremembo aksialne hitrosti in pripadajoče komponente gibalne količine, o kateri smo govorili v prejšnjem poglavju. Sprememba aksialne komponente gibalne količine v tokovni cevi je povezana tako z energijo, ki jo z električnim generatorjem lahko pretvorimo v elektriko, kot s pojavom potisne sile in vrtilnega momenta na rotorju. Teorija rotirajočega diska predpostavi vetrno turbino kot enostaven rotirajoč disk, ki zmanjšuje hitrost vetra, ko ta prehaja skozi površino rotorja. Uporablja se za analizo in razumevanje delovanja vetrnih turbin oziroma za izračun učinkovitosti pretvorbe kinetične energije vetra v rotacijsko (mehansko) energijo rotorja ob upoštevanju izmenjave vrtilne količine.

3.3.1 Rotacija tokovne brazde

Vrtilni moment, ki poganja rotor, je skladno s 3. Newtonovim zakonom v ravnotežju z nasprotno usmerjenim vrtilnim momentom, ki ga na pritekajoči zrak ustvarjajo lopatice vrtečega se rotorja, saj je kotna frekvenca ω konstantna. Posledica tega reakcijskega in nasprotno usmerjenega vrtilnega momenta je rotacija zraka v tokovni brazdi za rotorjem. Smer rotacije zraka za rotorjem je obratna smeri vrtenja rotorja in predstavlja inducirano vrtilno količino. V brazdi ima tok zraka tako poleg znižane aksialne komponente hitrosti tudi (inducirano) komponento hitrosti v tangencialni oziroma obodni smeri (slika 3.6). Pojav obodne komponente hitrosti zraka v brazdi pomeni povečanje kinetične energije zraka, ki je mogoča samo ob prisotnosti spremembe statičnega tlaka.



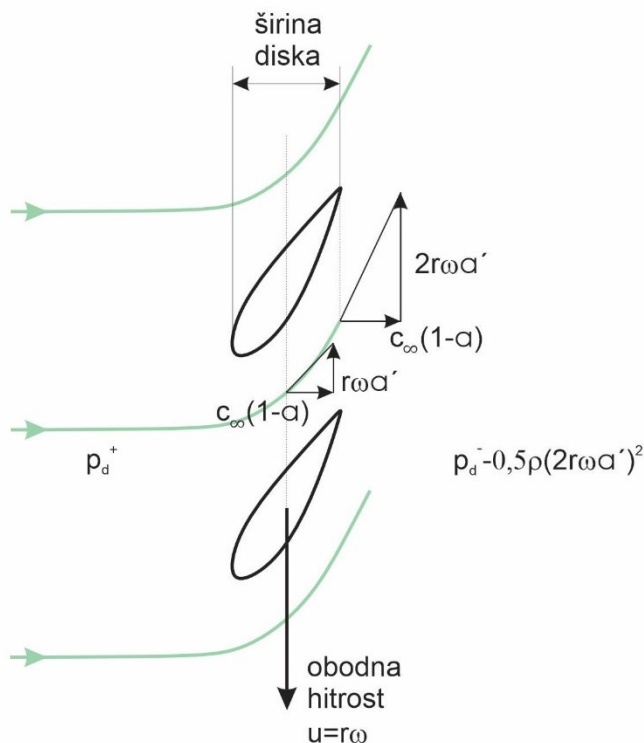
Slika 3.6: Tangencialna komponenta hitrosti v brazdi za rotorjem.

Tok, ki vstopa v tokovno cev in disk, pred diskom nima obodne komponente hitrosti. Na drugi strani, to je za diskom oziroma rotorjem, pa tok v brazdi ima konstantno komponento hitrosti v tangencialni smeri. Obodna hitrost se tako teoretično pojavi pri pretoku zraka skozi ozko ravnino rotorja in jo definiramo s koeficientom inducirane tangencialne hitrosti a' .

Koeficient a' opisuje stopnjo rotacije zraka v tokovni brazdi za rotorjem, ki ga povzročajo lopatice vetrne turbine s spremembo gibalne količine zraka. Vrednosti koeficienta inducirane tangencialne hitrosti lahko dosežejo vrednosti med 0 in 0,5; pri čemer vrednost 0 pomeni, da ni tangencialne komponente hitrosti v brazdi za rotorjem, medtem ko večje vrednosti pomenijo večjo tangencialno hitrost in s tem tudi večje energijske izgube. Prevelike vrednosti koeficienta a' namreč nižajo učinkovitost energijske pretvorbe zaradi močnega vrtnčenja in disipacije energije, medtem ko majhne vrednosti koeficienta a' pomenijo nizko vrtilno količino oziroma nizke tangencialne sile, ki poganjajo rotor.

Obodna oziroma tangencialna hitrost je sorazmerna razdalji od vrtilišča r in kotni frekvenci ω ter je neposredno na izstopu z rotirajočega diska enaka $u = 2 r \omega a'$. V praksi se nenadno povečanje oziroma pojav tangencialne hitrosti na rotorju končne širine ne more zgoditi, zato privzamemo zvezno naraščanje tangencialne hitrosti v kanalu med lopaticami rotorja, kot je prikazano na sliki 3.7. Skladno navedeni

predpostavki je na sredini kanala med lopaticami, to je na polovici širine rotirajočega diska, tangencialna hitrost enaka $u = r \omega a'$.



Slika 3.7: Inducirana tangencialna hitrost.

3.3.2 Ohranitev vrtilne količine po teoriji rotirajočega diska

Tangencialna hitrost se spreminja glede na oddaljenost od osi rotacije oziroma radialni položaj, kar dejansko velja tudi za aksialno inducirano hitrost. V nadaljevanju bomo z izpeljavo pokazali vpliv obodne hitrosti na razpoložljivo kinetično energijo. Da bi lahko upoštevali spremembo aksialne in tangencialne hitrosti na rotirajočem disku, bomo v nadaljevanju na tem obravnavali osamljen elementarni obroč polmera r z radialno dimenzijo dr (slika 3.6). Predpostavimo, da je rotirajoči disk sestavljen iz neskončnega števila elementarnih obročev polmera r elementarne dimenzije dr , od katerih vsak prispeva k navoru in aksialni sili.

Navor na elementarni obroč $r \, dr$ povzroča pojav tangencialne komponente hitrosti, medtem ko aksialna sila na obroč povzroča znižanje aksialne hitrosti v tokovni cevi. Elementarni navor dM na obroču je enak spremembi vrtilne količine zraka, ki teče skozi elementarni del površine obroča dA_d .

$$\text{Navor} = \text{masni pretok} \cdot \text{sprememba tangencialne hitrosti} \cdot \text{radij}$$

$$dM = d\dot{m} u r = (\rho c_\infty (1 - a) dA_d) (2 \omega r a') r \quad (3.20)$$

Če elementarni vrtilni moment dM pomnožimo s kotno frekvenco, dobimo elementarno moč na osi rotorja:

$$dP = dM \omega \quad (3.21)$$

Odvedeno delo zaradi spremembe aksialne komponente hitrosti in pripadajoča moč je skladno z enačbo 3.13 enaka:

$$dP = 2 \rho c_\infty^3 a (1 - a)^2 dA_d \quad (3.22)$$

S kombinacijo zgornjih izrazov dobimo:

$$2 \rho c_\infty^3 a (1 - a)^2 dA_d = 2 \rho c_\infty (1 - a) \omega^2 r^2 a' dA_d \quad (3.23)$$

in

$$c_\infty^2 a (1 - a) = \omega^2 r^2 a' \quad (3.24)$$

ωr je obodna hitrost u vrtečega se elementarnega obroča, $\lambda_r = \frac{\omega r}{c_\infty}$ pa je lokalno razmerje hitrosti na polmeru r . Na robu diska, kjer je $r = R$, definiramo maksimalno hitrostno razmerje

$$\lambda = \frac{\omega R}{c_\infty} \quad (3.25)$$

Tako iz 3.24 sledi:

$$a(1 - a) = \lambda_r^2 a' \quad (3.26)$$

Površina elementarnega obroča je $dA_d = 2\pi r dr$, zato je ob upoštevanju 3.26 moč iz enačbe 3.22 enaka:

$$dP = 2\rho c_\infty^3 a(1-a)^2 dA_d = \left(\frac{1}{2}\rho c_\infty^3 2\pi r dr\right)(4a'(1-a)\lambda_r^2) \quad (3.27)$$

Izraz v prvem oklepaju predstavlja gostoto toka moči (angl. Power flux) skozi elementarni obroč, izraz v drugem oklepaju pa izkoristek elementa lopatice:

$$\eta_r = 4a'(1-a)\lambda_r^2 \quad (3.28)$$

Zapišimo zdaj s pomočjo izraza 3.27 še enačbo za diferencialni del koeficienta moči dC_p na elementu dr :

$$\frac{d}{dr} C_p = \frac{4\pi\rho c_\infty^3 (1-a)a'\lambda_r^2 r}{\frac{1}{2}\rho c_\infty^3 \pi R^2} = \frac{8(1-a)a'\lambda_r^2 r}{R^2} \quad (3.29)$$

Za razmerje r/R uporabimo oznako $\mu = r/R$. Tako velja tudi $\mu = \lambda_r/\lambda$. Dobimo:

$$\frac{d}{d\mu} C_p = 8(1-a)a'\lambda^2 \mu^3 \quad (3.30)$$

kjer smo uporabili zvezo $d\mu = dr/R$. Ob upoštevanju radialne spremembe koeficientov a in a' lahko z integracijo enačbe 3.30 izračunamo koeficient moči diska pri danem razmerju hitrosti λ .

Lahko bi sklepali, da energija za rotacijo toka v brazdi izhaja iz energije vetra in kot taka ni na voljo za koristno izrabo, vendar bomo v nadaljevanju z Bernoullijevo enačbo pokazali, da ni tako. Zapišimo torej Bernoullijevo enačbo za stanje na vstopu in izstopu iz rotirajočega diska.

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}\rho c_\infty^2 (1-a)^2 + \frac{1}{2}\rho\omega^2 r^2 + \frac{1}{2}\rho w^2 + p_D^+ \\ = \frac{1}{2}\rho c_\infty^2 (1-a)^2 + \frac{1}{2}\rho\omega^2 (1+2a')^2 r^2 + \frac{1}{2}\rho w^2 + p_D^- \end{aligned} \quad (3.31)$$

kjer je za relativno hitrost uporabljena oznaka w . Iz enačbe 3.31 lahko za tlačno razliko na disku zapišemo

$$\Delta p_D = p_D^+ - p_D^- = 2\rho\omega^2(1 + a') a' r^2 = 2\rho\omega^2(a' + a'^2) r^2 \quad (3.32)$$

Tlačno razliko na disku lahko torej razstavimo na dva prispevka. Prvi prispevek:

$$\Delta p_{D1} = 2\rho\omega^2 a' r^2 \quad (3.33)$$

je enak tlačni razliki po teoriji navideznega diska (enačba 3.12). V tem delu ni prispevka rotacije. Drugi prispevek k tlačni razliki na disku pa je:

$$\Delta p_{D2} = 2\rho\omega^2 a'^2 r^2 \quad (3.34)$$

in je povzročen z radialnim tlačnim gradientom v rotirajoči tokovni brazdi, ki je v ravnotežju s centrifugalno silo. **Tako zaradi rotacije ni izgube razpoložljive kinetične energije.** Tangencialna kinetična energija tekočinskega elementa v tokovni brazdi je torej v ravnotežju s tlačnim padcem Δp_{D2} . Medtem ko tlačni padec Δp_{D1} nastopa neposredno za diskom, je tlačni padec Δp_{D2} prisoten v celotni tokovni brazdi. Tam ni dodatnega znižanja aksialne komponente hitrosti, zato Δp_{D2} ne vpliva na aksialno potisno silo na rotor.

3.3.3 Maksimalna moč na rotirajočem disku

Vrednosti koeficientov a in a' , pri katerih bo dosežen maksimalni izkoristek, lahko določimo z odvajanjem enačbe (3.28), v kateri uporabimo zvezo (3.26):

$$\frac{d\eta_r}{da} = \frac{d}{da} (4a(1 - a)^2) = 0 \quad (3.35)$$

Z odvodom produkta v (3.35) dobimo vrednosti koeficientov a in a' , pri katerih nastopi maksimalna vrednost izkoristka, in sicer:

$$a = \frac{1}{3} \text{ in } a' = \frac{a(1 - a)}{\mu^2 \lambda^2} \quad (3.36)$$

Iz zgornje enačbe sledi, da je koeficient inducirane aksialne hitrosti a za maksimalno moč enak $a = \frac{1}{3}$, kot v primeru nevrteče tokovne brazde. Hkrati je koeficient a odvisen od oddaljenosti od osi vrtenja r oziroma $\mu = r/R$.

Izračunajmo zdaj koeficient moči iz enačbe (3.30) za optimalne vrednosti koeficientov iz izraza (3.36). Najvišji koeficient moči je tako:

$$C_P = \int_0^1 8(1-a) a^2 \mu^3 d\mu \quad (3.37)$$

oziroma

$$C_P = \int_0^1 8(1-a) \left[\frac{a(1-a)}{\lambda^2 \mu^2} \right] \lambda^2 \mu^3 d\mu = 4a(1-a)^2 = \frac{16}{27} \quad (3.38)$$

Izpeljana vrednost koeficienta moči je enaka vrednosti Betzove limite, ki smo jo spoznali v poglavju 3.2 na primeru navideznega diska oziroma nevrteče tokovne brazde.

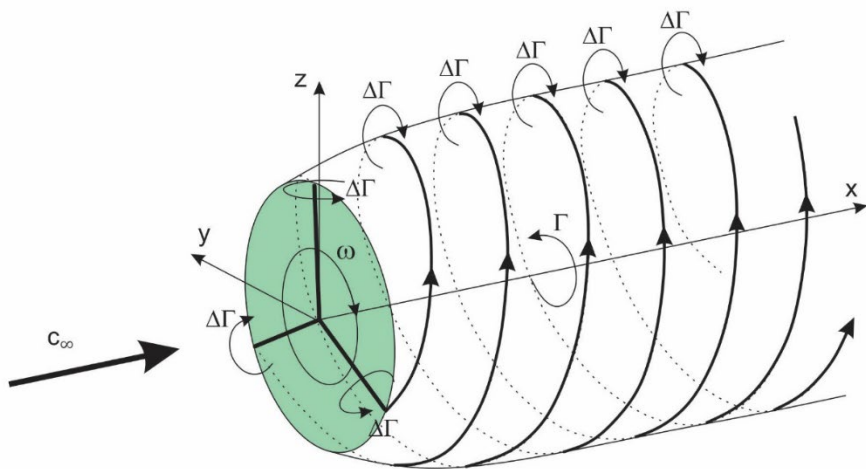
3.4 Teorija vrtnične cevi

V poglavju 3.2 smo s teorijo navideznega diska tlačni padec na disku povezali z izmenjavo energije na mestu rotorja vetrne turbine. V poglavju 3.3 smo skladno s teorijo rotirajočega diska zapisali, da ima tokovno polje v brazdi komponento hitrosti v tangencialni smeri. V tem poglavju bo iz vidika mehanike tekočin predstavljen podrobnejši analitični pristop k obravnavi toka okoli idealizirane vetrne turbine, ki upošteva nastanek vrtincev za turbino.

3.4.1 Uvod

Sila, ki je potrebna za spremembo gibalne količine natekajočega toka in s tem za rotacijsko komponento gibanja, izhaja iz interakcije tekočinskega toka z rotorskimi lopaticami in je skladno s Kutta-Joukowski teoremom sorazmerna cirkulaciji hitrosti okoli profila lopatice $\Delta\Gamma$ [14]. Cirkulacijo hitrosti okoli profila lopatic imenujemo pritrjena cirkulacija hitrosti (angl. Bound or attached circulation).

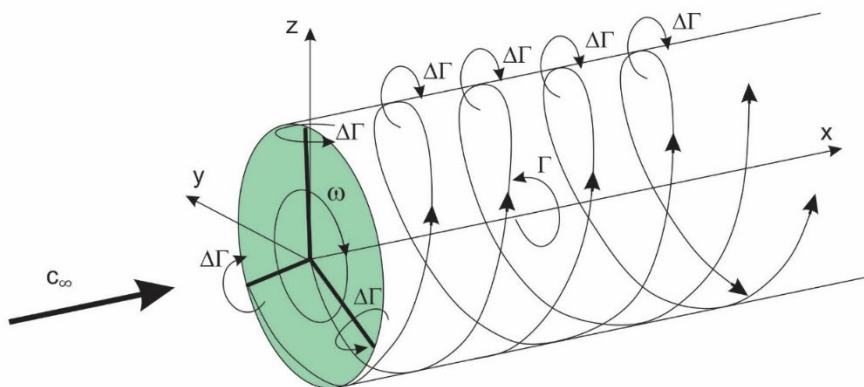
Z vrha vsake lopatice se v tokovno brazdo z lokalno hitrostjo toka odcepi vijačni vrtinec moči $\Delta\Gamma$. Če predpostavimo neskončno število lopatic, bodo odcepljeni vijačni vrtinci tvorili koncentrično vrtnično ploskev oziroma vrtnično cev jakosti Γ , kot je razvidno s slike 3.8.



Slika 3.8: Razširjanje vijačnega vrtinca z vrha rotirajočih lopatic s pritrjeno cirkulacijo.

Podobno kot na vrhu lopatic se v korenu lopatic, za katere predpostavimo, da segajo do osi rotacije, odcepijo linijski vrtinci jakosti $\Delta\Gamma$, ki prispevajo k skupnemu korenskemu vrtincu Γ . Vrtinčenje toka je tako omejeno z okroglo vrtnično ploskvo, ki jo tvorijo vrteče se lopatice s pritrjeno cirkulacijo, z vrtnično cevjo in linijskim (korenskim) vrtincem v osi rotacije.

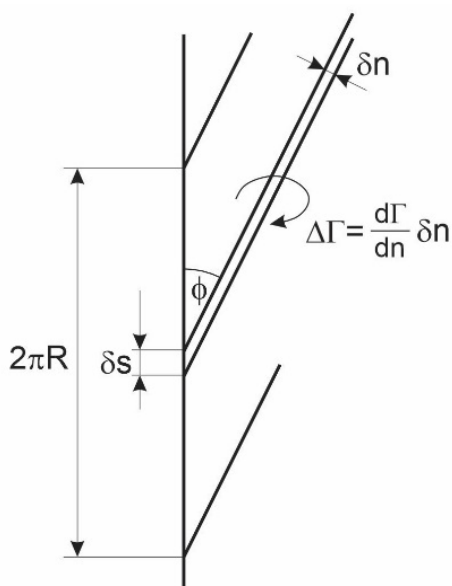
Premer vrtnične cevi se povečuje skladno zmanjševanju hitrosti v tokovni brazdi. Ker se razširitve vrtnične cevi s spremembo gibalne količine ne da opisati, bomo v nadaljevanju obravnavali poenostavljeno cilindrično vrtnično cev brez razširitve, kot je razvidno s slike 3.9.



Slika 3.9: Poenostavljena cilindrična vrtnična cev.

3.4.2 Teorija vrtnične cevi

Teorija vrtnične cevi temelji na privzeti predpostavki cilindrične vrtnične cevi s konstantnim presekom. To predpostavko lahko preverimo s pogledom na uniformnost aksialne hitrosti.



Slika 3.10: Vrtničnost na elementarni površini vrtnične cevi.

Vrtinčna cev ima vrtinčnost, ki se v brazdo širi pod kotom vijačnice ϕ , ki je enak kotu lopatice β . Jakost vrtinčnosti je enaka $g = \frac{d\Gamma}{dn}$, kjer je n smer pravokotna na $\Delta\Gamma$ na površini vrtinčne cevi (slika 3.10).

Komponenta $g_\theta = g \cdot \cos \beta$ je vzporedna z rotorjem, zaradi česar je aksialna inducirana hitrost na rotirajočem disku uniformna in jo skladno z Biot-Savartovem zakonom lahko določimo z enačbo:

$$c_d = -\frac{g_\theta}{2} = -ac_\infty \quad (3.39)$$

Aksialna hitrost v brazdi je znotraj vrtinčne cevi uniformna in definirana kot:

$$c_b = -g_\theta = -2ac_\infty \quad (3.40)$$

Razmerje obeh induciranih aksialnih hitrosti ustreza razmerju, izpeljanem v prejšnjih poglavjih, in tako potrjuje predpostavko o cilindrični vrtinčni cevi.

3.4.3 Zveza med pritrjeno cirkulacijo in inducirano hitrostjo

V nadaljevanju bomo obravnavo cirkulacije povezali s hitrostnimi razmerami v tokovni cevi. Za ta namen najprej poiščimo zvezo med pritrjeno cirkulacijo in aksialno hitrostjo v brazdi.

Skupna cirkulacija rotirajočih lopatic Γ se uniformno širi iz smeri rotorja v smeri tokovne brazde z uniformno hitrostjo, ki je definirana z enim obratom rotorja in kotom lopatice. S slike 3.10, na kateri je prikazan vzdolžni prerez vrtinčne cevi, sledi jakost vrtinčnosti

$$g = \frac{\Gamma}{2\pi R \sin \beta} \quad (3.41)$$

Komponenta, vzporedna z ravnino rotorja, je potem:

$$g_\theta = \frac{\Gamma}{2\pi R} \frac{\cos \beta}{\sin \beta} = \frac{\Gamma}{2\pi R} \frac{\omega R}{c_\infty(1-a)} \quad (3.42)$$

iz česar sledi:

$$2ac_{\infty} = \frac{\Gamma}{2\pi R} \frac{\omega R}{c_{\infty}(1-a)} \quad (3.43)$$

Tako je skupna cirkulacija izražena s koeficientom inducirane aksialne hitrosti enaka:

$$\Gamma = \frac{4\pi c_{\infty}^2 a(1-a)}{\omega} \quad (3.44)$$

3.4.4 Vrtinec v korenu lopatice

Tako kot z vrha se tudi iz korena rotirajočih lopatic širi vrtinec. Če predpostavimo, da lopatice potekajo vse do osi vrtenja, kar praktično ni izvedljivo, potem korenski vrtinec poteka v osni smeri, v ravni liniji iz središča vrtenja diska v smeri tokovne brazde. Smer vrtenja vseh na posameznih lopaticah generiranih korenskih vrtincev je enaka, skupaj pa tvorijo cirkulacijo moči Γ . Korenski vrtinec povzroči pojav tangencialne komponente hitrosti v brazdi in na disku rotorja. Na površini diska rotorja je inducirana tangencialna hitrost po Biot-Savartovem zakonu

$$\omega r a' = \frac{\Gamma}{4\pi r} \quad (3.45)$$

$$a' = \frac{\Gamma}{4\pi \omega r^2} \quad (3.46)$$

Enako lahko izpeljemo iz zakona ohranitve gibalne količine, ki pravi, da je sprememba vrtilne količine zraka pri prehodu skozi elementarni kolobar enaka navoru

$$dM = \rho c_{\infty}(1-a)2\pi r^2 a' r^2 \omega dr \quad (3.47)$$

Sila vzgona F_L na enoto razpona je

$$F_L = \rho (w \times \Gamma) \quad (3.48)$$

kjer je $(w \times \Gamma)$ vektorski produkt

$$dM = \rho (w \times \Gamma) r \sin \beta dr = \rho \Gamma r c_{\infty} (1 - a) dr \quad (3.49)$$

Z enačenjem izrazov za navor dobimo

$$a' = \frac{\Gamma}{4\pi\omega r^2} \quad (3.50)$$

in za tangencialno inducirano hitrost na vrhu lopatice, kjer velja $r = R$

$$a'_t = \frac{a(1 - a)}{\lambda^2} \quad (3.51)$$

Izpeljana enačba je enaka enačbi 3.36, izpeljani v poglavju 3.3.3, saj na vrhu lopatice pri $r = R$ velja $\mu = 1$. Pri tem smo uporabili oznako a'_t .

3.4.5 Navor in moč

Navor na elementarni obroč polmera r in dimenzije dr :

$$\frac{d}{dr} M dr = \rho w \Gamma r \sin \beta dr = \frac{\rho 4 \pi r c_{\infty}^3 a(1 - a)^2}{\omega} dr \quad (3.52)$$

kjer je w relativna hitrost.

$$\frac{d}{dr} M = \frac{\frac{1}{2} \rho c_{\infty}^3 2 \pi r 4 a(1 - a)^2}{\omega} \quad (3.53)$$

Diferencial moči je:

$$\frac{d}{dr} P = \omega \frac{dM}{dr} = \rho c_{\infty}^3 \pi r 4 a(1 - a)^2 \quad (3.54)$$

Skupna moč pa z integralom 3.51 enaka

$$P = \frac{1}{2} \rho c_{\infty}^3 \pi R^2 4 a(1 - a)^2 \quad (3.55)$$

Koeficient moči je:

$$C_p = 4a(1 - a)^2 = 4a'(1 - a)\lambda^2 \quad (3.56)$$

Rezultat v enačbi (3.56) je enak kot v primeru enostavne gibalne enačbe, zapisane v poglavju o teoriji navideznega diska (3.15). Tudi na tem mestu ugotovimo, da rotacija toka v brazdi ne vpliva na učinkovitost pretvorbe oziroma izrabe energije.

3.4.6 Hitrostna polja

Zdaj lahko podrobneje analiziramo hitrostne razmere v tokovni cevi. Poleg aksialne komponente hitrosti lahko s pomočjo vrtnčnosti podrobneje predstavimo tudi potek tangencialne in radialne komponente hitrosti. S pomočjo cirkulacije bomo izpeljali potisno silo.

3.4.6.1 Aksialno polje hitrosti

Inducirano hitrost v aksialni smeri je mogoče določiti tako pred navideznim diskom, na njem kot tudi v tokovni brazdi za njim.

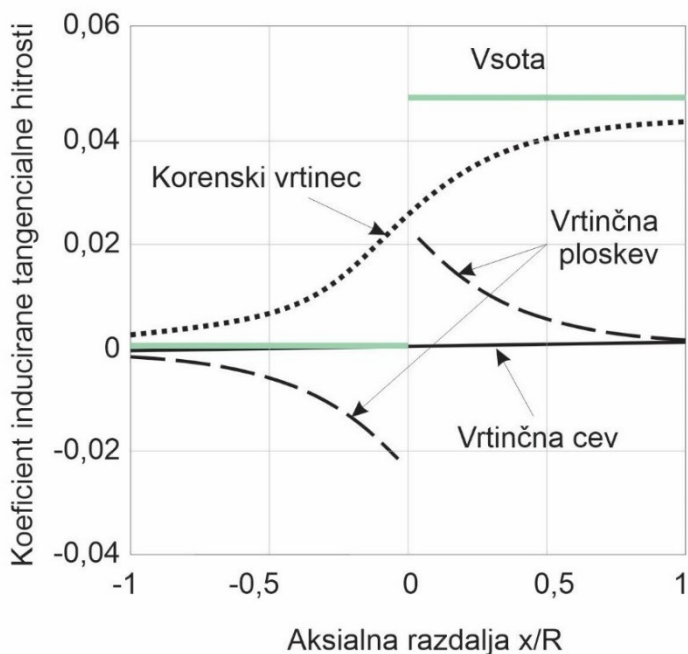
Aksialna hitrost znotraj tokovne brazde je precej nižja kot zunaj in je radialno uniformna tako na disku kot v brazdi, kot to napoveduje gibalna enačba. V brazdi pride do majhnega pospeška toka. Inducirana hitrost na cevi tokovne brazde je $a/4$ ob disku in $a/2$ v brazdi.

3.4.6.2 Tangencialno polje hitrosti

Tangencialna inducirana hitrost je določena z vrtnčno ploskvijo, ki jo tvorijo vrteče se lopatice, vrtnčno cevjo in linijskim korenskim vrtncem. Na radialni razdalji, enaki polovici polmera diska $r = R/2$, je na sliki 3.11 prikazan potek spremembe vseh treh prispevkov v odvisnosti od brezdimenzijskega aksialnega položaja x/R .

S slike je razvidno, da vrtnčna ploskev povzroči pred diskom in za njim rotacijo v različnih smereh. Pred rotorjem se tok vrti v enaki smeri kot rotor. Pri vrednosti $x/R = 0$ korenski vrtnec povzroči spremembo smeri rotacije. V brazdi se vrednosti korenskega vrtnca in vrtnca na vrtnčni ploskvi seštejeta in povzročita uniformno vsoto vrtnčnosti v tokovni brazdi. Prispevek vrtnčne cevi je minimalen.

V ravnini diska niti vrtnična ploskev niti vrtnična cev ne inducirata tangencialne hitrosti. Rotacijo v tokovni brazdi inducira le korenski vrtinec, pri čemer se v brazdi inducira polovica celotne inducirane tangencialne hitrosti.



Slika 3.11: Aksialni potek tangencialne hitrosti glede na vir za $r = R/2$, $a = 1/3$ in $l = 6$.

Rotacija je omejena na tokovno brazdo, torej območje znotraj cevi. Zunaj brazde ni nikjer tangencialne komponente hitrosti. Ker na zunanjem robu tokovne brazde tangencialna hitrost ni enaka nič, pride na cilindrični površini do naglega padca.

3.4.6.3 Radialno polje hitrosti

Teoretično izračunana radialna hitrost je največja na mestu, kjer je v tokovno cev postavljen navidezni rotorski disk. Maksimalno vrednost doseže hitrost na robu diska, kjer pride do spremembe smeri radialne hitrosti. Medtem ko bi v primeru potencialnega toka tukaj nastopila singularnost, se v primeru viskoznega toka na tem mestu hitrost poviša do vrednosti, omejene z nično vrednostjo statičnega tlaka, pri čemer se zelo odebeli mejna plast, tok se odcepi od lopatice in kinetična energija

disipira v toploto. Dejansko na mestu postavitve realnega rotorja ne pride do opisanih ekstremnih vrednosti hitrosti, saj so vetrne turbine izvedene s končnim številom lopatic, medtem ko je rotirajoči disk predstavljal primer rotorja z neskončnim številom lopatic. V primeru turbine z visoko vrednostjo razmerja λ na vrhu lopatice se odcepljanje toka pojavi pogosto.

3.4.6.4 Aksialna potisna sila

Elementarno aksialno potisno silo lahko skladno s teoremom Kutta-Joukowski zapišemo kot

$$\frac{dF}{dr} = \rho \Gamma r \omega = \rho \Gamma u \quad (3.57)$$

kjer je u obodna hitrost. Zdaj lahko z uporabo enačbe 3.41 zapišemo

$$\frac{dF}{dr} = 4 \pi \rho c_\infty^2 r a (1 - a) \quad (3.58)$$

in z integracijo za koeficient potisne sile C_T

$$C_T = 4 a (1 - a) \quad (3.59)$$

Enačba je skladna z enačbo 3.19. Če bi v izrazu za obodno hitrost u upoštevali še inducirano tangencialno hitrost a' , bi bila izračunana vrednost potisne sile prevelika, zakon ohranitve gibalne količine pa ne bi bil izpolnjen. Zapisano potrjuje ugotovitev iz poglavja 3.3.2., da rotacija toka v brazdi ne vpliva na aksialno potisno silo.

Kljub predpostavki cilindrične cevi konstantnega preseka, ki ne upošteva razširitve tokovne cevi na mestu postavitve diska (rotorja), so po teoriji vrtnične cevi izpeljane enačbe skladne z zakonom o ohranitvi gibalne količine navideznega diska in pojasnjujejo izmenjavo energije na disku oziroma turbinskem rotorju. Prav neskončne vrednosti radialne hitrosti na zunanjem robu diska pa potrjujejo, da teorija navideznega diska fizikalno ni eksaktna.

3.5 Dinamika elementarne lopatice

Sila dinamičnega vzgona in sila upora na lopatične elemente v kaskadi povzročita spremembo aksialne komponente gibalne količine in vrtilne količine vsega zraka, ki teče skozi elementarni obroč polmera r dimenzije dr (slika 3.12). Obe sili sta povezani tudi s padcem statičnega tlaka in pojavom obodne komponente hitrosti v tokovni brazdi. Glede na to, da tok pred rotorjem nima obodne (tangencialne) komponente hitrosti, je sprememba tlaka na mestu rotorja trenutna. Ker tok v brazdi rotira tudi na večji oddaljenosti od rotorja, je padec tlaka zaradi inducirane rotacijske komponente hitrosti prisoten povsod in nima vpliva na spremembo aksialne komponente gibalne količine zraka, kar smo ugotovili tudi v prejšnjih poglavjih.

3.5.1 Teorija elementarne lopatice

Rezultanto sil, delujočih na lopatiko vetrne turbine, lahko izračunamo s karakteristiko poenostavljenega dvodimenzionalnega profila iz napadnega kota, določenega z rezultanto hitrosti v ravnini elementarne lopatice. Pri tem zanemarimo komponento hitrosti v radialni smeri in tridimenzionalne učinke. Napadni kot je v tem primeru določen s hitrostrnimi komponentami vetra, odvisnimi od trenutnega radialnega položaja in od vrtilne frekvence rotorja. Ob poznavanju vrednosti koeficientov vzgona C_L in upora C_D za znane vrednosti a in a' izračunamo tudi sili vzgona in upora.

Obravnavajmo primer turbine z N lopaticami polmera R , tetive c , z nastavnim kotom φ in natočnim kotom δ , pri čemer se lahko dolžina tetive in koti lopatice spreminjajo od korena do pesta. Hitrost vetra naj bo c_∞ , kotna frekvenca rotorja naj bo enaka ω . Vsota obodne hitrosti ωr in inducirane tangencialne hitrosti tokovne brazde $\omega r a'$ definira obodno komponento relativne hitrosti na lopatici $(1 + a')\omega r$, kot kaže slika 3.12. Rezultirajoča relativna hitrost zraka ob lopatici w je tako sestavljena iz aksialne in obodne komponente, kot izhaja iz trikotnika hitrosti, prikazanega na sliki 3.13:

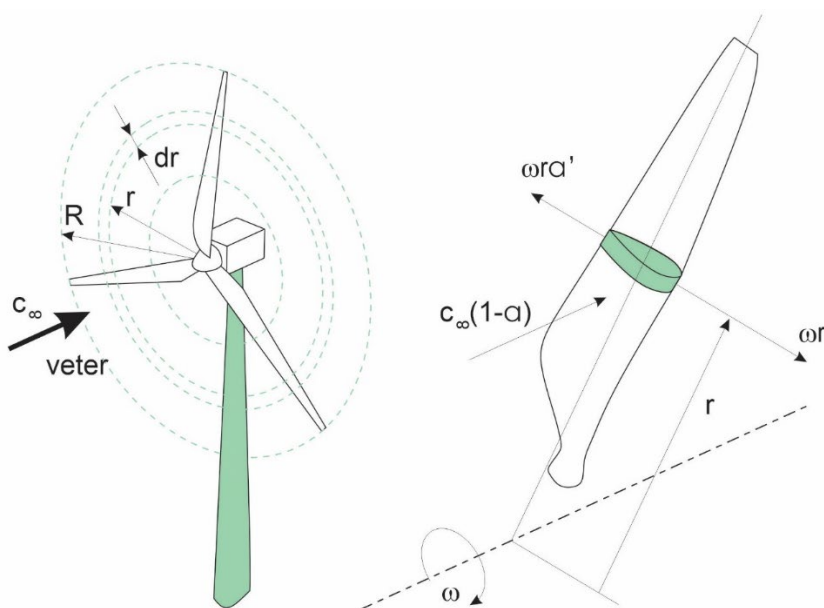
$$w = \sqrt{c_\infty^2(1 - a)^2 + \Omega^2 r^2(1 + a')^2} \quad (3.60)$$

Kot relativne hitrosti na ravnino rotorja oziroma kot lopatice je β , njegovi kotni funkciji pa sta definirani kot:

$$\begin{aligned}\sin \beta &= \frac{c_\infty(1-a)}{w} \\ \cos \beta &= \frac{\omega r(1+a')}{w}\end{aligned}\quad (3.61)$$

Natočni kot δ je skladno s sliko 3.12 tako:

$$\delta = \beta - \varphi \quad (3.62)$$



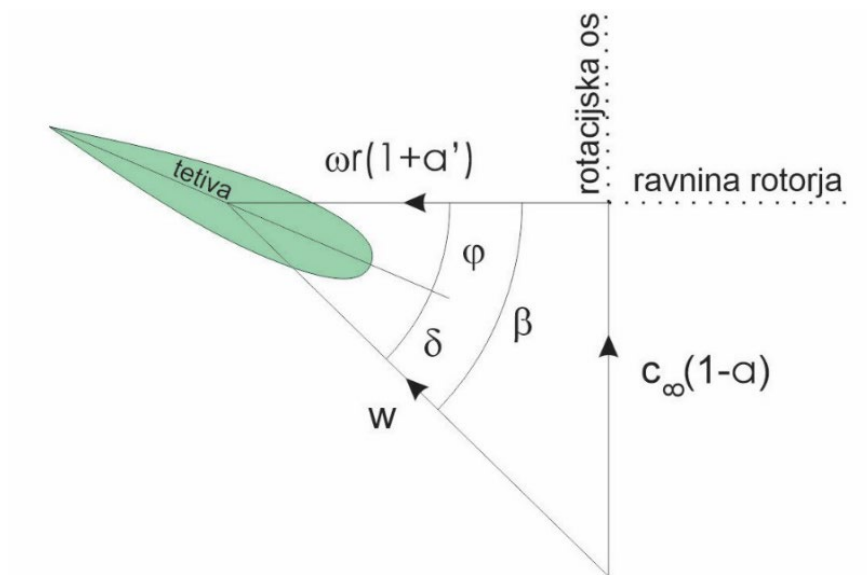
Slika 3.12: Elementarni obroč dr in hitrosti na lopatici.

Na elementarno lopatico dimenzije dr deluje v smeri pravokotno na relativno hitrost w elementarna sila vzgona dF_L , kot je razvidno s slike 3.14.

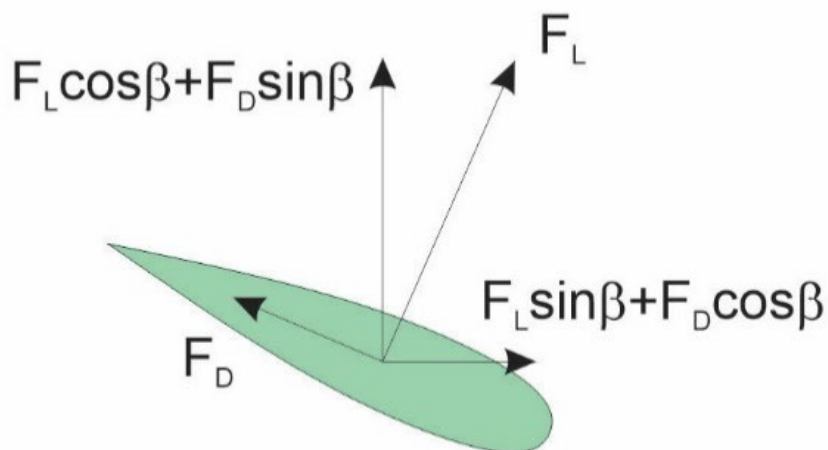
$$dF_L = \frac{1}{2} \rho w^2 C_L c \, dr \quad (3.63)$$

in vzporedno hitrosti w še elementarna sila upora δF_D :

$$dF_D = \frac{1}{2} \rho w^2 C_D c \, dr \quad (3.64)$$



Slika 3.13: Trikotnik hitrosti v tokovni brazdi.



Slika 3.14: Sile na lopatico.

Aksialna potisna sila na elementarni obroč je

$$\begin{aligned} dF &= dF_L \cos\beta + dF_D \sin\beta \\ &= \frac{1}{2} \rho w^2 N c (C_L \cos\beta + C_D \sin\beta) dr \end{aligned} \quad (3.65)$$

kjer je N število lopatic in c dolžina tetive.

Navor na elementarni obroč je potem

$$\begin{aligned} dM &= (dF_L \sin\beta + dF_D \cos\beta) r \\ &= \frac{1}{2} \rho w^2 N c (C_L \sin\beta + C_D \cos\beta) r dr \end{aligned} \quad (3.66)$$

3.5.2 Gibalna enačba elementarne lopatice

Glavna predpostavka gibalne teorije lopatice je, da spremembo gibalne količine zraka v aksialni smeri povzroči sila elementarne lopatice pri gibanju skozi elementarni obroč polmera r dimenzije dr . To pomeni, da ni radialnega vpliva sosednjih obročev in velja le, ko je koeficient inducirane aksialne hitrosti neodvisen od polmera. V nadaljevanju bomo s privzeto predpostavko izpeljali koeficienta induciranih hitrosti a in a' v odvisnosti od geometrijskih parametrov lopatice. Ker so bile do zdaj zapisane enačbe formulirane s koeficientoma a in a' , bomo tako lahko povezali geometrijo lopatice z že izvedeno teoretično obravnavo dinamike toka vetrnih turbin.

Z enačenjem aksialne komponente rezultante sil na N lopatičnih elementih (3.65) z enačbo 3.12 dobimo

$$\begin{aligned} dF &= \frac{1}{2} \rho w^2 N c (C_L \cos\beta + C_D \sin\beta) dr \\ &= 2 \pi r dr \rho c_\infty (1 - a) 2a c_\infty \end{aligned} \quad (3.67)$$

Če zdaj podobno enačimo navor na elementarni obroč v 3.66 s spremembo vrtilne količine zraka pri pretoku skozi obroč, dobimo

$$\begin{aligned}
 dM &= \frac{1}{2} \rho w^2 N c (C_L \sin \beta - C_D \cos \beta) r dr \\
 &= 2 \pi r dr \rho c_{\infty} (1 - a) 2 a' r^2 \omega
 \end{aligned}
 \tag{3.68}$$

Da bi lahko izvedli primerjavo s teorijo vrtnične cevi, odstranimo zdaj člen, ki popisuje upor iz zgornjih enačb, in izračunajmo kot β

$$\tan \beta = \frac{a' r \omega}{a c_{\infty}} = \frac{a' r}{a R} \lambda = \frac{a'}{a} \lambda_r \tag{3.69}$$

Iz trikotnikov hitrosti oziroma enačbe sledi za kot tudi izraz

$$\tan \beta = \frac{c_{\infty} (1 - a)}{r \omega (1 + a')} = \frac{(1 - a)}{\lambda_r (1 + a')} \tag{3.70}$$

Z enačenjem izrazov 3.69 in 3.70 dobimo

$$a(1 - a) = \lambda_r^2 a' (1 + a') \tag{3.71}$$

Na vrhu lopatice, kjer je $r = R$ oziroma $\mu = 1$, lahko zapišemo

$$a(1 - a) = \lambda^2 a'_t (1 + a'_t) \tag{3.72}$$

oziroma

$$\frac{a(1 - a)}{\lambda^2} = a'_t (1 + a'_t) \tag{3.73}$$

Enačba 3.73 se od enačbe 3.51 razlikuje v členu $(1 + a'_t)$. Ugotovitev potrjuje zapisano v zaključku poglavja 3.4.6.4. Upoštevanje dodatnega člena v enačbi za obodno hitrost v brazdi povzroči preveliko potisno silo.

Če v enačbi za potisno silo 3.67 upoštevamo silo upora, dobimo

$$\frac{w^2}{c_{\infty}^2} N \frac{c}{R} (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) = 8 \pi a (1 - a) \mu \tag{3.74}$$

Enačba za navor pa se z upoštevanjem $\mu = r/R$ preoblikuje v

$$\frac{w^2}{c_\infty^2} N \frac{c}{R} (C_L \sin \beta - C_D \cos \beta) = 8\pi\lambda\mu^2 a' (1 - a) \quad (3.75)$$

Zgornje enačbe lahko dodatno poenostavimo z vpeljavo novih spremenljivk

$$C_L \cos \beta + C_D \sin \beta = C_x \quad (3.76)$$

$$C_L \sin \beta - C_D \cos \beta = C_y \quad (3.77)$$

Koeficienta induciranih hitrosti a in a' lahko iz geometrijskih parametrov lopatice izračunamo s pomočjo enačb 3.74 in 3.75 samo z iterativnim postopkom. Za izračun novih iteracijskih vrednosti obeh koeficientov med postopkom sta primerni spodnji izpeljanki enačb 3.66 in 3.70:

$$\frac{a}{1 - a} = \frac{\sigma_r}{4 \sin^2 \beta} C_x \quad (3.78)$$

$$\frac{a'}{1 + a'} = \frac{\sigma_r C_y}{4 \sin \beta \cos \beta} \quad (3.79)$$

V zgornjih enačbah smo za razmerje dolžine tetiv vseh lopatic na polmeru r z obsegom kolobarja istega polmera uporabili oznako σ_r koeficient zaprtosti (angl. Blade solidity).

$$\sigma_r = \frac{N c}{2\pi r} = \frac{N c}{2\pi \mu R} \quad (3.80)$$

Razmerje σ_r je ključno za določitev obratovalne karakteristike rotorja.

Wilson in Lissaman (1974) sta trdila, da v enačbah za izračun induciranih hitrosti (3.78 in 3.79) koeficient upora C_D ne bi smel nastopati, saj je zmanjšanje hitrosti zaradi upora prisotno samo v ozkem območju za izstopnim robom lopatice. Padec hitrosti zaradi sile upora je tako omejen na brazdo in ne vpliva na spremembo hitrosti pred diskom oziroma rotorjem. Ugotovila sta, da je v primeru pritujenega toka okoli profila lopatice upor izključna posledica površinskega trenja in zato ne vpliva na

padec tlaka na rotorju. Po drugi strani pa je v primeru odcepljenega toka upor v največji meri posledica spremembe tlaka. Young in Squire sta pokazala, da ima neviskozna porazdelitev tlaka vpliv tako na upor kot tudi na vzgon. Razmerje med uporom zaradi tlačnega polja in celotnim uporom pri napadnem kotu 0° je približno enako razmerju med debelino profila in dolžino tetive profila in se povečuje z večanjem napadnega kota.

Na koncu je pomembno poudariti, da je izpeljava strogo uporabna le, kadar imajo lopatice enakomerno cirkulacijo oziroma ko je koeficient inducirane hitrosti a uniformen. Pri neenakomerni cirkulaciji pride do radialne interakcije in izmenjave gibalne količine med tokovi skozi sosednje elementarne obroč. V tem primeru ni mogoče trditi, da je aksialna sila, ki deluje na tok skozi obravnavan elementarni obroč, samo posledica padca tlaka čez disk.

V praksi je napaka v primeru neupoštevanja zapisane omejitve majhna za razmerja hitrosti λ , večja od 3.

3.5.3 Moč in navor na rotorju

Za izračun navora in moči rotorja moramo poznati koeficiente induciranih hitrosti, ki jih pridobimo z rešitvijo enačb 3.78 in 3.79. V začetni iteraciji zaradi nelinearne odvisnosti obeh koeficientov od napadnega kota predpostavimo, da sta oba koeficienta enaka 0 ter izračunamo vrednosti β , C_D in C_L . Postopek ponavljamo, dokler rezultat ne konvergira.

Iz enačbe 3.75 izpeljemo enačbo za navor na lopatico elementarne dimenzije dr

$$dM = 4\pi\rho c_\infty(\omega r)a'(1-a)r^2 dr \quad (3.81)$$

Če upor izločimo iz postopka izračuna koeficientov induciranih hitrosti, moramo njegov učinek upoštevati pri izračunu navora iz elementarnih sil (enačba 3.75) z izrazom

$$dM = 4\pi\rho c_\infty(\omega r)a'(1-a)r^2 dr - \frac{1}{2}\rho w^2 N c C_D \cos \beta r dr \quad (3.82)$$

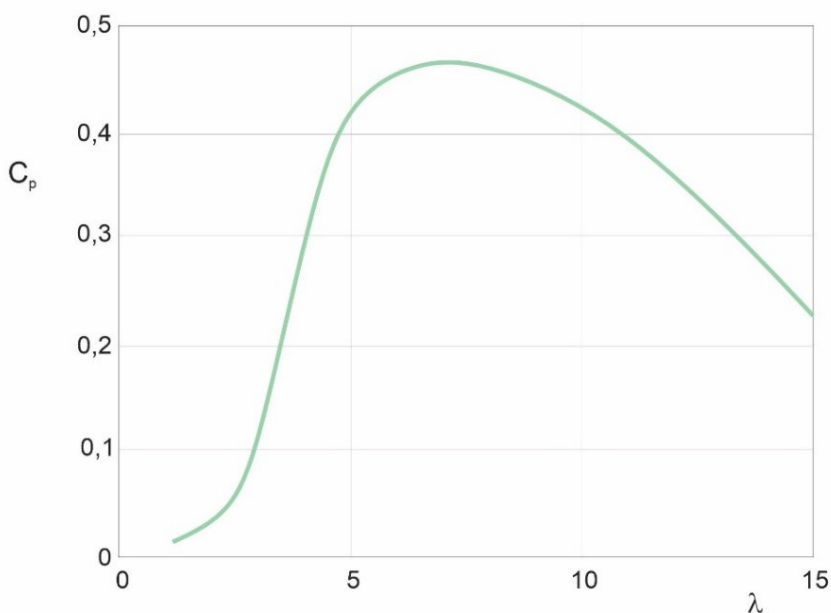
Celoten rotor ustvari tako navor M

$$M = \frac{1}{2} \rho c_{\infty}^2 \pi R^3 \lambda \left[\int_0^R \mu^2 \left[8a'(1-a)\mu - \frac{w}{c_{\infty}} \frac{N}{\pi} \frac{c}{R} C_D (1+a') \right] d\mu \right] \quad (3.83)$$

Moč, ki jo rotor ustvari, je $P = M\omega$, koeficient moči pa je enak:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho c_{\infty}^3 \pi R^2} \quad (3.84)$$

Reševanje enačb 3.74 in 3.75 da za posamezno turbino vrsto vrednosti koeficientov moči in navora, ki so odvisni od razmerja hitrosti na vrhu lopatice. Diagram na sliki 3.15 prikazuje konvencionalno karakteristiko moderne, hitro vrteče se trilopatične vetrne turbine.



Slika 3.15: Obratovalna karakteristika moderne trilopatične vetrne turbine.

Največji koeficient moči C_p nastopi pri razmerju hitrosti λ , pri katerem je koeficient a (odvisen od polmera) približno $1/3$, kot je bilo določen z Betzovo limito.

Pri manjših vrednostih λ je koeficient inducirane aksialne hitrosti a nižji od $1/3$, kar ob povečanih napadnih kotih vodi do odlepljanja toka in pojava potujočega vrtinca ter s tem povezanega padca karakteristike C_p . V večini primerov se potujoči vrtnec na vetrnih turbinah pojavi prav v korenu lopatice, saj kot lopatice v pestu iz konstrukcijskih razlogov ne more biti dovolj velik.

Pri velikih vrednostih razmerja hitrosti λ je vrednost koeficienta inducirane aksialne hitrosti a velika, napadni kot pa majhen, zato naraste sila upora.

Fizikalno ozadje in vpliv izgub v korenu/vrhu lopatice ter sile upora na koeficient moči bodo podrobneje obravnavani v nadaljevanju (poglavje 3.7).

Generalno so nizke vrednosti C_p v območju nizkih in visokih λ posledica neprimerne koeficienta a in prevelikega upora. V idealnem primeru bi turbine zato morale obratovati pri tistih optimalnih razmerjih hitrosti λ_{opt} , kjer nastopajo najvišje vrednosti koeficienta moči C_p .

3.6 Realne tokovne razmere

Naslednje poglavje upošteva tokovne razmere, kot se pojavijo na dejanskih vetrnih turbinah, zato bomo v nadaljevanju vpeljali nekatere modifikacije gibalne teorije.

3.6.1 Prosti tok in mešanje v tokovni brazdi

Pri zelo obremenjenih turbinah je vrednost koeficienta a visoka. Po zakonu ohranitve gibalne količine se v tokovni brazdi pri tem pojavi povratni tok. Dejansko do tega ne pride, saj se s prehodom v turbulentno brazdo primeša zunanji zrak, ki svojo kinetično energijo prenese na počasi gibajoč tok, ki je šel skozi rotor.

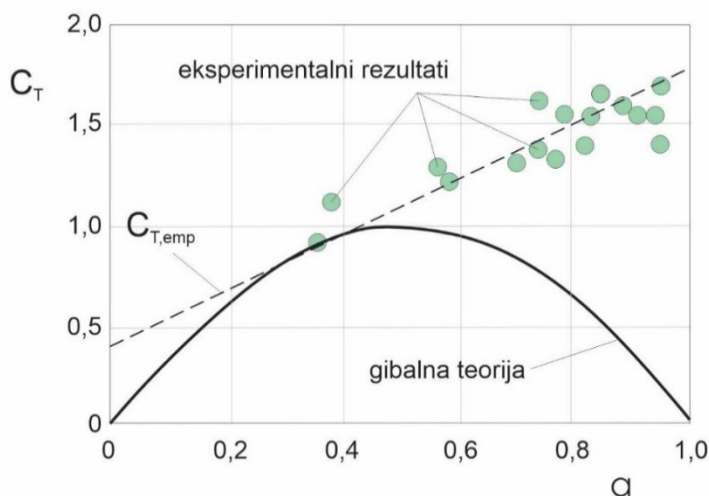
Rotor, delujoč v območju naraščajočega razmerja hitrosti λ , predstavlja za tok vedno manj prepustno (permeabilno) območje oziroma disk. V mejnem primeru, ko je λ dovolj visok, je koeficient inducirane aksialne hitrosti $a = 1$, rotirajoči disk postane navidezna neprepustna trdna plošča. Tok, ki obteka navidezno trdno ploščo zaradi viskoznosti, ustvari mejno plast. Zrak ob plošči teče radialno, kinetična energija pade. Ko tok doseže rob diska, pride do naglega povišanja hitrosti in s tem povezanega strmega padca statičnega tlaka. Ker na tem mestu statični tlak ni dovolj

visok, da bi kompenziral porast kinetične energije, pride do odlepljanja toka od diska in spremembe radialne smeri gibanja v vzdolžno smer. V območju za rotorjem nastane območje počasnega, skoraj mirujočega toka. Pred rotorjem se v središču diska tok zaustavi, kinetična energija se pretvori v statični tlak. Drugod pred rotorjem se izven mejne plasti tok giblje radialno s hitrostjo, ki se povečuje s približevanjem roba diska. V povprečju je tlak pred rotorjem višji kot tlak za njim, zato se pojavi tudi sila upora zaradi razlike tlakov.

Opisan pojav povzroči veliko razliko med tlakom v brazdi in atmosferskim tlakom zunaj tokovne brazde. Ker se morata v veliki oddaljenosti od rotorja tlaka izenačiti, se za to potrebna energija lahko pridobi samo z mešanjem toka v brazdi. Nestabilna strižna plast med tokovno brazdo in zunanjim tokom, ki se razvije iz mejne plasti na sprednji strani rotorja, se pretrga, sproščena turbulentna energija pa zagotovi povečanje tlaka v brazdi.

3.6.2 Sprememba potisne sile zaradi odlepljanja toka

Nizek statični tlak za rotorjem, ki je posledica odlepljanja toka na robu diska, in visok statični tlak na zastojni točki pred rotorjem povzročata na rotor veliko večjo potisno silo, kot jo predvideva teorija gibalne enačbe.



Slika 3.16: Primerjava teoretičnih in eksperimentalnih vrednosti koeficienta potisne sile.

Glauert (1926) je primerjal rezultate eksperimenta z rezultati, pridobljenimi s teorijo gibalne količine $C_T = 4a(1 - a)$. Primerjava je podana v grafu na sliki 3.16.

Pričakovano bi bil pri vrednosti $a = 1$ koeficient upora rotorja enak kakor pri polnem krožnem disku. Ker pa se rotor (za razliko od polnega diska) vrti, z rotacijo povzroči nastanek debelejšje in rotirajoče mejne plasti pred rotorjem. To povzroči nižji tlak v brazdi za rotorjem. Iz zgornjih ugotovitev sledi, da pri visokih vrednostih koeficienta inducirane aksialne hitrosti večine tlačne razlike na rotorju ne povzroči cirkulacija na lopaticah rotorja, saj je aksialna hitrost toka, ki dejansko steče čez lopatice rotorja, nizka.

Predpostavimo lahko, da se koeficient potisne sile C_T spreminja linearno s koeficientom inducirane hitrosti a . Če želimo zapisati empirični izraz za $C_{T,emp}$, naj bo vrednost koeficienta potisne sile pri vrednosti $a = 1$ označena s C_{T1} . Empirična enačba je potem:

$$C_{T,emp} = C_{T1} - 4(\sqrt{C_{T1}} - 1)(1 - a) \quad (3.85)$$

pri čemer velja $1,6 \leq C_{T1} \leq 2$.

3.7 Geometrija lopatic

3.7.1 Uvod

Namen vetrnih turbin je čim bolj učinkovita pretvorba energije vetra v mehansko energijo. Zato mora biti vsaka komponenta vetrne turbine ustrezno optimirana. Na optimalno obliko lopatic vplivata način delovanja turbine in porazdelitev vetra na mestu postavitve. Čeprav je pri praktičnih izvedbah prisotnih veliko inženirskih kompromisov in poenostavitev, je vseeno pomembno poznati teoretično najprimernejše geometrije.

Optimiranje oblike lopatic pomeni doseganje ustrezne rešitve enačb (3.78) in (3.79) iz teorije elementarnih lopatic.

3.7.2 Oblika lopatice za delovanje pri spremenljivih hitrostih vrtenja

Vetrne turbine lahko obratujejo pri konstantni in spremenljivi vrtilni hitrosti. Turbine, ki delujejo pri spremenljivih hitrostih vrtenja, lahko kontinuirano vzdržujejo preračunsko razmerje hitrosti λ_{opt} , ki je potrebno za maksimalni koeficient moči, ne glede na hitrost vetra. Temu ustrezna mora biti tudi geometrija lopatic. Pogoje, ki jih mora izpolnjevati geometrija, bomo izpeljali v nadaljevanju. Pri izbranem razmerju hitrosti λ dosežemo največji navor, če je

$$\frac{d}{da'} 8\pi\lambda\mu^2 a'(1-a) = 0 \quad (3.86)$$

Iz zgornje enačbe sledi

$$\frac{da}{da'} a = \frac{1-a}{a'} \quad (3.87)$$

Iz enačb (3.74) in (3.77) dobimo povezavo med koeficientoma induciranih hitrosti a in a' . Če obe enačbi delimo, dobimo

$$\frac{\frac{C_L}{C_D} \tan\beta - 1}{\frac{C_L}{C_D} + \tan\beta} = \frac{\lambda\mu a'(1-a)}{a(1-a) + (a'\lambda\mu)^2} \quad (3.88)$$

In za tangens kota β

$$\tan\beta = \frac{1-a}{\lambda\mu(1+a')} \quad (3.89)$$

S kombinacijo zgornjih enačb dobimo

$$\begin{aligned} \left[\frac{C_L}{C_D} (1-a) - \lambda\mu(1+a') \right] [a(1-a) + (a'\lambda\mu)^2] \\ = \left[\lambda\mu(1+a') \frac{C_L}{C_D} + (1-a) \right] \lambda\mu a'(1-a) \end{aligned} \quad (3.90)$$

Če v zgornji enačbi izpustimo upor, lahko skrajšano zapišemo

$$a(1 - a) - \lambda^2 \mu^2 a' = 0 \quad (3.91)$$

Če enačbo 3.91 zdaj odvajamo po a' , dobimo vrednost koeficienta inducirane tangencialne hitrosti za optimalno delovanje

$$(1 - 2a) \frac{da}{da'} - \lambda^2 \mu^2 = 0 \quad (3.92)$$

Če vstavimo (3.87) v (3.92), dobimo vrednost za optimalno delovanje

$$(1 - 2a)(1 - a) - \lambda^2 \mu^2 a' = 0 \quad (3.93)$$

Enačbi (3.91) in (3.93) nam definirata vrednosti koeficientov induciranih hitrosti za optimalno delovanje, ki se popolnoma ujemata s teoretičnimi izpeljavami iz poglavja 3.2.

$$\begin{aligned} a &= \frac{1}{3} \\ a' &= \frac{a(1 - a)}{\lambda^2 \mu^2} \end{aligned} \quad (3.94)$$

Ugotovitev izhaja iz poenostavitev, kot so:

- neupoštevanje izgub zaradi sile upora,
- veliko število lopatic,
- uniformna aksialna hitrost v področju diska.

Za dosego optimalnih razmer je potrebna ustrezna oblika lopatic, ki je določena z enačbama (3.74) oziroma (3.77). Ob neupoštevanju upora lahko izračunamo navor v optimalni točki

$$dM = 4\pi\rho c_\infty(\omega r)a'(1 - a)r^2 dr = 4\pi\rho \frac{u_\infty^3}{\omega} a(1 - a)^2 r dr \quad (3.95)$$

Komponenta sile vzgona na enoto razpona lopatice v tangencialni smeri je zato

$$F_L \sin \beta = 4\pi\rho \frac{u_\infty^3}{\omega} a(1 - a)^2 \quad (3.96)$$

Ker je po Kutta-Joukowski izreku sila vzgona na enoto razpona lopatice

$$F_L = \rho w \Gamma \quad (3.97)$$

kjer je Γ vsota cirkulacij hitrosti po posamezni lopatici in w relativna hitrost pravokotna na Γ in na F_L , velja

$$\rho w \Gamma \sin \beta = \rho \Gamma c_\infty (1 - a) = 4\pi \rho \frac{c_\infty^3}{\omega} a(1 - a)^2 \quad (3.98)$$

in

$$\Gamma = 4\pi \frac{c_\infty^2}{\omega} a(1 - a) \quad (3.99)$$

Iz zgornje enačbe izhaja, da je uniformna vrednost cirkulacije hitrosti Γ vzdolž lopatice pogoj za doseganje maksimalnega koeficienta moči.

Za določitev pripadajoče geometrije lopatice oziroma poteka dolžine tetive in naklonskega kota β vzdolž razpona lopatice se moramo vrniti na enačbo (3.77):

$$\frac{w^2}{c_\infty^2} N \frac{c}{R} C_L \sin \beta = 8\pi \lambda \mu^2 a' (1 - a) \quad (3.100)$$

Z zamenjavo izraza za $\sin \beta$ dobimo

$$\frac{w}{c_\infty} N \frac{c}{R} C_L (1 - a) = 8\pi \lambda \mu^2 a' (1 - a) \quad (3.101)$$

od koder izhaja

$$\frac{N}{2\pi} \frac{c}{R} = \frac{4\lambda \mu^2 a'}{\frac{w}{c_\infty} C_L} \quad (3.102)$$

Edina neznanka na desni strani enačbe je vrednost koeficienta vzgona C_L , zato jo bomo premaknili na levo stran, kjer bomo uporabili razmerje σ_r in hitrostno razmerje λ . Tako je:

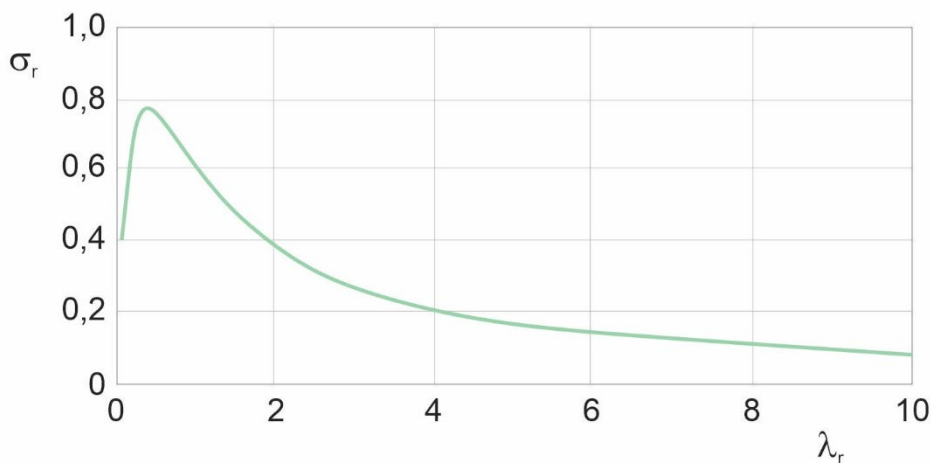
$$\sigma_r \lambda C_L = \frac{N}{2\pi} \frac{c}{R} \lambda C_L = \frac{4\lambda^2 \mu^2 a'}{\sqrt{(1-a)^2 + (\lambda\mu(1+a'))^2}} \quad (3.103)$$

Če v enačbo vstavimo pogoje za optimalni navor (3.94), dobimo

$$\sigma_r \lambda C_L = \frac{\frac{8}{9}}{\sqrt{\left(1 - \frac{1}{3}\right)^2 + \lambda^2 \mu^2 \left[1 + \frac{2}{9(\lambda^2 \mu^2)}\right]^2}} \quad (3.104)$$

Parameter $\lambda\mu$ predstavlja lokalno razmerje hitrosti, ki je za $\mu = 1$ oziroma $r = R$ enako hitrostnemu razmerju na vrhu lopatice.

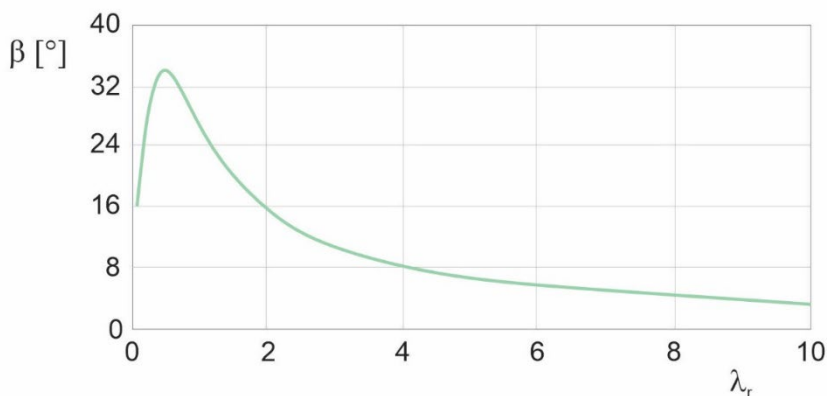
Če je za izbrano obliko lopatice vrednost C_L konstantna, potem slika 3.17 prikazuje potek geometrijskega parametra σ_r lopatice v odvisnosti od razmerja hitrosti λ . Turbine, namenjene obratovanju z visokim razmerjem hitrosti λ , v splošnem zahtevajo dolge in ozke lopatice, medtem ko tiste z nizkim razmerjem hitrosti λ zahtevajo kratke in široke lopatice.



Slika 3.17: Spreminjanje parametra geometrije lopatice z lokalnim razmerjem hitrosti.

Lokalni natočni kot β na lopatico se lahko vzdolž lopatice spreminja, kot je definirano v enačbi (3.105) in na sliki 3.18

$$\tan \beta = \frac{1 - a}{\lambda \mu (1 + a')} \quad (3.105)$$



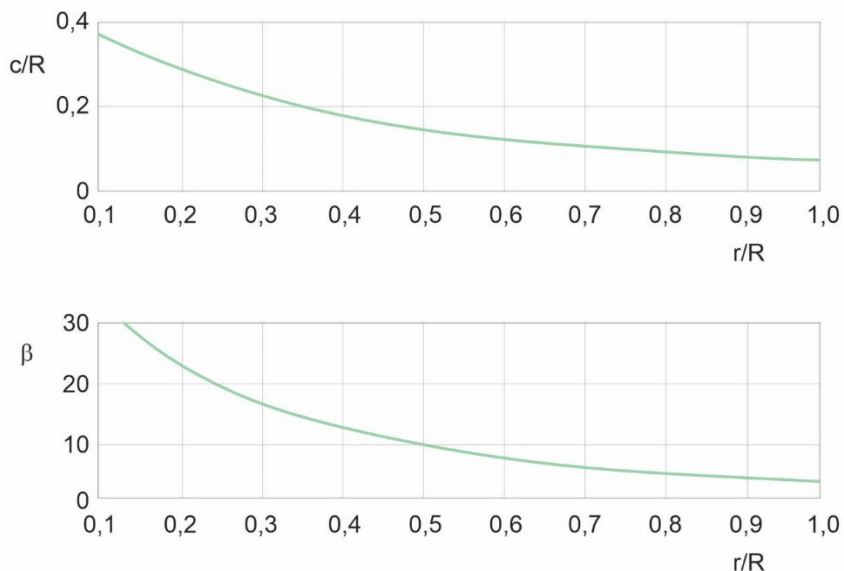
Slika 3.18: Spreminjanje kota β v odvisnosti od lokalnega razmerja hitrosti.

Za obratovanje v optimalni točki velja

$$\tan \beta = \frac{1 - \frac{1}{3}}{\lambda \mu \left(1 + \frac{2}{9\lambda^2\mu^2}\right)} \quad (3.106)$$

V bližini korena lopatice je kot β velik, kar lahko povzroči odcepljanje in zastoj toka (angl. Stall). Če je za doseganje minimalnega upora koeficient vzgona konstanten, mora biti tudi natočni kot δ uniformen. Tako se mora z razponom ustrezno spreminjati tudi nastavni kot lopatice $\varphi = \beta - \alpha$.

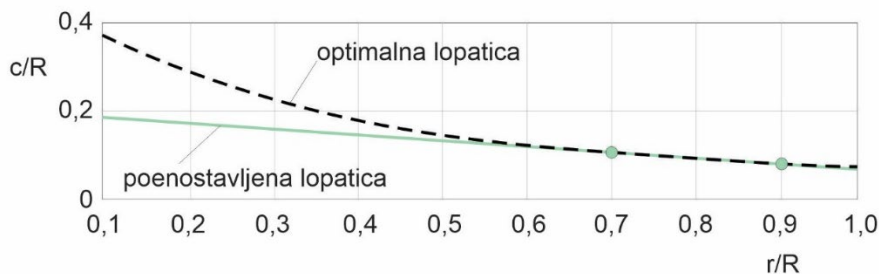
Obravnavajmo primer lopatičnega profila NACA 4412, ki je zaradi ploske spodnje (tlačne) strani profila in s tem povezane enostavnosti izdelave popularen pri ročno izdelanih vetrnih turbinah. Pri Reynoldsovem številu 5×10^5 je maksimalno razmerje sil vzgon/upor pri koeficientu vzgona približno $C_L = 0,7$ in natočnem kotu približno $\delta = 3^\circ$. Če predvidevamo, da sta C_L in δ konstantna vzdolž lopatice in da lopatice trilopatičnega rotorja delujejo pri razmerju hitrosti $\lambda = 6$, potem sta oblika lopatice c/R in potek kota β prikazana v diagramih na sliki 3.19.



Slika 3.19: Optimalen potek razmerja c/R in kota β lopatice za izvedbo turbine s tremi lopaticami pri $\lambda = 6$.

3.7.2.1 Poenostavljena oblika lopatice

Oblika lopatice s slike 3.19 je z energetskega stališča učinkovita, vendar prezahtevna za izdelavo. Tako je smiselno uvesti poenostavljeno geometrijo z uniformnim oziroma linearnim potekom razmerja c/R vzdolž razpona $0 \leq r \leq R$, kot je prikazano na sliki 3.20.

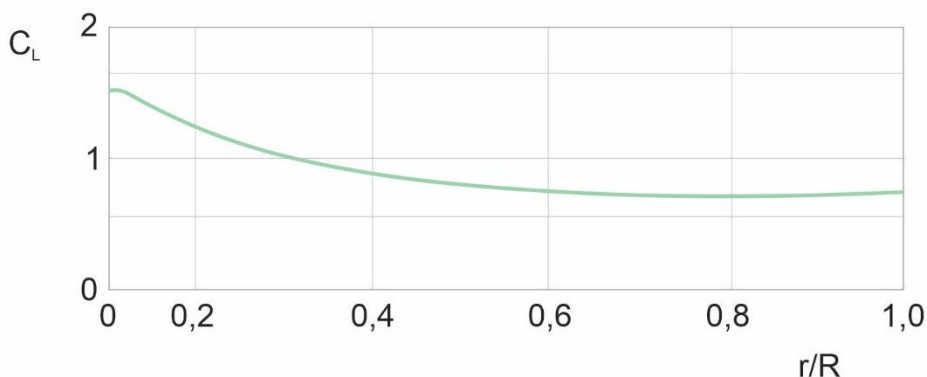


Slika 3.20: Poenostavljena lopatica z linearnim potekom razmerja c/R .

Točki na 70 % in 90 % razmerja r/R sta izhodiščni točki za izvedeno linearizacijo poteka razmerja c/R lopatice.

Z opisano spremembo poenostavimo obliko lopatice in prihranimo material v bližini korena, kjer so obodne hitrosti nizke, hkrati pa ohranimo zadovoljiv izkoristek.

V bližini korena lopatice se koeficient vzgona, katerega potek vzdolž razpona lopatice je prikazan na sliki 3.21, lahko približa meji, določeni s točko odcepitve in recirkulacije toka. Izgube energije so v tem območju majhne zaradi nizkega negativnega navora povratnih recirkulacijskih tokov.



Slika 3.21: Potek koeficienta vzgona vzdolž poenostavljene lopatice z linearnim potekom c/R .

3.7.2.2 Vplivi sile upora na obliko lopatic

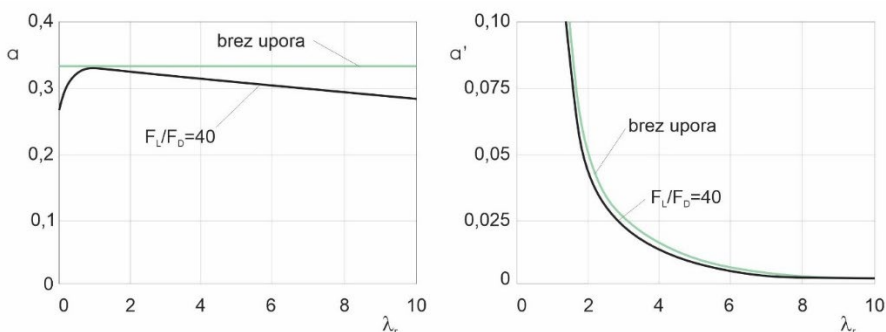
Če želimo navkljub mnenju Wilsona in Lissamana (1974)¹ upoštevati upor pri določanju koeficientov inducirane hitrosti, se moramo vrniti na enačbi (3.67) in (3.68) ter ponoviti izpeljavo izvedeno za primer brez upora. Matematična eksaktna izpeljava postane z vključitvijo upora zelo zahtevna, zato jo za potrebe tega dela izpuščamo.

Za popis vpliva upora na obliko lopatice je smiselno uporabiti razmerje sil F_L/F_D , ki je odvisno od profila lopatice, hrapavosti površine in vrednosti Reynoldsovega števila.

¹ Poglavje Dinamika elementarne lopatice

Ko upoštevamo silo upora, koeficient aksialne inducirane hitrosti toka na disku za optimalno obratovalno točko ni uniformen, kot to velja za primer brez upora. Vendar pa odmik od uniformnosti za nizka razmerja sile vzgona in upora (npr. $F_L/F_D \approx 40$) ni velik.

Radialni potek koeficientov inducirane aksialne in tangencialne hitrosti je za primer brez upora in za $F_L/F_D = 40$ prikazan v diagramu na sliki 3.22.



Slika 3.22: Radialni potek koeficientov a in a' za primer z upoštevanjem upora in brez njega.

Koeficient tangencialne inducirane hitrosti je v prisotnosti upora nižji, saj lopatice potegnejo tekočino za sabo v smeri vrtenja rotorja, kar je obratno smeri vrtilnega momenta na lopatice.

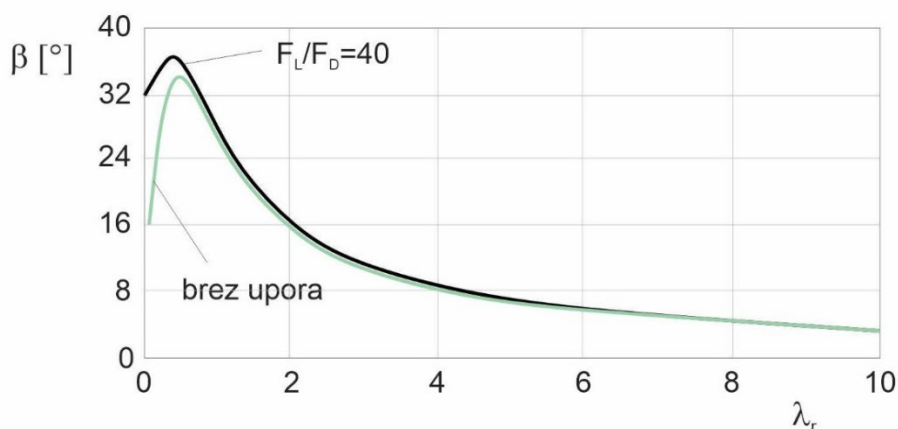


Slika 3.23: Sprememba parametra oblike lopatice vzdolž lopatice z upoštevanjem upora in brez njega.

Na sliki 3.23 je podana primerjava potekov geometrijskega parametra σ_r lopatice za primer, ko ni upora, in za primer razmerja sil $F_L/F_D = 40$.

S slike je razvidno, da ima upor majhen vpliv na optimalno obliko lopatice, namenjene za delovanje pri spremenljivih hitrostih vrtenja.

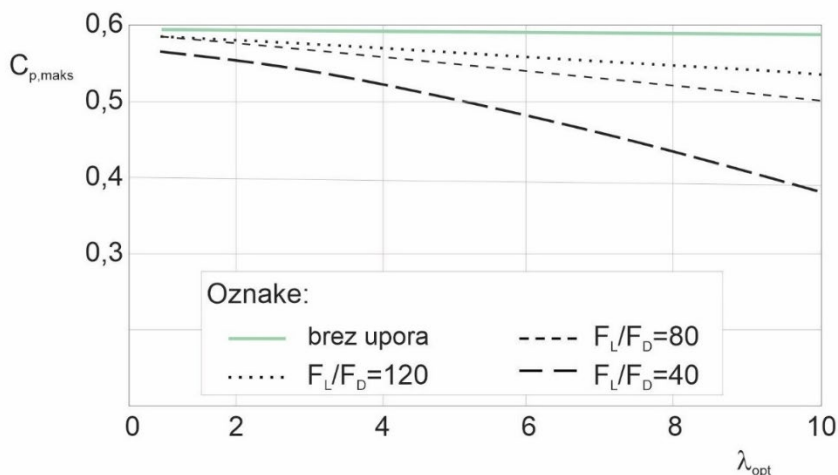
Podobne razmere nastopajo v diagramu poteka kota β , prikazanem na sliki 3.24. Tako lahko pri oblikovanju lopatice za optimalno delovanje upor enostavno zanemarimo, saj nam to precej poenostavi postopek.



Slika 3.24: Sprememba kota β v odvisnosti od lokalnega razmerja hitrosti brez upora in z njim.

V diagramu na sliki 3.25 so prikazane rešitve enačbe (3.28), ki nam definirajo maksimalne koeficiente moči pri različnih preračunskih razmerjih hitrosti λ_{opt} za različna razmerja sil F_L/F_D . Koeficienta induciranih hitrosti sta bila pri tem določena z enačbama (3.78) in (3.79) brez upoštevanja upora.

Iz diagrama je razvidno, da je znižanje C_p povzročeno z uporom, precejšnje in da narašča z večanjem razmerja hitrosti.



Slika 3.25: Odvisnost $C_{p,max}$ od λ_{opt} za različna razmerja F_L/F_D .

3.7.2.3 Učinek končnega števila lopatic

Analiza prejšnjih poglavij je temeljila na predpostavki, da je na rotorju zadostno število lopatic in da vsak delec tekočine pri gibanju skozi ravnino rotorja odda gibalno količino vrteči se lopatici. V primeru končnega števila lopatic bodo nekateri delci tekočine prišli v stik z lopaticami, večina pa jih bo neovirano prešla med lopaticami. Tako bo sprememba energije tekočinskega delca odvisna od bližine lopatice na mestu, kjer bo šel delec skozi ravnino rotorja. Aksialna inducirana hitrost v ravnini rotorja se bo zaradi tega nenehno spreminjala. Njena povprečna vrednost bo določala skupno komponento gibalne količine v aksialni smeri; medtem pa bodo višje vrednosti ob lopaticah definirale silo na lopatice in navor.

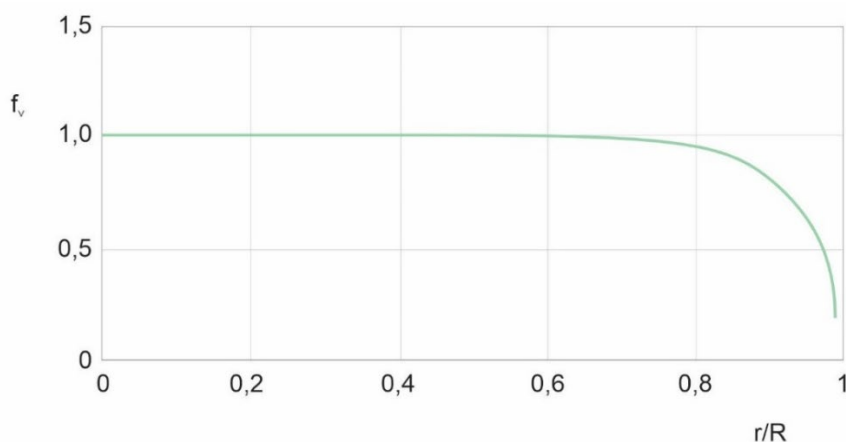
Izgube na vrhu lopatice

Če je koeficient aksialne inducirane hitrosti a na lopatici velik (enačba 3.61), potem bo kot relativne hitrosti β majhen, sila vzgona pa skoraj pravokotna na ravnino rotorja. Komponenta sile vzgona v tangencialni smeri bo majhna in s tem tudi njen prispevek k navoru. Manjši navor pomeni tudi manjšo moč. Opisano znižanje moči imenujemo izguba na vrhu lopatice oziroma vršna izguba, saj se ta učinek pojavlja le na skrajnih zunanjih delih (vrhovih) lopatic.

Za matematični popis vpliva vršnih izgub na koeficient moči teorija elementarne lopatice ne zadošča. V praksi se za izračun koeficienta vršnih izgub f_v uporabi Prandtlova aproksimacija:

$$f_v = \frac{2}{\pi} \cos \left(e^{\frac{N}{2} \left(\frac{1-\mu}{\mu} \right) \sqrt{1 + \frac{(\mu\lambda)^2}{(1-a)^2}}} \right)^{-1} \quad (3.107)$$

Potek koeficienta vršnih izgub vzdolž razpona lopatice je prikazan na sliki 3.26



Slika 3.26: Potek Prandtlovega koeficienta vršnih izgub vzdolž lopatice.

Prandtlov koeficient vršnih izgub je univerzalna rešitev kompleksnega problema, saj poleg vpliva končnega števila lopatic popiše tudi lokalne padce koeficientov induciranih hitrosti na robu rotirajočega diska.

Izgube v korenu lopatice

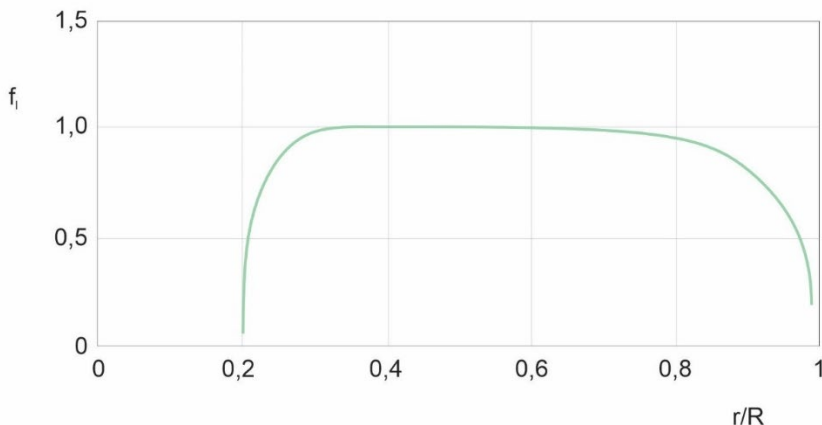
Tokovne razmere v korenu lopatice povzročijo izgube, podobne procesu, opisanem na vrhu lopatice, saj je dejanska hitrost gibanja zraka v korenu lopatice enaka hitrosti prostega toka. Tako lahko enačbo za Prandtlov koeficient vršnih izgub modificiramo za razmere v korenu lopatice in uporabimo za izračun koeficienta izgub v korenu lopatice f_k :

$$f_k = \frac{2}{\pi} \cos \left(e^{\frac{N}{2} \left(\frac{1-\mu_k}{\mu} \right) \sqrt{1 + \frac{(\mu\lambda)^2}{(1-a)^2}}} \right)^{-1} \quad (3.108)$$

kjer je μ_k normiran radij korena lopatice. Zdaj lahko zapišemo enačbo za skupni koeficient izgub f_l

$$f_l = f_v f_k \quad (3.109)$$

Učinek vršnih in korenskih izgub je prikazan s potekom koeficienta f_l vzdolž razpona lopatice v diagramu na sliki 3.27. Pri tem je bilo privzeto, da je koren lopatice na 20 % razpona.



Slika 3.27: Potek skupnega koeficienta izgub na lopatici f_l trikrake turbine s korenem na 20 % razpona.

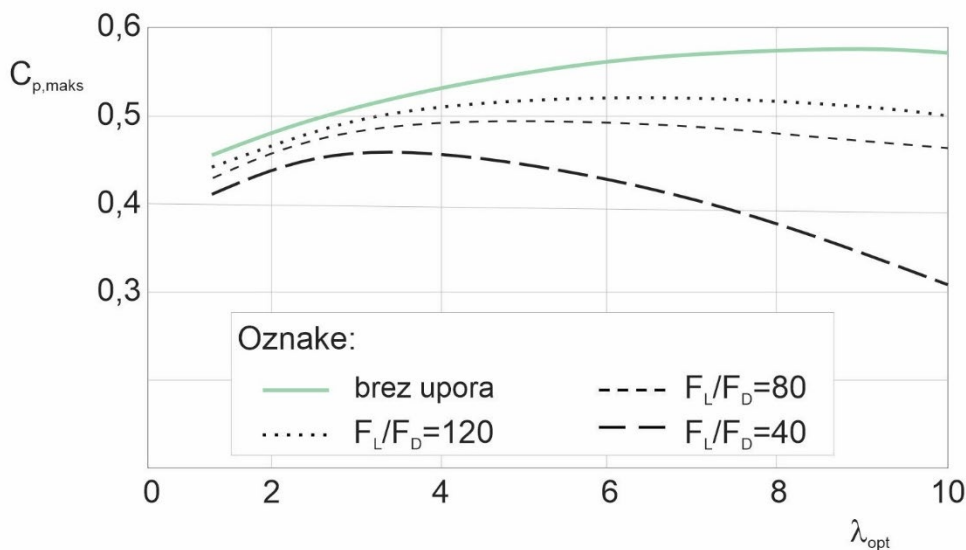
3.7.2.4 Učinek upora in izgub na lopatici na koeficient moči turbine

V poglavju o navideznem disku smo brez upoštevanja upora in izgub izpeljali Betzovo limito, ki predstavlja najvišjo teoretično mogočo količino zajete in koristno pretvorjene energije vetra.

V realnih pogojih upor in izgube na lopatici dodatno zmanjšujejo najvišji dosegljiv koeficient moči vetrnih turbin. Pri visokih razmerjih hitrosti λ se lopatice gibljejo z hitrostmi, višjimi od hitrosti vetra, zato se povečuje upor na lopaticah. Ta povečan

upor zmanjšuje koeficient moči, saj del energije disipira v toploto. Po drugi strani pa vrtnčenje zaradi odcepljanja toka pri nižjih razmerjih hitrosti λ vpliva neposredno na koeficient izgub na lopatici f_l in še v območju nizkih λ dodatno niža vrednost koeficienta moči C_p .

Če oba učinka vrišemo v diagram maksimalnega koeficienta moči $C_{p,maks}$ v odvisnosti od preračunskega razmerja hitrosti λ_{opt} , se diagram 3.25 modificira v obliko, prikazano na sliki 3.28.



Slika 3.28: Odvisnost $C_{p,maks}$ od λ_{opt} za različna razmerja F_L/F_D upoštevajoč izgube lopatice za trikrako vetrno turbino.

3.7.3 Optimalna oblika lopatice za delovanje pri konstantnih vrtilnih hitrostih

Če je rotacijska hitrost turbine konstantna, kot je to običajno za turbine, priključene na omrežje, potem se razmerje hitrosti λ spreminja z vetrom. V tem primeru lopatica, ki je bila optimirana za konstantno razmerje hitrosti λ , ni več ustrezna.

Za zasnovo optimalne oblike lopatice, ki deluje pri konstantni vrtilni hitrosti, ni na voljo enostavne tehnike. Uporabiti je mogoče metodo nelinearnega programiranja, pri čemer bi se maksimiral zajem energije na lokaciji z določeno porazdelitvijo

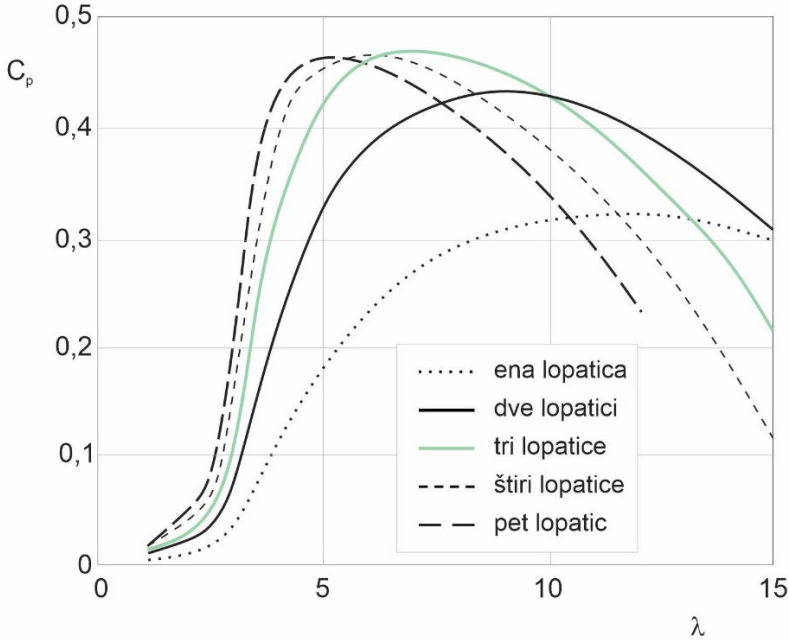
hitrosti vetra. Druga možnost je izbira preračunskega razmerja hitrosti, ki ustreza hitrosti vetra na lokaciji postavitve, ali pa, kar je bolj praktično, sprotna prilagoditev naklonskega kota celotne lopatice, da se poveča zajem energije.

3.8 Obratovalne karakteristike vetrnih turbin

Obratovalne karakteristike vetrnih turbin lahko opišemo v diagramih moči, navora in potisne sile glede na hitrost vetra. Pri tem moč določa količino energije, ki jo rotor lahko pretvori v mehansko delo; navor določa velikost menjalnika in ga je treba uskladiti z generatorjem, priključenim na vetrno turbino, potisna sila pa vpliva na temeljenje in zasnovno nosilnega stebra. Običajno obratovalne karakteristike prikažemo s pomočjo diagrama na osnovi brezdimenzijskih karakterističnih števil, iz katerih lahko določimo dejansko delovanje ne glede na način obratovanja turbine. Ob predpostavki, da se aerodinamične lastnosti lopatic rotorja ne poslabšajo, bo brezdimenzijsko aerodinamično delovanje rotorja odvisno od razmerja med obodno hitrostjo in hitrostjo vetra ter od kota nastavitve lopatic. Zato je običajno, da se koeficient moči C_p , navora $C_M = C_p/\lambda$ in potisne sile C_T v diagramih prikažejo kot funkcije razmerja obodne hitrosti na vrhu lopatice λ .

3.8.1 Karakteristika $C_p - \lambda$

Obratovalno karakteristiko $C_p = f(\lambda)$ za sodobno trilopatično vetrno turbino smo spoznali že na sliki 3.15. S slike je razvidno, da je največja vrednost koeficienta moči $C_{p,maxs} = 0,47$ dosežena pri razmerju $\lambda = 7$, kar je precej manj od Betzove limite za enako razmerje hitrosti. Razlika je posledica delovanja zračnega upora, izgub na lopaticah ter pojava zastoja toka pri nižjih vrednostih razmerja hitrosti. V nadaljevanju bomo prikazali diagrame poteka koeficienta moči C_p (enačba 3.84) v odvisnosti od λ za različna števila lopatic oziroma za različna razmerja σ_r (slika 3.29).



Slika 3.29: Odvisnost koeficienta moči C_p od razmerja hitrosti λ za različno število lopatic.

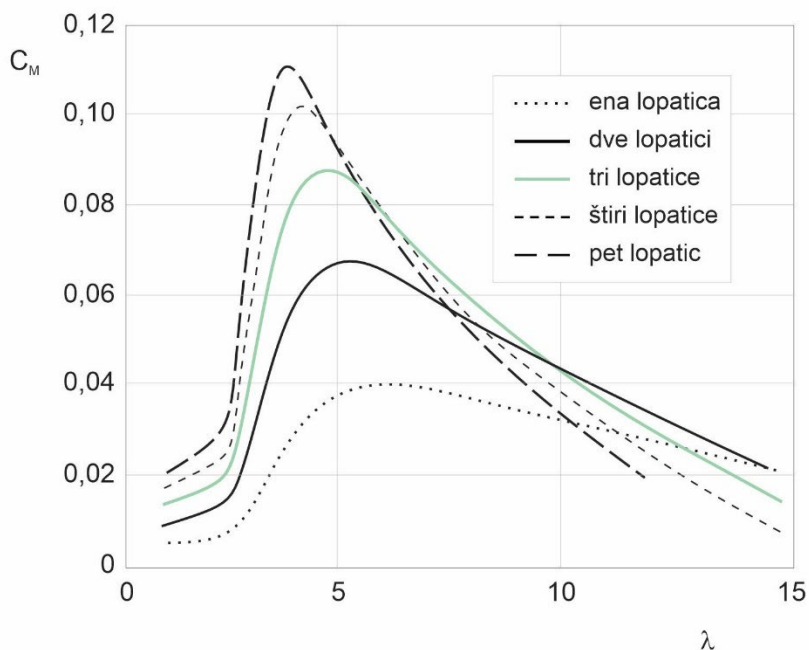
S slike je razvidno, da nizko število lopatic ustvari široko, ploščato krivuljo, kar pomeni, da se bo koeficient moči C_p zelo malo spreminjal v širokem razponu razmerja obodne hitrosti. Dosežena vrednost C_p je nizka, saj so izgube zaradi upora velike. Veliko število lopatic po drugi strani ustvarja strmo obratovalno karakteristiko z izrazitim vrhom, zaradi česar je taka turbina zelo občutljiva na spremembe razmerja obodne hitrosti λ . S slike izhaja tudi, da so najboljše razmere dosežene s tremi lopaticami, vendar bi bila lahko tudi izvedba turbine z dvema lopaticama ugodna alternativa, saj bi lahko bil zaradi manj strme krivulje kumulativni zajem energije vetra višji.

3.8.2 Karakteristika $C_M - \lambda$

Koeficient navora C_M je definiran z razmerjem koeficienta moči C_p in razmerja hitrosti λ :

$$C_M = \frac{C_p}{\lambda} \quad (3.110)$$

Poznavanje karakteristike $C_M = f(\lambda)$ je potrebno za pravilno dimenzioniranje multiplikatorja, s katerim zagotovimo ustrezno vrtilno frekvenco na električnem generatorju sodobnih turbin. Karakteristika navora za rotorje vetrnih turbin z različnim številom lopatic je prikazana v diagramu na sliki 3.30.



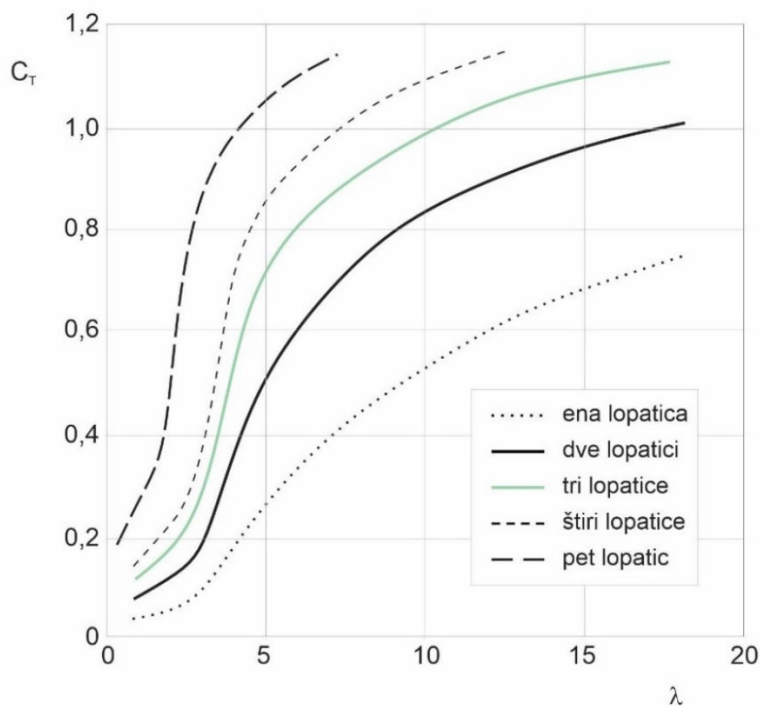
Slika 3.30: Odvisnost koeficienta navora C_M od razmerja hitrosti λ za različno število lopatic.

S slike je razvidno, da navor raste s številom lopatic. Prevoj, ki je prisoten na krivuljah, nastane pri nižjih vrednostih razmerja hitrosti v primerjavi s prevojem na krivuljah C_p (slika 3.29) in je posledica odcepljanja toka od lopatic.

Pri snovanju sodobnih vetrnih turbin za proizvodnjo električne energije so zaželeni čim manjše vrednosti koeficienta C_M , da se znižajo stroški izdelave multiplikatorja. Če pa bi s turbino na primer želeli poganjati črpalko za vodo, bi bila primernejša izvedba z večjim številom počasi vrtečih se lopatic (ameriški večlopatični rotor, slika 3.3).

3.8.3 Karakteristika $C_T - \lambda$

Vrednosti potisne sile so ključne pri dimenzioniranju in temeljenju nosilnih stebrov za turbine. Na sliki 3.31 je prikazan diagram poteka koeficienta aksialne potisne sile C_T (enačba 3.59) za sodobno trikrako vetrno turbino s horizontalno osjo.



Slika 3.31: Odvisnost koeficienta potisne sile C_T od razmerja hitrosti λ za različno število lopatic.

Iz diagrama poteka koeficienta potisne sile je razvidno, da aksialna sila narašča z višanjem razmerja hitrosti in s številom lopatic rotorja.

3.8.4 Karakteristika $K_p - 1/\lambda$

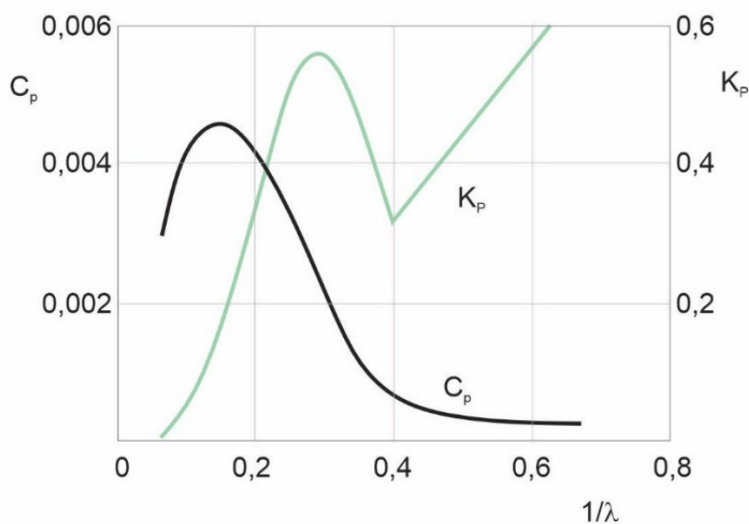
Večina danes obratujočih vetrnih turbin proizvaja električno energijo. Ne glede na to, ali so te turbine priključene na omrežje ali ne, morajo zagotavljati električno energijo s konstantno frekvenco (50 Hz), da lahko običajne električne naprave delujejo pravilno.

S tem v zvezi je za turbine, ki obratujejo s konstantno vrtilno hitrostjo, smiselno uporabiti alternativno karakteristiko, ki ponazarja spremembo moči vetrne turbine v odvisnosti od hitrosti vetra pri konstantni vrtilni frekvenci. Definirajmo v ta namen koeficient K_p

$$K_p = \frac{C_p}{\lambda^3} \quad (3.111)$$

Diagram $C_p = f(\lambda)$ kaže krivuljo spremembe moči z vrtilno frekvenco, če je hitrost vetra konstantna, medtem ko krivulja $K_p = f(\lambda^{-1})$ kaže potek spremembe moči s hitrostjo vetra, če je vrtilna frekvenca konstantna.

V diagramu na sliki 3.32 sta prikazani krivulji koeficientov C_p in K_p v odvisnosti od razmerja λ^{-1} .



Slika 3.32: Odvisnost koeficientov moči od razmerja hitrosti λ^{-1} .

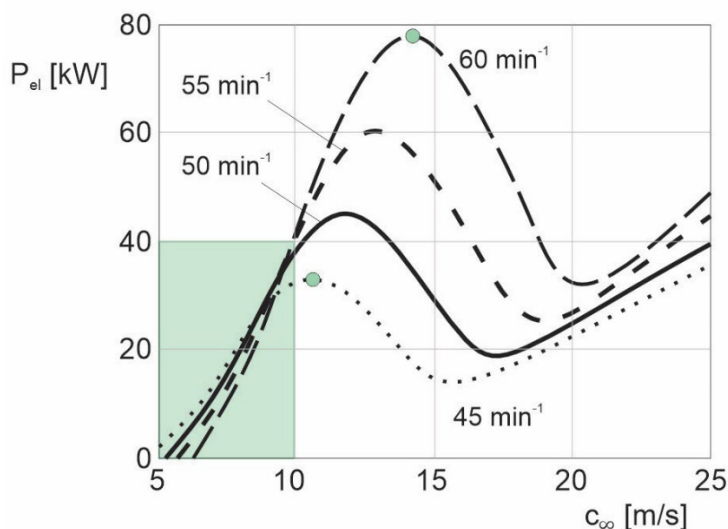
S slike 3.32 je razvidno, da dosežeta obe krivulji pri neki vrednosti hitrosti vetra svoj maksimum. Prevoj koeficienta moči K_p se zgodi, ko se tok odcepi od lopatic, nato pa začne pri višjih vrednostih hitrosti vetra ponovno enakomerno naraščati. V tem obratovalnem območju ima turbina nizke vrednosti izkoristka, kar je razvidno iz krivulje C_p . Iz navedenega razloga je smiselno lopatice turbine snovati tako, da bo

najvišji izkoristek pri hitrostih vetra, ki so na lokaciji postavitve turbine najbolj verjetne.

Padec moči na krivulji K_p imenujemo pasivna regulacija vetrne turbine, ki preprečuje preobremenitev električnega generatorja. Obratovanje pri hitrostih vetra v območju toka, odcepljenega od rotorskih lopatic, pa povzroča neželene vibracije in z njimi dodatne mehanske obremenitve lopatic, ki s stališča življenjske dobe in s stališča stroškov izdelave niso zaželenne.

3.8.4.1 Vpliv vrtilne hitrosti na karakteristiko

V diagramu na sliki 3.33 je prikazano obratovanje turbine pri različnih vrtilnih frekvencah. S slike je razvidno, da lahko turbina, ko obratuje na prevoju karakteristike K_p , pri povišanju vrtilne frekvence iz 45 min^{-1} na vrtilno frekvenco 60 min^{-1} doseže kar 1,5-kratno povišanje izhodne električne moči, kot je razvidno iz oznak (zeleni piki) na sliki 3.33.



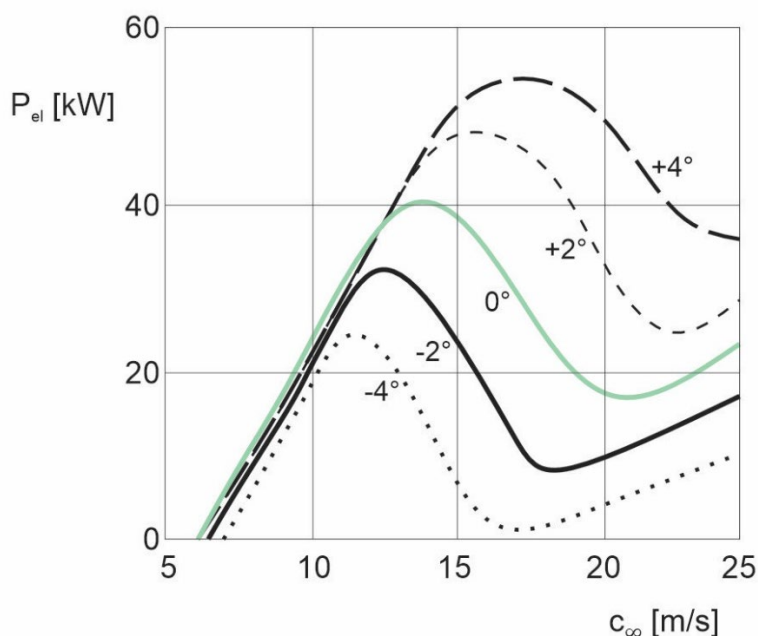
Slika 3.33: Vpliv vrtilne frekvence na obratovalno karakteristiko vetrne turbine.

Hkrati je s senčenega območja v diagramu slike 3.33 razvidno tudi, da pri nizkih hitrostih vetra turbine, ki se vrtijo z višjimi vrtilnimi frekvencami, dosega nižje moči, hkrati pa so zagonske hitrosti teh večje. Prav zato proizvajalci ponujajo vetrne

turbine, razvite za dve hitrosti rotacije. Takšne turbine lahko učinkovito delujejo pri majhnih in velikih hitrostih vetra.

3.8.4.2 Vpliv nastavitve lopatice na karakteristiko

Parameter, ki pomembno vpliva na izhodno električno moč P_{el} , je tudi nastavni kot lopatic, kot je bilo opisano v poglavju 3.7.2. Vpliv različnih lopatic je za konstantno vrtilno frekvenco in različne hitrosti vetra prikazan na sliki 3.34.



Slika 3.34: Vpliv spremembe nastavnega kota lopatice na obratovalno karakteristiko turbine.

S slike je razvidno, da majhne spremembe nastavnega kota φ lahko močno vplivajo na izhodno električno moč. Pozitivne nastavitve nastavnega kota φ zmanjšajo natočni kot δ . Nasprotno pa negativne vrednosti nastavnega kota povečajo natočni kot in lahko povzročijo odcepljanje toka ter s tem padec izhodne moči.

Ugotovimo lahko, da se rotor turbine, zasnovan za optimalno delovanje pri določenih pogojih vetra, lahko prilagodi drugim pogojem z ustrezno regulacijo nastavnega kota lopatic in hitrosti vrtenja.

4 Okoljski vidik izrabe vetrne energije

Vse človeške aktivnosti imajo vpliv na naravo in okolje. Podobno je pri izkoriščanju energije vetra z vetrnimi turbinami. Energija vetra je obnovljiv vir energije, zato je pomembno, da pri umeščanju vetrnih turbin v okolje skrbimo, da so vplivi na naravo, živali in ljudi minimalizirani. Zakonodaja, ki obravnava umeščanje vetrnih turbin v okolje, se razlikuje od države do države, pri čemer so osnovne zakonitosti varovanja okolja enake. Gradnja kapacitet za izkoriščanje energije vetra na splošno ni dovoljena na območjih, ki so namenjena ohranjanju biotske raznovrstnosti (npr. Natura 2000), oziroma na teh območjih za gradnjo veljajo posebna pravila. Enako pomemben je vpliv na ljudi, zato gradnja vetrnih turbin načeloma ni dovoljena tam, kjer lahko povzroči nepotreben hrup in vizualne ali svetlobne učinke, ki vplivajo na kakovost bivanja.

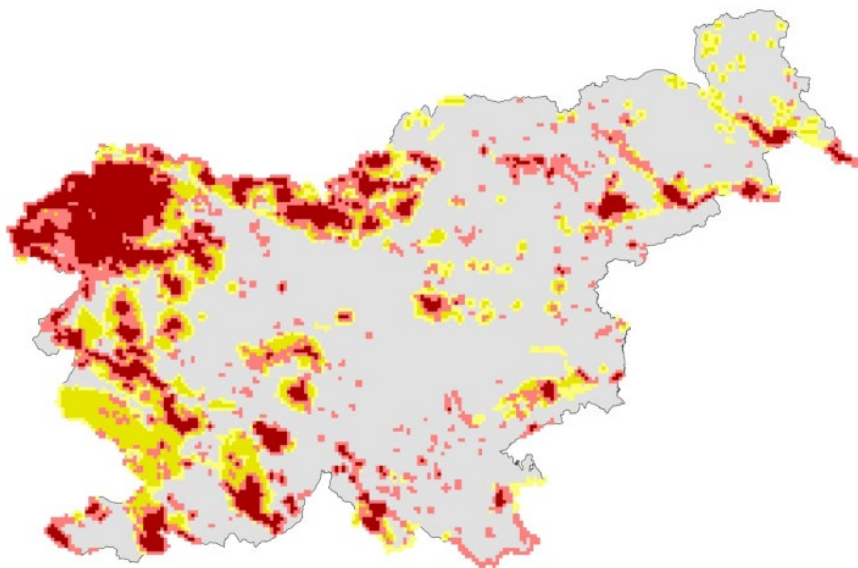
Poglavje, ki sledi, se osredotoča na okoljske vplive kopenskih vetrnih turbin. Zaradi zelo malega števila postavljenih vetrnih turbin v Sloveniji so v poglavju povzeti primeri in študije iz drugih držav, ki imajo daljšo tradicijo izkoriščanja energije vetra in večje inštalirane moči obratujočih vetrnih turbin.

4.1 Vpliv na živali in živalski habitat

Vrtenje rotorja vetrnih turbin in nadzemni daljnovodi imajo največji vpliv na ptice in netopirje, postavitev vetrnih turbin pa lahko vpliva na ptice tudi po učinku ovire (moti pot leta ptic) ali pa določeno vrsto ptic izrine zaradi vznemirjenja. Gradnja vetrnih turbin in njihova pomožna infrastruktura (temelji, servisne ceste ...) ima največji vpliv na živalski habitat (izguba oziroma zmanjšanje okolja, kjer prebiva in lovi določena vrsta živali, npr. divjad, ptice, plazilci itd.).

Pri umeščanju vetrnih turbin v okolje se največ govori o možnih trkih ptic z lopaticami rotorja. Do tega lahko pride pri nepravilnem oziroma neustreznem umeščanju vetrnih turbin v okolje. Velikokrat je do množičnih trkov prišlo pri postavitvah prvih vetrnih turbin, ko projektanti še niso imeli toliko znanja in izkušenj ter še ni bilo študij in napotkov za ustrezno izbiro lokacij postavitve vetrnih turbin. V Združenih državah Amerike (ZDA) je bil tak primer pri postavitvi polja vetrnih elektrarn na območju Altamont Pass v Zvezni državi Kalifornija. Nam bližje je znan primer polja vetrnih turbin postavljen v kraju Tarifa na jugu Španije. V obeh primerih je pri delovanju prišlo do množičnih trkov ptic z vetrnimi turbinami. Veliko ptic je bilo zaščitene vrste (bele štoklje, orli ipd.). Da bi se izognili podobnim dogodkom, je bilo narejenih veliko študij, ki so pripomogle k določitvi korakov, potrebnih, da trke ptic z vetrnimi turbinami zmanjšamo oziroma preprečimo. V svetu obstaja veliko primerov, ki nakazujejo, da lahko vetrne turbine postavimo na takšno lokacijo, da njihovo delovanje ne ogroža ptic oziroma je ta minimalna. To nakazuje, da je s premišljeno izbiro lokacije postavitve vetrne turbine možno pridobivati električno energijo na okolju prijazen način z minimalnim vplivom na živali in ljudi. [13]

Osnovni napotki pri umeščanju vetrne turbine v okolje so izogibanje migracijskim koridorjem ptic. Glavni koridorji za migracijo ptic in območja z visoko koncentracijo ptic so območja, kjer velja splošno pravilo, da se vetrne turbine ne postavljajo. Izjeme so območja, za katera obstajajo študije lokalnih vzorcev letenja, ki nakazujejo, da so leti ptic nizki (pod višino rotorje turbin) ali da obstajajo drugi dejavniki, ki nakazujejo na majhno tveganje za trke in smrtnost ptic z rotorji vetrnih turbin. Tvegane lokacije za postavitev vetrnih turbin lahko vidimo s karte občutljivih območij za ptice. Za Slovenijo so takšno karto izdelali leta 2012, [15], slika 4.1. Uporaba takšnih kart omogoča trajnostno umeščanje vetrnih elektrarn, ki združuje energetske potrebe z varstvom narave.



Slika 4.1: Karta občutljivih območij za ptice za umeščanja vetrnih elektrarn v Sloveniji [15].

Temno rdeče obarvana območja na karti občutljivih območij za ptice za umeščanja vetrnih elektrarn v Sloveniji, slika 4.1, prikazujejo močno občutljiva območja, kjer je veliko tveganje, da bo pri postavitvi vetrne elektrarne lahko prišlo do trka ptic z rotorji vetrnih turbin. Rožnata območja na karti predstavljajo območja, ki so delno prekrita z močno občutljivimi območji. Temno rumena območja so območja, kjer je prekritost z močno občutljivostjo delna, pokritost z zmerno občutljivimi območji za trk ptic z vetrnimi turbinami pa večja. Svetlo rumena barva predstavlja območja, kjer obstaja delna prekritost z zmerno občutljivim območjem. Na močno občutljivih območjih se gradnja vetrnih turbin odsvetuje, medtem ko se za posamezno mikrolokacijo na zmerno občutljivih območjih svetuje izvedba študije aktivnosti ptic (letov), ki jo opisujemo v nadaljevanju.

Pri postavitvi polja vetrnih turbin se priporoča manjše število večjih turbin. Na ta način se zmanjša število struktur (stebrov, rotorjev in druge pripadajoče infrastrukture) v polju, kar naj bi vplivalo na zmanjšanje verjetnosti trkov ptic z vetrnimi turbinami.

Pri zasnovi nosilnih stolpov vetrnih turbin se svetuje, da se, kjer je to izvedljivo, uporabljajo zasnove stolpov, ki ponujajo malo ali nič mest za pristajanje in gnezdenje ptic. Tako se priporoča uporaba stolpov s polnimi stebri in odsvetuje uporaba stolpov s palično zasnovo konstrukcije (slika 4.2).

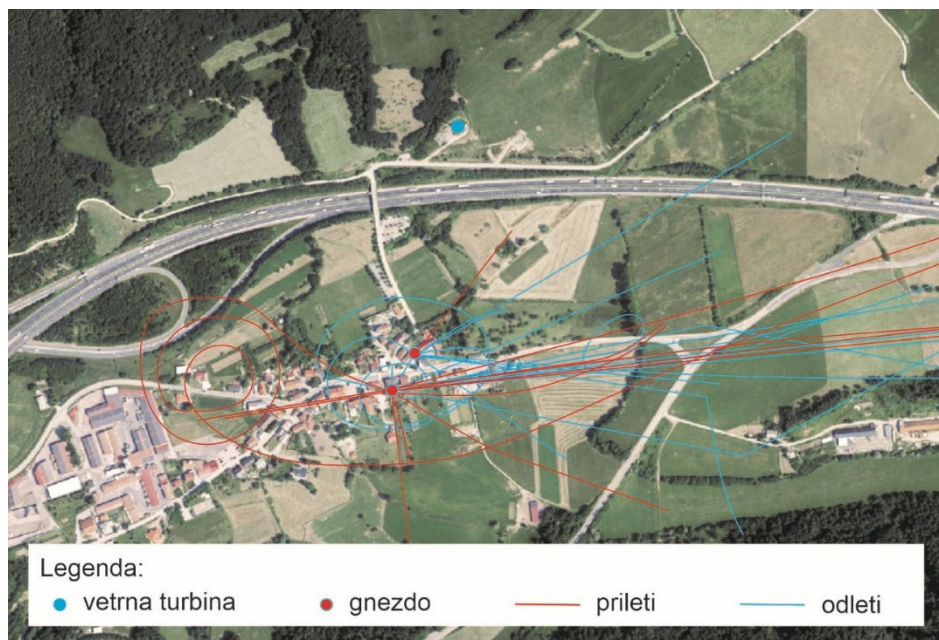


Slika 4.2: Tipi stolpov vetrnih turbin [16].

Električni vodi daljnovodov naj bodo, kadar je to izvedljivo, zakopani v zemljo. Če to ni možno, je treba nov nadzemni električni distribucijski sistem zasnovati tako, da preprečujejo električni udar ptic.

Če na izbrani lokaciji za postavitev vetrne turbine ali polja turbin gnezdijo ptice, se svetujeta odstranitev in premaknitev gnezd na druga primerna območja. Svetuje se, da odstranitev in premaknitev gnezd odobri ustrezna institucija.

Pred postavitvijo vetrne elektrarne ali polja vetrnih elektrarn na posamezno mikrolokacijo se svetuje izvedba študije, ki natančno analizira posamezno lokacijo in aktivnosti ptic. Takšna študija mora vsebovati seznam vseh ptic, ki gnezdijo in lovijo na izbrani lokaciji, nevarnosti za posamezno vrsto ptic, štetje mladičev, poti (linije) letov ptic ipd. Izvedba takšne študije omogoča celostno oceno vplivov postavitve vetrne turbine na ptice na izbrani lokaciji, iz nje pa lahko pridobimo tudi napotke, kako zmanjšati verjetnost trka ptic z rotorjem turbine. V Sloveniji je za postavitev vetrne turbine v Razdrtem takšno študijo izvedel dr. Damijan Denac iz Društva za opazovanje in proučevanje ptic Slovenije [17]. Slika 4.3 prikazuje študijo letov bele štoklje v okolici predvidene lokacije vetrne turbine na Razdrtem.



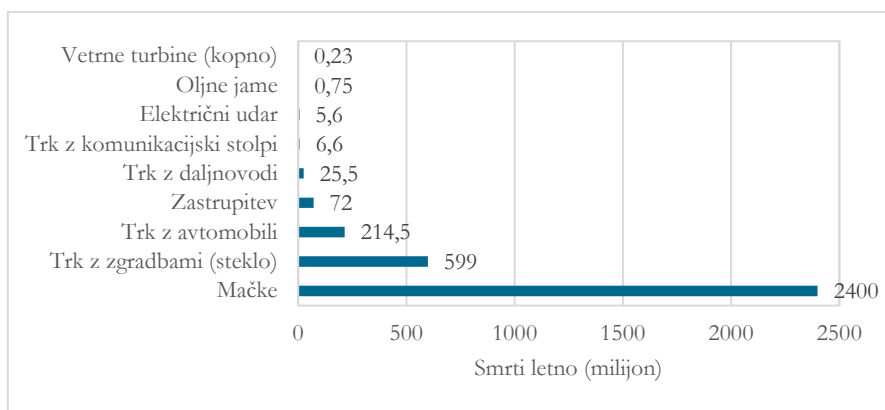
Slika 4.3: Študija letov bele štorke na Razdrtem.

S slike 4.3 lahko razberemo smeri priletov (rdeča barva črt) in smeri odletov (modra barva črt) bele štorke v okolici lokacije postavitve vetrne turbine na Razdrtem (modra pika). Vidimo lahko, da večina aktivnosti bele štorke ne poteka v okolici lokacije vetrne turbine.

Na smrtnost ptic pa vplivajo vse antropogene dejavnosti, ne samo uporaba vetrnih turbin. Študija službe za ribe in divje živali iz ZDA [18] kaže, da je veliko drugih človeških dejavnikov, ki imajo mnogo večji vpliv na smrt ptic v primerjavi z vetrnimi turbinami (slika 4.4).

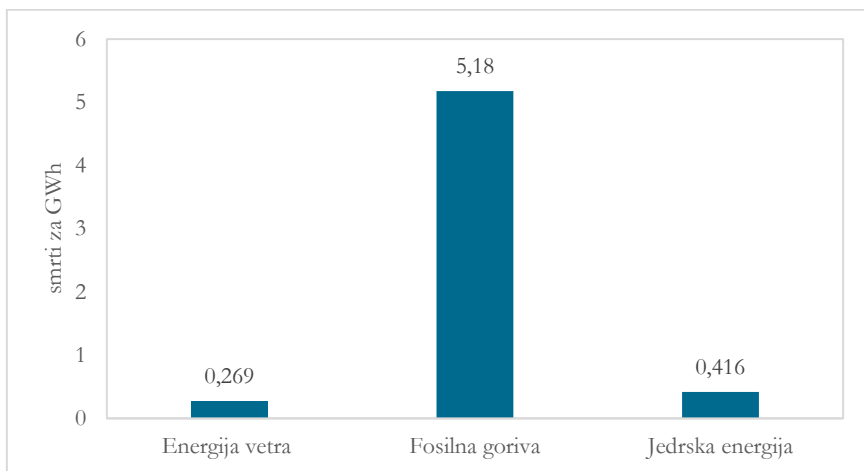
Kot lahko vidimo s slike 4.4, so za največje število poginulih ptic krive mačke, ki so na letni ravni odgovorne za 2400 milijonov mrtvih ptic v ZDA. Ptice pogosto ne prepoznajo steklenih površin zgradb kot ovire, še posebej, če odsevajo nebo ali vegetacijo. To lahko vodi do trkov, ki so pogosto smrtonosni. Na tretjem mestu po številu poginulih ptic so njihovi trki z avtomobili, ki jim sledijo smrti zaradi zastrupitev, trki ptic z daljnovodi in trki s komunikacijskimi stolpi. Pogosti so tudi električni udari ptic, ki so na letni ravni odgovorni za 5,6 milijona poginulih ptic v ZDA in smrti v oljnih jamah. Oljna jama je odprt zbiralnik (rezervoar), v katerem se

shranjuje ali zbira odpadno olje, naftni derivati ali druge tekočine, povezane z naftno industrijo. Takšne jame so pogosto najdene v bližini rafinerij, naftnih polj ali drugih industrijskih objektov, kjer se obdelujejo ali proizvajajo naftni proizvodi. Ptice, ki pristanejo v takšnih jamah, se pogosto ne morejo več rešiti in lahko poginejo zaradi zadušitve ali zastrupitve. Na zadnjem mestu po številu poginulih ptic so vetrne turbine, ki so v primerjavi z mačkami krive za 10.000-krat manj smrti. Seveda pa problema trkov ptic z vetrnimi turbinami ne smemo zanemariti. Že dokaj malo število trkov ptic zaščitenih vrst z vetrnimi turbinami lahko zelo pomembno vpliva na preživetje določene vrste ptic.



Slika 4.4: Smrti ptic zaradi različnih dejavnikov v ZDA [18].

Smrtnost ptic zaradi izkoriščanja energije vetra z namenom pridobivanja električne energije pa lahko gledamo tudi iz druge perspektive, kot npr. smrtnost na pridobljeno GWh električne energije. Takšno študijo je leta 2009 opravil Sovacool [19]. V njej je primerjal tri vire (energente) za pridobivanja električne energije (energijo vetra, fosilna goriva in jedrsko energijo) in smrti ptic, povezane s posameznim virom. Ugotovil je, da pride do največjega števila smrti ptic pri pridobivanju električne energije iz fosilnih virov, 5,18 smrti na GWh, medtem ko je število smrti pri pridobivanju elektrike iz jedrske energije in s pomočjo vetrnih turbin veliko manjše. Grafični prikaz števila smrti ptic za pridobljeno GWh električne energije iz Sovacoolove študije je prikazan na sliki 4.5.



Slika 4.5: Ocenjena smrtnost ptic za proizvedeno GWh električne energije [19].

Učinek ovire vpliva na ptice na način, da vidijo vetrno turbino kot oviro v svojem območju letov. Z namenom izogibanja oviri se odselijo na drugo lokacijo. Živali pa se lahko z območja postavitve vetrne turbine odselijo tudi zaradi vznemirjenja, ki ga prisotnost turbine povzroči v njihovem habitatu. Selitve so možne tudi do več kilometrov vstran od lokacije postavitve vetrne turbine. Vse omenjeno pa lahko vpliva na upad populacije določene živalske vrste, zmanjšanje števila potomcev in spremenjeno vedenje živali, kar pomeni pomembno grožnjo predvsem za redke in zaščitene vrste živali.

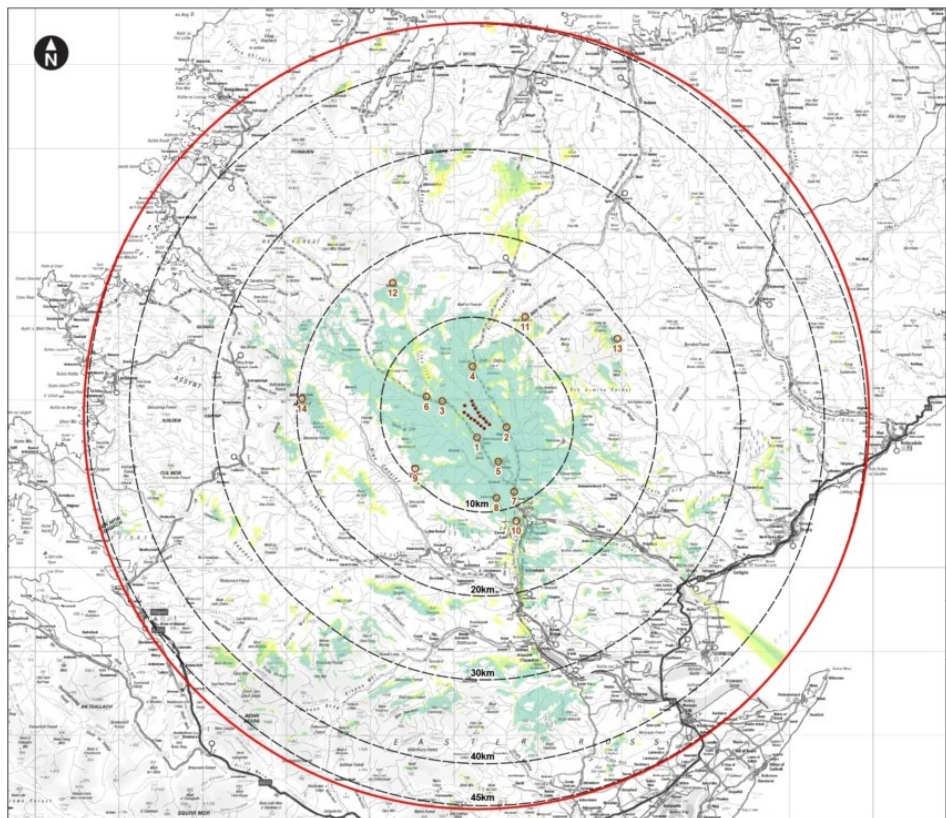
Vpliv vetrnih turbin na netopirje je podoben kot opisano na primeru ptic. Obstaja velika možnost trkov netopirjev z rotorji vetrnih turbin. Svetuje se, da se v izogib trkov netopirjev z vetrnimi turbinami v njihovi okolici vzdržuje vsaj 50-metrski pas brez dreves in grmovja, ki bi ga netopirji lahko izbrali za svoj življenjski habitat. [13]

Izguba živalskega habitata se kaže kot izguba prostora, kjer živali bivajo ali se prehranjujejo (lovijo). Do tega pride pri postavitvi dovoznih in servisnih cest, temeljev vetrnih turbin in druge infrastrukture. Vpliv na izgubo živalskega habitata je intenzivnejši v fazi gradnje, ko sta frekvenca vozil in zasedenost okolice vetrne turbine večji. Študija iz Hrvaške je pokazala, da velike zveri (volkovi in medvedi) uporabljajo okolico vetrnih turbin za svoj življenjski habitat v času aktivnega delovanja vetrnih turbin. [20]

4.2 Vpliv na degradacijo pokrajine (vizualni vpliv)

Sodobne vetrne turbine so pogosto zelo velike, z višino stolpa med 80 in 200 m ter premerom rotorja 200 m ali več. To pomeni, da so vidne z velikih razdalj. Njihova postavitve v odprtih pokrajinah ali na hribovitih območjih izven urbanega okolja je še posebej opazna in lahko močno spremeni naravno podobo pokrajine. Vpliv na degradacijo okolja in estetski videz pokrajine je pogosto eden izmed glavnih razlogov za nasprotovanje pri postavitvi vetrnih turbin na določeni lokaciji. Ocenjevanje tega vpliva je zelo težko in je v večini primerov subjektivno. Strokovnjaki, ki delajo na tem območju, lahko na podlagi poznavanja lastnosti vizualne kompozicije, vizualne skladnosti (harmonije) projekta z okoljem ipd. do neke mere ocenijo vizualni vpliv postavitve vetrne turbine ali polja turbin na posamezni lokaciji. V ta namen se pripravijo (ocenijo) območja teoretične vidnosti vetrne turbine z uporabo virtualnih modelov reliefov pokrajine. Ta nam omogoči identificiranje lokacij, s katerih bo posamezna turbina (ali polje) vidna, brez upoštevanja lastnosti pokrajine (dreves, zgradbe ipd.). Projektantom takšna študija poda vpogled v to, ali bo projekt bistveno vplival na spremembo izgleda okolja, ali bo projekt bistveno odstopal od oblike, linij in barve teksture okolice ter ali bo projekt bistveno poslabšal vizualno kakovost pogleda (zastrl dragocene vizualne vire, npr. kulturno dediščino). [13]

Virtualno določena območja teoretične vidnosti za polje 16 vetrnih turbin na lokaciji Shinness na Škotskem so prikazana na sliki 4.6, kjer rumeno obarvana območja predstavljajo teoretično vidljivost 1–4 vetrnih turbin. Svetlo zelena območja predstavljajo teoretično vidljivost 5–8 vetrnih turbin, temnozeleno območja teoretično vidljivost 9–12 vetrnih turbin in turkizna območja 13–16 vetrnih turbin.



Slika 4.6: Območja teoretične vidnosti vetrnih turbin za lokacijo Shinness na Škotskem [21].

Podobno študijo je možno narediti tudi z uporabo fotomontaže, pri čemer z uporabo digitalnih orodij v panoramsko sliko pokrajine, posneta z določene lokacije, vdelamo vetrno turbino (ali polje turbin) prilagojene velikosti. Pomanjkljivost te metode je, da nam poda samo en pogled, pri katerem je bila posneta panoramska slika. Zadevo je možno izboljšati z izdelavo video montaže, kjer lahko dodamo učinek vrtenja turbinskih rotorjev in spreminjanje pogleda (npr. vremenskih razmer). Slika 4.7 prikazuje fotomontažo (en pogled z izbrane lokacije) postavitve vetrnih turbin na lokaciji Shinness na Škotskem.



Slika 4.7: Fotomontaža vidnosti vetrnih turbin za lokacijo Shinness na Škotskem [22].

Vizualni vpliv vetrne turbine na posamezno lokacijo je mogoče zmanjšati z upoštevanjem naslednjih strategij:

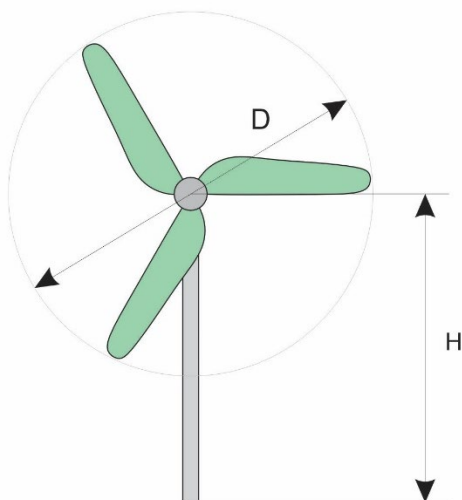
- uporaba reliefnih oblik pokrajine pri umeščanju in postavitvi servisnih cest,
- uporaba nevpadljivih oblik pomožnih objektov,
- uporaba enotne barve, oblike stebrov in obdelave površin vetrnih turbin,
- daljnovodi in temelji naj bodo podzemni,
- omejevanje velikosti, barv in števila oznak (reklam) na posamezni turbini,
- omejevanje osvetljevanja in
- uporaba enakega tipa vetrnih turbin oziroma ločevanje posameznih tipov turbin na mikrolokacije, ločene z varovalnim pasom (buffer zone).

4.3 Vpliv na javno varnost

Postavitev in delovanje vetrnih turbin lahko pomeni določena tveganja za varnost ljudi v njihovi bližini (lom komponent turbine, padec ledu itd.). Ta tveganja so mala, vendar jih je treba upoštevati, zlasti pri načrtovanju in postavitvi vetrnih parkov blizu naselij ali javnih prostorov.

Primeri, v katerih bi prišlo do katastrofalnih poškodb med obratovanjem vetrnih turbin (npr. odpadla lopatica), so redki, vendar jih ne moremo povsem izključiti. Pri umeščanju vetrnih turbin v okolje se v Veliki Britaniji svetuje uporaba minimalne oddaljenosti turbine od cest in drugih pogosto zasedenih območij. Za minimalno oddaljenost se svetuje uporaba faktorja 1.1-kratnika višine vrha lopatice turbine. Enaka oddaljenost se svetuje od nadzemskih daljnovodov. V Združenih državah

Amerike se na podlagi zaznanih poškodb vetrnih turbin, pri katerih je prišlo do padca rotorjev, stebrov ali ohišja strojnice, svetuje, da je ta razdalja še večja, do 2-kratnika višine rotacijske osi. V večini držav zakonodaja ne določa minimalne oddaljenosti vetrnih turbin na podlagi vidika varnosti, saj je ta razdalja po navadi krajša od potrebnih oddaljenosti zaradi hrupa in svetlobnega vpliva (opisano v naslednji podglavljih). [13]



Slika 4.8: Shematski prikaz premera rotorja in višine rotacijske osi vetrne turbine.

Vpliv na varnost ljudi v okolici vetrnih turbin se pojavi tudi v primeru nizkih temperatur, ko lahko pride do nabiranja ledu ali snega na posameznih delih vetrnih turbin. Do težav lahko pride, ko se rotorske lopatice segrejejo in se led, pritrjen na njih, stali in pade na tla v neposredno okolico turbine ali pa ga zaradi vrtenja in centrifugalnih učinkov vrže dlje od turbine. Na območjih, kjer obstaja verjetnost tvorjenja ledu na lopaticah, se pri umeščanju vetrnih turbin svetuje upoštevanje razdalje nevarnosti padca ledu. Svetuje se, da se pri izračunu razdalje nevarnosti padca ledu d uporabi naslednja enačba:

$$d = 1,5 (D + H) \quad (4.1)$$

pri čemer D predstavlja premer rotorja in H višino rotacijske osi rotorja, shematsko prikazano na sliki 4.8.

Pri sodobnih vetrnih turbinah je verjetnost nabiranja ledu na lopaticah rotorja dokaj mala zaradi vgradnje sistemov, ki preprečujejo delovanje turbin v primeru nevarnosti nastanka ledu ali pa so turbine opremljene s sistemi, ki preprečujejo nabiranje ledu. V študiji, predstavljeni v referenci [3], so določili, da je razdalja, na kateri je nična verjetnost, da te zadene led iz vetrne turbine, enaka 250 m od turbine.

Čeprav so vetrne turbine običajno postavljene na odmaknjenih lokacijah, so zaradi svoje velikosti po navadi vidne z javnih površin. Zaradi vzdrževalnih cest pa so relativno enostavno dostopne. To lahko privabi radovedne posameznike, ki lahko poskusijo splezati na stolpe turbin, dostopati do elektronike ali kako drugače posegati v infrastrukturo turbine, kar lahko vodi do nevarnih situacij, katerih posledice so lahko hude poškodbe.

Pri vzdrževanju vetrnih elektrarn je treba posebno pozornost nameniti tudi požarni varnosti. Predvsem je to pomembno v poletnih mesecih, ko je lahko okolica vetrnih elektrarn zelo suha in predstavlja netivo za požare v naravi.

4.4 Vpliv hrupa

Problem hrupa, povezanega z vetrnimi turbinami, je eno izmed bolj proučenih področij okoljskega vpliva izkoriščanja energije vetra. Raven hrupa je mogoče izmeriti, vendar pa je, tako kot pri drugih okoljskih skrbih, zaznavanje hrupa vetrnih turbin s strani javnosti subjektivno.

Hrup je definiran kot katerikoli nezaželen zvok. Ali je hrup moteč za okolico, je odvisno od njegove intenzivnosti, frekvence, porazdelitve frekvence in vzorcev vira hrupa. Na zaznavanje hrupa vetrnih turbin pa vpliva tudi raven hrupa ozadja, oblika terena med vetrno turbino in sprejemnikom ter narava sprejemnika hrupa. Učinke hrupa na ljudi lahko razvrstimo v tri kategorije:

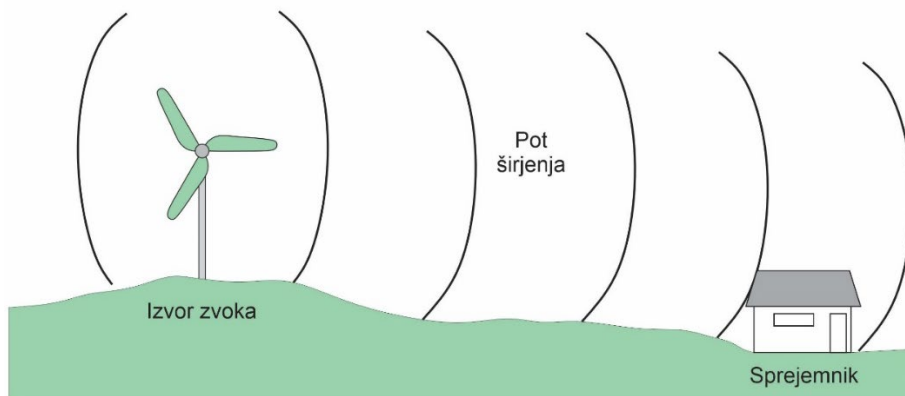
- subjektivni učinki, vključno z nadležnostjo, nevšečnostjo in nezadovoljstvom,
- motnje pri aktivnostih (npr. govor, spanje ali učenje),
- fiziološki učinki, kot so tesnoba, zvonjenje v ušesih ali izguba sluha.

V skoraj vseh primerih ravni hrupa iz okolja povzročajo učinke le v prvih dveh kategorijah. Delavci v industrijskih obratih in tisti, ki delajo okoli letal z reaktivnimi motorji, lahko doživljajo učinke hrupa iz tretje kategorije. Ali je hrup moteč, bo odvisno od vrste hrupa in okoliščin ter občutljivosti osebe (sprejemnika), ki ga zaznava. Predvsem zaradi velike raznolikosti ravni individualne tolerance do hrupa ne obstaja celosten način za merjenje subjektivnih učinkov hrupa ali ustreznih odzivov na nadležnost, nevšečnost in nezadovoljstvo. [19]

Obratovalni hrup, ki ga proizvajajo vetrne turbine, je precej drugačen po jakosti in naravi kot pri večini velikih elektrarn, ki jih lahko uvrstimo med industrijske vire hrupa. Vetrne turbine so pogosto postavljene na podeželskih ali odročnih območjih, ki imajo temu primerno nizko raven hrupa ozadja. Ne glede na to, da je hrup, ki ga proizvajajo vetrne turbine, lahko moteč za okoliške prebivalce, je velikokrat prikrit s hrupom okolice ali s hrupom vetra.

Z izboljšavami v zasnovi profilov lopatic vetrnih turbin in strategiji obratovanja turbin se več energije vetra pretvori v koristno mehansko energijo in manj v akustični hrup. Kljub dobri zasnovi pa lahko turbina proizvede nekaj hrupa iz menjalnika, zavor, hidravličnih komponent ali celo pomožnih elektronskih naprav.

Dejavniki, ki so pomembni za potencialni okoljski vpliv hrupa vetrnih turbin, so prikazani na sliki 4.9. Hrup se proizvaja v izvoru zvoka (vetrna turbina) in se nato širi v okolico (pot širjenja), dokler ne doseže sprejemnika (naselje/hiša).



Slika 4.9: Dejavniki pri obravnavi vpliva vetrnih turbin na hrup.

4.4.1 Lastnosti zvoka in hrupa

Zvok nastaja zaradi številnih mehanizmov in je vedno povezan s hitrimi in majhnimi spremembami tlaka. Po zraku se zvok širi kot longitudinalno valovanje, ki povzroča nihanje bobniča v človeškem ušesu. Zvočni valovi so označeni glede na njihovo valovno dolžino λ , frekvenco f in hitrost zvoka c_{zv} , pri čemer je c_{zv} povezan z λ in f po enačbi:

$$c_{zv} = f \lambda \quad (4.2)$$

Hitrost zvoka je odvisna od medija, skozi katerega potuje, gostejši kot je medij, večja je hitrost zvoka. Hitrost zvoka v zraku pri okoliških pogojih zraka 1 bar in 20 °C je približno 340 m/s.

Frekvenca zvoka določa višino zvoka, ki ga slišimo, kar v mnogih primerih ustreza tonom na glasbeni lestvici (srednji C oziroma C¹ ima frekvenco 262 Hz). Oktava označuje frekvenčni razpon med tonom (zvokom) z eno frekvenco in tonom (zvokom) z dvojno frekvenco. Frekvenčni razpon človeškega sluha je precej širok, običajno sega od približno 20 Hz do 20 kHz, kar zajema približno deset oktav. Zvoki, ki jih zaznavamo v vsakdanjem življenju, so povečini sestavljeni iz mešanice številnih frekvenc, ki nastanejo iz različnih virov (izvorov). Zvok postane hrup, ko je nezaželen in moteč. Ali je zvok zaznan kot hrup, je odvisno od posameznikovega odziva na subjektivne dejavnike, kot sta jakost zvoka in njegovo trajanje. [19]

4.4.2 Jakost zvoka in zvočnega tlaka

Pri obravnavi zvoka moramo ločiti med stopnjo jakosti (moči) zvoka in ravno zvočnega tlaka. Jakost zvoka je lastnost izvora zvoka, ki oddaja zvok z neko skupno akustično jakostjo, medtem ko je raven zvočnega tlaka lastnost zvoka na določenem mestu opazovalca. Le to lahko na željenem mestu izmerimo z uporabo mikrofona.

Človeško uho se odziva na zelo širok razpon zvočnih tlakov (razmerje 10^5 ali več za normalno osebo), zato je uporaba zvočnega tlaka neprimerna količina za prikaz v grafih in tabelah. Dodatno pa se človeško uho ne odziva linearno na spremembo amplitude zvočnega tlaka, zato se za prikazovanje uporablja logaritemska lestvica jakosti zvoka in zvočnega tlaka v dB.

Jakost (moč) zvoka L_P , ki jo oddaja izvor zvoka, lahko v enotah dB določimo po enačbi:

$$L_P = 10 \log_{10}(W/W_0) \quad (4.3)$$

kjer je W moč izvora zvoka in W_0 referenčna zvočna moč ($\approx 10^{-12}$ W).

raven zvočnega tlaka L_T v enotah dB pa lahko določimo po enačbi:

$$L_T = 20 \log_{10}(p/p_0) \quad (4.4)$$

kjer je p trenutni zvočni tlak in p_0 referenčni zvočni tlak ($\approx 20 \times 10^{-5}$ Pa).

V preteklosti so z vetrnimi turbinami povezovali predvsem zvok nizkih frekvenc. Tega definiramo kot zvok, ki je blizu spodnje meje človeškega zaznavanja (10–100 Hz), ali kot infrazvok, kadar je pod običajno mejo človeškega zaznavanja.

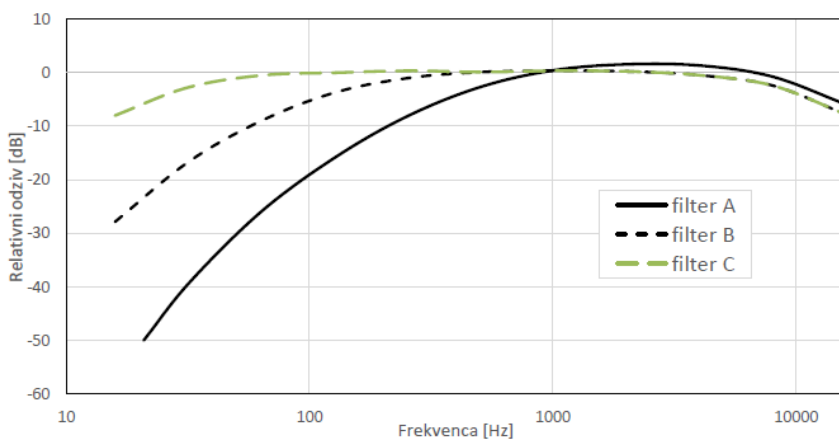
Infrazvok je zvok z zelo nizko frekvenco, pod 20 Hz, kar je pod običajnim pragom slišnosti človeškega ušesa. Čeprav ljudje običajno ne slišimo infrazvoka, ga lahko zaznavamo kot občutek tlaka, vibracije ali nelagodje, in lahko ima različne učinke na človeka in okolje. Infrazvok je vedno prisoten v okolju in izvira iz številnih virov, kje so npr. turbulenca okoliškega zraka, prezračevalni sistemi, valovanje, promet, letala ali druge človeške dejavnosti, kjer se uporabljajo stroji. Naravni viri infrazvoka so vulkanski izbruhi, potresi, veter, valovanje morja in nekatere živali (sloni, kitji). Infrazvok ima zelo dolge valovne dolžine, ki lahko presegajo več deset metrov. Značilnost infrazvoka je tudi, da ima nižjo raven disipacije, kar pomeni, da se širi dlje kot zvok višjih frekvenc. Zaradi velikih valovnih dolžin je včasih težko določiti smer, s katere prihaja infrazvok. [19]

Ljudje primarno zaznamo infrazvok kot nek nadležen, moteč zvok, ki pri nekaterih ljudeh povzroči občutke nelagodja, tesnobe, omotice ali glavobol. Stopnja nadležnosti je odvisna od intenzivnosti infrazvoka, njegovega trajanja, nihanja, periodičnosti itd. Dolgotrajna izpostavljenost infrazvoku lahko pri nekaterih ljudeh moti spanec in povzroči utrujenost.

Za zvok na splošno velja, da je prag bolečine za človeško uho pri približno 200 Pa, kar ustreza jakosti zvočnega tlaka 140 dB.

4.4.3 Meritve zvoka

Raven zvočnega tlaka se določa z uporabo mikrofонов. Ti pretvarjajo tlačna nihanja zvočnega tlaka v napetostni signal, ki ga nato merilnik zabeleži in poda v decibelih. Pri meritvah zvoka moramo upoštevati, da lahko v realnih razmerah izven laboratorija zaznamo spremembe ravni zvoka višje od 3 dB, v laboratoriju pa spremembe višje od 1 dB. Opazen odziv okolice je dosežen pri spremembi ravni zvoka za 5 dB, medtem ko se sprememba za 10 dB subjektivno zazna kot podvojitev glasnosti, ki lahko povzroči negativen odziv.



Slika 4.10: Definicija zvočnih filtrov.

Pri meritvah ravni zvočnega tlaka z mikrofonom zajamemo celoten, širokopasoven spekter frekvenc. Za določitev frekvenc, na katere se odziva človeško uho, so merilniki zvoka po navadi opremljeni s filtri, ki zmanjšajo težo nižjim frekvencam. Človeško uho namreč ne zaznava vseh frekvenc zvoka enako, zato so ti filtri razviti za različne vrste meritev, da omogočijo natančnejšo oceno zvočnih ravni v skladu s človekovo zaznavo. Filtre označimo s črkami A, B in C (slika 4.10).

Filtri zvoka A, B in C, prikazani na sliki 4.10, so standardizirani korekcijski filtri, ki se uporabljajo pri merjenju zvoka (hrupa), da se izmerjeni rezultati bolj približajo občutljivosti človeškega ušesa na različne frekvence. Najpogosteje se uporablja filter

A, ki zmanjšuje vrednosti nižjih (pod 250 Hz) in višjih (nad 16k Hz) frekvenc, saj jih človeško uho zaznava kot manj glasne. Filter A je bil v osnovi zasnovan tako, da posnema občutljivost človeškega ušesa pri zmernih glasnostih okolice (50 dB). V sedanjem času se ta filter uporablja za določanje jakosti zvoka iz okolja in v industrijskih okoljih. Rezultati jakosti zvoka, pridobljeni z uporabo filtra A, so pogosto označeni z enoto dB(A) ali dBA. Filtra B in C sta zasnovana za uporabo v glasnejših okoljih, kjer je odzivnost človeškega ušesa drugačna. Lastnost teh dveh filtrov je, da ne zmanjšata vrednosti nižjih frekvenc tako močno, kot jih filter A. Uporabimo lahko tudi filter, ki je posebej zasnovan za infrazvok, in ga označimo z G.

Iz meritev ravni zvočnega tlaka skozi daljše časovno obdobje lahko dobimo statistične opise zvoka, iz katerih lahko določimo ravni zvoka v 10 % časa, 50 % časa ali 90 % časa, določimo lahko povprečno raven zvočnega tlaka ali dnevno-nočno raven zvočnega tlaka.

4.4.4 Mehanizmi hrupa vetrnih turbin

Pri delovanju vetrnih turbin se lahko pojavijo štiri vrste hrupa:

- Hrup diskretnih frekvenc. Povzročajo ga posamezne komponente vetrnih turbin (npr. zobniški pari).
- Širokopasoven hrup. Gre za hrup z neprekinjeno distribucijo zvočnega tlaka z več frekvencami nad 100 Hz. Ta hrup se pogosto zaznava kot šum-šumenje ali šuštenje. Povzroča ga interakcija lopatic vetrnih turbin z okolico.
- Nizkofrekvenčni hrup. V tem primeru gre za hrup, ki ima frekvence v območju med 20 in 100 Hz. Pojavlja se, ko lopatice rotorja naletijo na lokalne motnje (npr. vrtinec) v zraku, ki nastanejo kot posledica toka zraka okoli stebra ali drugih predmetov v okolici.
- Impulzni hrup. Za to vrsto hrupa so značilni kratki akustični impulzi, ki spreminjajo amplitudo po času. Tudi tega lahko povzročajo interakcije rotorskih lopatic z motnjami v toku zraka ali vklopom zavor oziroma regulacije naklonskega kota lopatic.

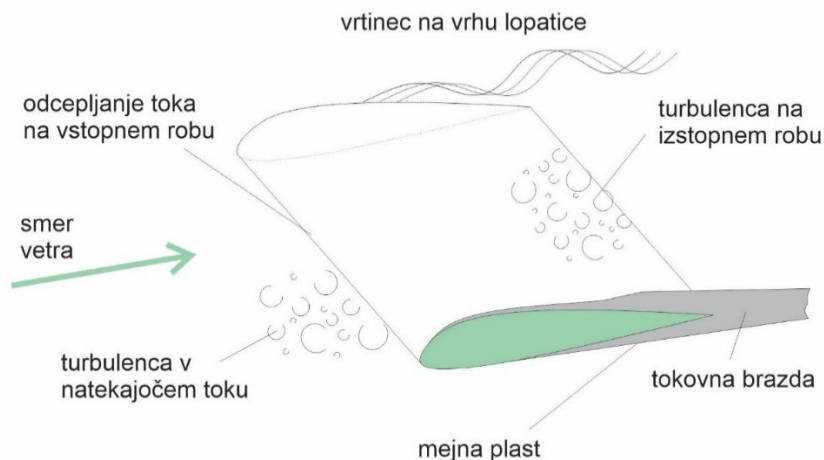
Izvori hrupa pri delujoči vetrni turbini se lahko razdelijo na dve kategoriji, aerodinamično in mehansko. Aerodinamični hrup nastane s tokom zraka preko rotorskih lopatic, medtem ko mehanski hrup izvira iz menjalnika, generatorja ipd.

Mehanski hrup se lahko od izvora prenaša tudi po konstrukciji turbine in se nato oddaja iz njenih površin v okolico. Razumevanje predstavljenih vrst hrupa in njihovega izvora je ključno za učinkovito zmanjšanje ravni hrupa vetrnih turbin.

4.4.5 Aerodinamični hrup

Na nastanek aerodinamičnega hrupa vpliva tok zraka okoli rotorskih lopatic turbine (slika 4.11). Gre za širokopasovno vrsto hrupa, ki v naravi predstavlja največji vir hrupa vetrnih turbin. Pri delovanju vetrne turbine v zelo turbulentnih pogojih lahko nastaja tudi nizkofrekvenčni hrup oziroma impulzni hrup, če se v toku zraka pojavljajo motnje kot npr. posledica toka zraka okoli stebra.

Količina aerodinamičnega hrupa se povečuje z višanjem hitrosti, zato se ga največ proizvede pri večjih hitrostih zraka.



Slika 4.11: Mehanizmi nastanka aerodinamičnega hrupa na rotorskih lopaticah vetrnih turbin.

Različni mehanizmi nastanka aerodinamičnega hrupa na rotorskih lopaticah, prikazani na sliki 4.11, so hrup zadnjega roba profila lopatice (trailing edge), hrup konice lopatice, hrup zaradi odcepitve toka od površine lopatice, hrup zaradi prehoda iz laminarnega v turbulentni tok in hrup zaradi toka preko ne uniformne površine lopatic (izvrtine, vijaki ...). Z uporabo različnih oblik lopatic se določenim oblikam hrupa lahko izognemo ali jih občutno zmanjšamo. Najpomembnejša je

oblika profila lopatic. Z njeno optimizacijo lahko vplivamo na zmanjšanje nastanka turbulence in izboljšanje aerodinamične učinkovitosti. Nadzor hitrosti vrtenja lahko tudi pomembno vpliva na zmanjšanje hrupa vetrnih turbin. Nazadnje pa lahko na hrup vplivamo tudi z ustrezno postavitvijo vetrne turbine, kjer poskrbimo, da rotorske lopatice ne prehajajo skozi motnje v toku zraka, ki jih lahko povzroči tok zraka mimo stebrov ali kakšnih drugih ovir v okolici vetrne turbine. Podrobna obravnava posameznega mehanizma nastanka aerodinamičnega hrupa presega obseg tega dela. [19]

4.4.6 Mehanski hrup

Mehanski hrup izhaja iz gibanja mehanskih komponent vetrnih turbin in dinamičnega odziva, ki ga povzroča. Glavni viri takega hrupa so:

- menjalnik,
- generator,
- pogoni regulacije za vrtenje lopatic,
- ventilatorji hladilnikov,
- hidravlični pogoni in
- druga pomožna oprema.

Vrtenje predstavljenih mehanskih komponent je ponavadi dokaj konstantno, zato ima hrup, ki ga proizvajajo, enake frekvence (hrup diskretnih frekvenc). Ni pa vedno tako, saj lahko določene komponente oddajajo tudi hrup s širokim spektrom frekvenc. Nastali zvok se na okolico prenaša preko dveh mehanizmov. Lahko se od izvora neposredno širi na okolico po zraku (air-borne noise) ali pa se prenese na konstrukcijo turbine, ki nato oddaja zvok v okolico (structure-borne noise). Mehanski hrup vetrnih turbin lahko zmanjšamo z uporabo posebnih zaščitnih nanosov površin zobnikov, z uporabo počasi vrtečih se ventilatorjev hladilnih sistemov, z uporabo vibracijskih blažilnikov, zvočnih pregrad, izolacijo ohišja strojnice ter splošno preprečitvijo širjenja zvoka po konstrukciji vetrne turbine (uporaba dušilnih elementov).

4.4.7 Določitev hrupa

Napoved jakosti hrupa vetrne turbine pri pričakovanih obratovalnih pogojih vetrne turbine za izbrano lokacijo je zelo pomembna pri umeščanju vetrnih turbin v okolje. Takšna napoved pa ni enostavna in je lahko zelo obsežna. Uporaba izkustvenih enačb za napoved jakosti hrupa ne poda zmeraj natančnih rezultatov, saj tehnologije za zmanjšanje hrupa nenehno izboljšujejo delovanje vetrnih turbin in nižajo raven hrupa. V osnovi se za določitev jakosti hrupa posamezne vetrne turbine uporabljajo trije analitični modeli. Model prve stopnje (class 1), enačba (4.5), je najenostavnejši in omogoča zelo poenostavljeno določitev jakosti hrupa vetrne turbine $L_{P(A)}$ z enoto dB(A).

$$L_{P(A)} = 10(\log_{10} P_{WT}) + 50 \quad (4.5)$$

kjer $L_{P(A)}$ predstavlja stopnjo jakosti hrupa izvora z upoštevanjem lastnosti frekvenčnega filtra A, P_{WT} pa predstavlja nazivno moč turbine v enotah W .

Model druge stopnje (class 2) pri izračunu upošteva (vsebuje) tri mehanizme nastanka hrupa (aerodinamični, nizkofrekvenčni in impulzni), enačba (4.6).

$$L_{P(A)} = 22(\log_{10} D) + 72 \quad (4.6)$$

kjer D predstavlja premer rotorja vetrne turbine v metrih m .

Model tretje stopnje (class 3) upošteva pri izračunu jakosti hrupa vetrne turbine mehanizme nastanka zvoka, ki so povezani z geometrijo rotorja in aerodinamiko. Zapisan je z enačbo (4.7).

$$L_{P(A)} = 50(\log_{10} v_T) + 10(\log_{10} D) - 4 \quad (4.7)$$

kjer v_T predstavlja hitrost konice lopatice vetrne turbine v m/s .

V primeru polja vetrnih turbin je v izračunu jakosti hrupa treba upoštevati več virov zvoka. Intuitivno bi pričakovali, da podvojeno število vetrnih turbin na določeni lokaciji podvoji jakost hrupa, vendar ni tako zaradi logaritemske lestvice zvoka. Jakost zvočnega tlaka hrupa dveh vetrnih turbin lahko izračunamo z uporabo

enačbe (4.8), medtem ko lahko jakost zvočnega tlaka hrupa za več turbin izračunamo z uporabo enačbe (4.9).

$$L_{T,total} = 10 \log_{10} (10^{L_{T1}/10} + 10^{L_{T2}/10}) \quad (4.8)$$

$$L_{T,total} = 10 \log_{10} \sum_{i=1}^N 10^{L_{Ti}/10} \quad (4.9)$$

kjer $L_{T,total}$ predstavlja skupno raven zvočnega tlaka, L_{Ti} pa raven zvočnega tlaka posamezne vetrne turbine.

Na splošno velja, da dodaten vir hrupa oziroma dodatna vetrna turbina z enako jakostjo zvočnega tlaka dvigne raven hrupa za 3 dB in da je v primeru absolutne razlike jakosti hrupa dveh izvorov, ki je večja od 15 dB, dodatek nižje vrednosti hrupa zanemarljiv.

4.4.8 Širjenje hrupa vetrnih turbin

Poznavanje mehanizmov širjenja zvočnih valov je ključno, da lahko določimo raven zvočnega tlaka na izbrani oddaljenosti od izvora z znano jakostjo. V primeru obravnave posamezne vetrne turbine lahko predpostavimo točkovni izvor zvoka, ki se v okolico širi sferično (v vse smeri enakomerno). Tako lahko pri izračunu upoštevamo, da se raven zvočnega tlaka zmanjša za 6 dB v primeru podvojitve oddaljenosti. Če je izvor zvoka na popolnoma ravni površini z dobro odbojnostjo, moramo predpostaviti hemisferično (polkrogelno) širjene zvoka, ki vodi do zmanjšanja za 3 dB v primeru podvojitve oddaljenosti.

Dodatno je treba pri določanju ravni zvočnega tlaka upoštevati tudi učinek absorpcije zvoka s strani atmosfere (zraka) in učinek vpliva tal (koeficient odboja). Oba učinka sta odvisna od frekvence izvora zvoka in oddaljenosti opazovalca od izvora. Na raven zvočnega tlaka pa vpliva tudi oddaljenost izvora od tal. Ker so izvori zvoka pri vetrnih turbinah ponavadi dokaj visoko, odboj zvoka nima velikega vpliva. Ima pa na določitev ravni zvočnega tlaka pomemben vpliv veter, ki lahko povzroči velike razlike med ravno zvočnega tlaka v smeri pihanja vetra in v nasprotni smeri.

Razvoj natančnih modelov za izračun širjenja hrupa mora tako vsebovati:

- lastnosti izvora (višina, usmerjenost ipd.),
- oddaljenost od izvora,
- absorpcija s strani atmosfere,
- vpliv tal (odboj, lastnosti tal ipd.),
- širjenje zvoka po zahtevnem (razgibanem) terenu in
- vpliv vremena oziroma okolice (veter, spremembe temperature ipd.).

V nadaljevanju predstavljamo enostaven model, ki omogoča določitev ravni zvočnega tlaka pri predpostavki hemisferičnega širjenja zvoka preko odbojne površine z upoštevanje absorpcije atmosfere (zraka).

$$L_T = L_P - 10 \log_{10}(2\pi R^2) - \alpha R \quad (4.10)$$

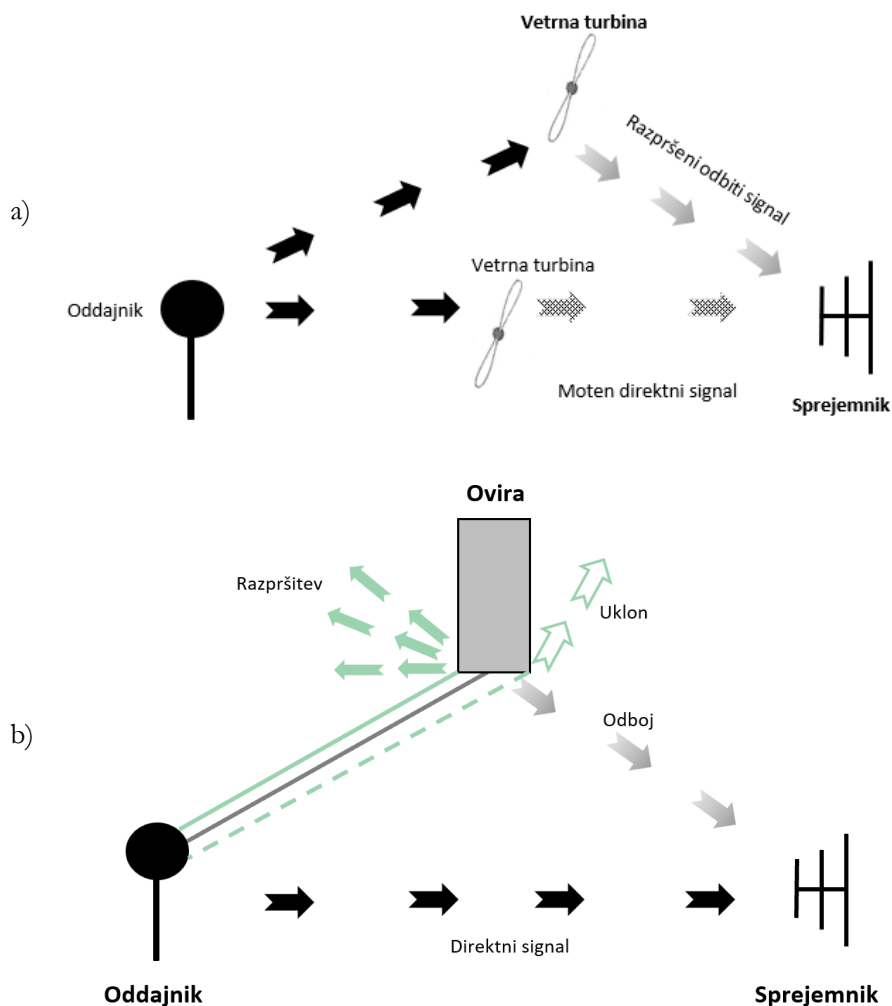
kjer je L_T raven zvočnega tlaka v enotah dB na oddaljenosti R od izvora zvoka z jakostjo moči zvoka L_P , α pa je koeficient absorpcije zvoka v zraku, odvisen od frekvence. Za izvore zvoka širokega spektra lahko uporabimo vrednost koeficienta absorpcije zvoka v zraku $\alpha = 0,005 \text{ dB (A) m}^{-1}$.

4.5 Vpliv vetrnih turbin na elektromagnetno interferenco

Elektromagnetna interferenca (EMI) je elektromagnetna motnja, ki lahko prekine, ovira ali poslabša učinkovitost delovanja elektronike in električne opreme. Vetrne turbine imajo zaradi svoje velikosti in vrtenja rotorja potencial, da motijo elektromagnetne signale, ki so del širokega spektra sodobnih komunikacijskih sistemov. Pri njihovi postavitvi moramo skrbno oceniti morebitne motnje zaradi elektromagnetne interference. Do težav prihaja, saj so lokacije za postavitev vetrnih turbin in lokacije, ki omogočajo dobre koridorje komunikacijskim signalom, pogosto enake (hribi in grebeni). Sistemi, ki jih lahko prizadenejo motnje zaradi elektromagnetne interference, in njihove frekvence delovanja vključujejo VHF radijske signale (30–300 MHz), UHF televizijske signale (300 MHz–3 GHz) in mikrovalovne signale (1–30 GHz). Do težav pa lahko pride tudi pri interakciji vetrnih turbin s signali radarjev.

Težave lahko nastanejo tudi pri delovanju vetrnih turbin oziroma njenih komponent. Električni generator in pripadajoča regulacijska oprema ter elektronika lahko proizvajajo radiofrekvenčne emisije, ki se oddajajo v okolico. Te emisije je mogoče dobro obvladovati z ustrezno disipacijo na ohišju generatorja in/ali strojnice.

4.5.1 Vpliv na širjenje signalov



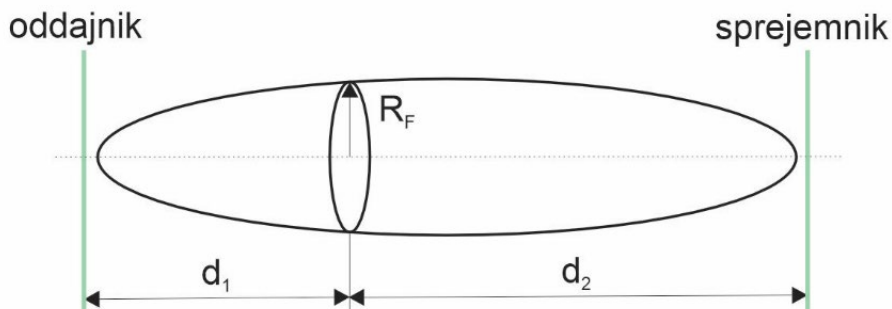
Slika 4.12: Vpliv vetrnih turbin na širjenje signala in elektromagnetno interferenco.

Postavitev vetrne turbine lahko vpliva na motnje v direktnem signalu, ki se širi od oddajnika do sprejemnika, ali pa postavitev vetrne turbine vpliva na razpršitev oziroma odboj signala (slika 4.12 a).

Razpršitev signala, ki ga oddajajo oddajniki, na več odbitih signalov, predstavlja največji problem pri obravnavi vpliva vetrnih turbin na elektromagnetno interferenco. Signal, ki zadene rotorsko lopatico ali kateri drugi del vetrne turbine, se lahko razprši in usmeri svojo energijo v več smeri. To prostorsko porazdelitev signala imenujemo razpršitev. Signal pa se lahko od rotorske lopatice tudi odbije ali pa se na njeni površini ukloni. Vsi trije mehanizmi so prikazani na sliki 4.12 b.

V praksi se je izkazalo, da imata največji vpliv na elektromagnetno interferenco konstrukcijski material lopatic in rotacijska hitrost rotorja.

Pri mikrovalovnih signalih mora biti med oddajnikom in sprejemnikom čista linija, treba pa je poskrbeti, da znotraj prve Fresnelove cone ni postavljenih morebitnih ovir (slika 4.13). Fresnelova cona predstavlja 3D-prostor eliptične oblike med oddajnikom in sprejemnikom, ki je sestavljen iz posameznih elipsoidov različnih radijev.



Slika 4.13: Shematski prikaz radija prve Fresnelove cone med oddajnikom in sprejemnikom.

Radij prve Fresnelove cone na izbrani lokaciji med oddajnikom in sprejemnikom se lahko izračuna z uporabo enačbe:

$$R_F = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (4.11)$$

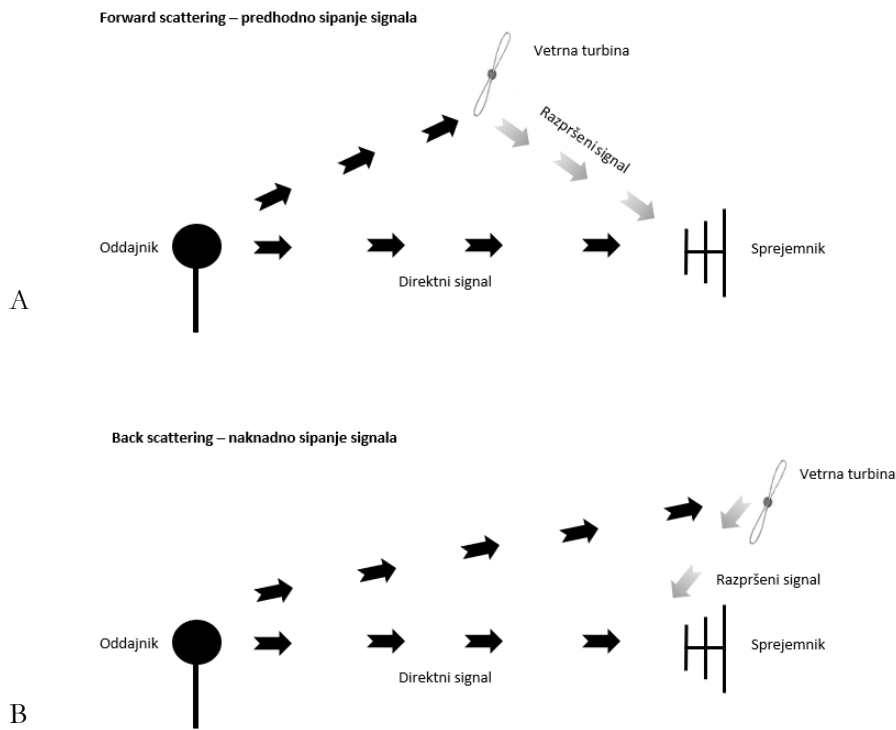
kjer sta d_1 in d_2 oddaljenosti sprejemnika in oddajnika od obravnavane točke.

Za postavitev vetrnih turbin se s stališča interference svetuje, da se postavijo dodatnih 200 do 500 m izven prve Fresnelove cone. Tako naj bi se najbolj učinkovito izognili morebitnim odbojem. Pri obravnavanju signalov UHF se predvideva, da ne bo vpliva na sprejem signala, če bo vetrna turbina postavljena izven 60° kota relativne smeri sprejemnika. Znotraj $15\text{--}60^\circ$ kota se predvideva manjši vpliv na sprejem signala, ki pa ga je mogoče izničiti z uporabo namenske antene. Če je kot manjši od 15° , se pričakujejo večje težave (motnje).

4.5.2 Modeliranje in napoved EMI zaradi vetrnih turbin

Pri napovedi elektromagnetne interference zaradi postavitve in delovanja vetrnih turbin se predpostavljata dva temeljna mehanizma nastanka EMI. Če pride do odboja ali razpršitve oddanega signala na vetrni turbini, ki je postavljena pred sprejemnikom, imenujemo to predhodno sipanje signala (FS), kot kaže slika 4.14 a. Če pride do odboja ali razpršitve na vetrni turbini, ki je postavljena za sprejemnikom, imenujemo to naknadno sipanje signala (BS), kot je razvidno s slike 4.14 b. Pri televizijskih signalih povzroča FS bledenje slike, ki sovпада z vrtilno hitrostjo rotorja turbine, medtem kot BS povzroča dvojno sliko zaradi časovnega zamika med oddanim signalom in odbitim/razpršenim signalom.

V nadaljevanju predstavljamo poenostavljen model napovedi EMI zaradi vetrnih turbin, ki so ga na podlagi modela van Katsa and van Reesa leta 1996 zapisali Moglia, Trusszi in Orsenigo. [19]



Slika 4.14: Mehanizma EMI vetrnih turbin z radijskim signalom.

Enačba 5.12 nam omogoča izračun uporabnega prejetega signala C

$$C = P_T - A_{TR} + G_{TR} \quad (4.12)$$

kjer P_T predstavlja moč oddajnika v dB, A_{TR} predstavlja oslabitev signala med oddajnikom in sprejemnikom, G_{TR} pa dobitek antene sprejemnika v smeri zahtevanega signala v enoti dB. Signal motnje I je podan z enačbo:

$$I = P_T - A_{TW} + 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda^2} \right) - A_{WR} + G_{WR} \quad (4.13)$$

kjer A_{TW} predstavlja oslabitev signala med oddajnikom in vetrno turbino v dB, A_{WR} je oslabitev signala med vetrno turbino in sprejemnikom v dB, G_{WR} predstavlja dobitek antene v smeri odbitega signala v dB, $10 \log_{10}(4\pi\sigma/\lambda^2)$ predstavlja prispevek k sipanju vetrne turbine v dB in σ predstavlja prerez radarja. V primeru vetrnih turbin σ predstavlja efektivno površino vetrne turbine. Ta je funkcija

geometrije vetrne turbine in njenih dielektričnih lastnostih skupaj z valovno dolžino signala λ . Iz zgornjih enačb lahko dobimo razmerje med uporabnim signalom in motnjo kot:

$$\left(\frac{C}{I}\right) = A_{TW} - 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda^2}\right) + A_{WR} - A_{TR} + G_{TR} - G_{WR} \quad (4.14)$$

Predpostavimo, da je razdalja med oddajnikom in sprejemnikom veliko večja kot razdalja med vetrno turbino in sprejemnikom, označena z s , takrat velja $A_{TW} = A_{TR}$. Nadalje predpostavimo, da je oslabitev signala med vetrno turbino in sprejemnikom $A_{WR} = 4\pi r/\lambda$. Definiramo še diskriminacijski faktor antene, ki opisuje sposobnost antene, da razlikuje med signalom, ki prihaja iz želene smeri (od oddajnik), in signalom, ki prihaja iz drugih smeri (vetrne turbine), kot $\Delta G = G_{TR} - G_{WR}$. Tako se enačba za razmerje med uporabnim signalom in motnjo poenostavi v:

$$\left(\frac{C}{I}\right) = 10 \log_{10} 4\pi + 20 \log_{10} s - 10 \log_{10} \sigma + \Delta G \quad (4.15)$$

Iz enačbe 4.15 vidimo, da lahko razmerje med uporabnim signalom in motnjo izboljšamo s povečanjem razdalje med vetrno turbino in sprejemnikom s , z zmanjšanjem površine radarja (efektivne površine vetrne turbine) σ in z izboljšanjem diskriminacijskega faktorja antene ΔG . Enačbo 4.15 lahko preoblikujemo v enačbo 4.16 in tako dobimo enačbo za izračun območja, kamor se odsvetuje postavitve vetrne turbine, če želimo ohraniti željeno razmerje med uporabnim signalom in motnjo $\left(\frac{C}{I}\right)_{req}$:

$$20 \log_{10} s = \left(\frac{C}{I}\right)_{req} + 10 \log_{10} \sigma - \Delta G - 11 \quad (4.16)$$

Iz enačbe 4.16 vidimo, da je kritični parameter, ki vpliva na odvisnost dimenzij območja kamor se odsvetuje postavitve vetrne turbine, površina radarja (efektivna površina vetrne turbine) σ . Obstaja več pristopov, kako izračunati σ . Za kovinski valj se svetuje uporaba enačbe 4.17:

$$\sigma = \frac{2\pi b L^2}{\lambda} \quad (4.17)$$

kjer b predstavlja radij valja v m in L njegovo dolžino (višino) v m. Za pravokotno kovinsko ploščo se svetuje uporaba enačbe 4.18:

$$\sigma = \frac{4\pi l^2 L^2}{\lambda} \quad (4.18)$$

kjer l predstavlja debelino plošče v m.

Predlaga se, da se v izračunu območja, nastalega zaradi BS, upošteva samo kovinske dele lopatic vetrnih turbin oziroma njihove dimenzije. Za izračun območja FS pa je treba upoštevati celotno površino lopatic rotorja turbine. Enačba 4.19 predstavlja pogosto uporabljen model za izračun površine radarja:

$$10 \log_{10} \sigma = 20 \log_{10} \left[\frac{A_L X(\alpha)}{\lambda} \right] + 11 - B \text{ (dBm}^2\text{)} \quad (4.19)$$

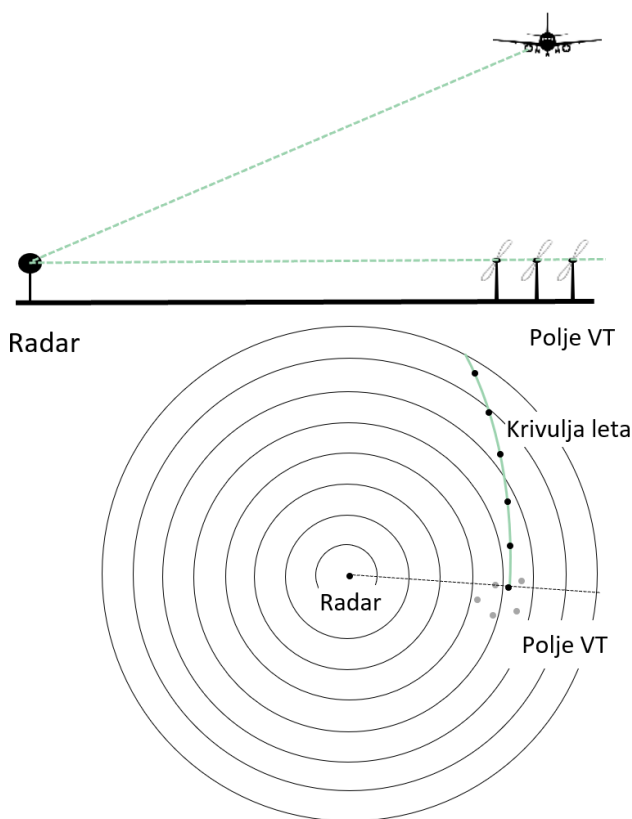
kjer A_L predstavlja površino ene lopatice v m² in $X(\alpha)$ je funkcija, ki opisuje amplitudo razpršenega signala v smeri α . Kalibracijska konstanta, ki zajema korekcijo zaradi materiala in oblike lopatic, je označena z B . Pogosto uporabljena vrednost za B je 15 dB.

4.6 Vpliv na letalski promet

Vetrne turbine lahko vplivajo na letalski promet na dva načina. Prvi je možnost trka letal z rotorskimi lopaticami ali katerimi drugimi komponentami vetrnih turbin, drugi pa interferenca radarskih sistemov. Pri postavitvah vetrnih turbin v okolico letališča je tako potrebna posebna previdnost ter upoštevanje potrebnih oddaljenosti in cone, kjer se vetrne turbine lahko postavijo. Te so odvisne od orientacije letaliških stez, pristajalnih koridorjev ipd.

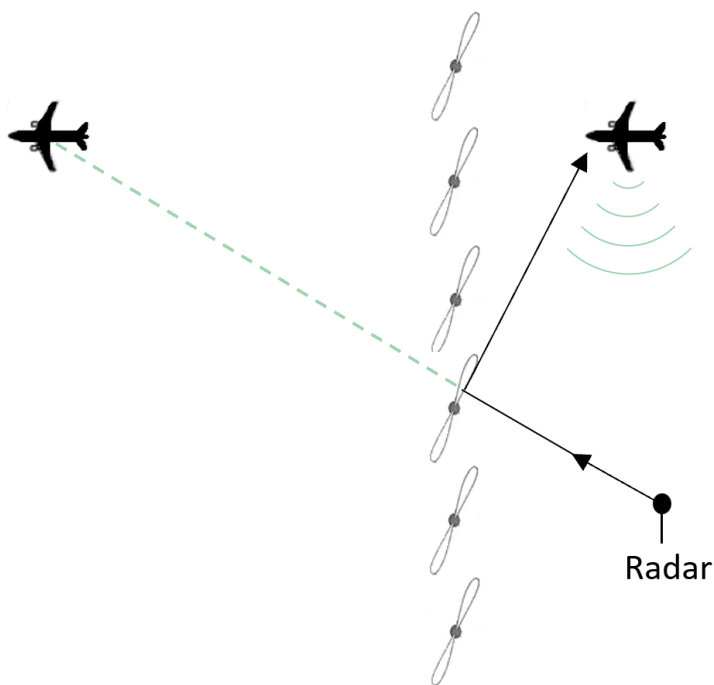
Interferenca radarskih sistemov je veliko bolj verjetna kot trk letala z vetrno turbino. Pri vplivu vetrnih turbin na delovanje radarskih sistemov prihaja do razlik glede na vrsto radarja in njegovo delovanje. Primarni nadzorni radar (primary surveillance radar) deluje na principu zaznavanja odmeva. Rotirajoča antena oddaja signal, ki se nato odbije od letala. Odbite signale zazna antena kot odmev, ki ga nato analizira na podlagi časa potovanja signala in kota odboja ter s tem določi obliko, smer, velikost in lokacijo (koordinate) letala. Težava nastane pri obdelavi signala, saj sistem ne

zmore enostavno določiti oziroma razbrati višine predmeta nad tlemi. Tako lahko radarski sistem odbite signale od visokih objektov (npr. vetrnih turbin) zamenja za letalo (slika 4.15). Na radarski sliki tako sočasno vidimo vetrne turbine in letalo, kar otežuje sledenje poti letenja letala. Težave se lahko odpravijo z maskiranjem območij, kjer so vetrne turbine, vendar s tem izgubimo pokritost območja z radarskim signalom. Težavam pa se lahko izognemo že pri načrtovanju postavitve vetrnih turbin, kjer lahko iz ustreznih 3D virtualnih modelov reliefov pokrajine razberemo lokacije, kjer bodo vetrne turbine zakrite z reliefom pokrajine in do odboja radarskega signala ne bo prišlo. Nazadnje obstaja tudi možnost prekritja površine rotorskih lopatic z materialom, ki absorbira radarski signal in tako preprečuje njegov odboj (oziroma ga izniči). [13]



Slika 4.15: Vpliv vetrnih turbin na delovanje primarnih radarskih sistemov.

Drugi tip radarjev, ki se uporablja za nadzor letalskega prometa, so sekundarni nadzorni radarji (secondary surveillance radar). Pri teh radarji pošilja rotirajoča antena v okolico »zasliševalni« signal, ki ga zazna oddajnik na letalu. Ta nato odgovori tako, da posreduje podatke o letalu, njegovo višino ipd. V tem primeru lahko nastanejo težave, če poslani »zasliševalni« signal zadene v rotor vetrne turbine in se odbije oziroma odkloni v smeri drugega letala. Tako radarski sistem ne bo dobil podatkov od želenega letala oziroma se lahko eno letalo na zaslonu radarja hkrati pojavi na dveh lokacijah (slika 4.16). Motnje odbitih signalov teh radarskih sistemov je mogoče odpraviti s filtri. [13]



Slika 4.16: Vpliv VT na delovanje sekundarnih radarskih sistemov.

4.7 Svetlobni vpliv vetrnih turbin na zdravje ljudi

Svetlobni vpliv vetrnih turbin se lahko pojavi v obliki stroboskopskega učinka senc, ki jih povzroča vrtenje rotorskih lopatic, ko je sonce za turbino. Te sence lahko povzročijo nezaželene učinke pri ljudeh, ki se nahajajo v stavbah, izpostavljenim

takšnim stroboskopskim učinkom. Frekvence utripanja, ki lahko povzročajo nezaželene učinke pri ljudeh, so med 2,5 in 20 Hz. Učinek na ljudi je podoben tistemu, ki ga povzročajo spremembe intenzivnosti svetlobe žarnice zaradi nihanj napetosti v omrežju zaradi vetrne turbine. Pri senčnem utripanju je glavna skrb variacija svetlobe pri frekvencah 2,5–3 Hz, ki lahko v skrajnem primeru pri zelo občutljivih ljudeh povzročajo elektroencefalografske reakcije (npr. fotosenzitivno epilepsijo). Višje frekvence med 15 in 20 Hz lahko v skrajnem primeru povzročijo epileptične napade. [19, 23]

Velike sodobne turbine se vrtijo s takšnimi vrtljaji, ki načeloma povzročajo frekvenc nižje od 2,5 Hz in so tak pod kritično frekvenco. Ne glede na to pa se svetuje, da je minimalna oddaljenost vetrnih turbin od najbližjih zgradb med 6 in 10 premerov rotorjev turbine. Takšna oddaljenost naj bi v primeru morebitnih svetlobnih motenj skrajšala njihov čas v dnevu. Če stroboskopskega učinka ni mogoče popolnoma izničiti in je njegov vpliv zelo moteč, se svetuje, da v času tega pojava vetrna turbina ne deluje.

Drug učinek svetlobe je njen odboj od gladkih površin rotorskih lopatic ali drugih delov. Učinek svetlobnega odboja je bil opažen predvsem v severni Evropi zaradi njene zemljepisne širine in nizkega kota sončne svetlobe v zimskem času. Učinkovita rešitev za preprečevanje svetlobnega odboja je uporaba mat premazov na lopaticah vetrnih turbin.

Literatura

- [1] Statistični urad Republike Slovenije (SURS), elektronski vir: <https://www.stat.si/StatWeb/News/Index/12860>, dostop: 31. 5. 2024.
- [2] Statistični urad Republike Slovenije (SURS), elektronski vir: <https://www.stat.si/StatWeb/News/Index/12829>, dostop: 31. 5. 2024.
- [3] IEA (2021), Hydropower Special Market Report, elektronski vir: <https://www.iea.org/reports/hydropower-special-market-report>, dostop: 25. 2. 2025.
- [4] Republika Slovenija, Vlada Republike Slovenije. Posodobljeni celoviti nacionalni energetske in podnebni načrt Republike Slovenije, Ljubljana, december 2024.
- [5] Republika Slovenija, elektronski vir: <https://www.gov.si teme/obnovljivi-viri-energije/>, dostop: 6. 9. 2022.
- [6] Republika Slovenija, Ministrstvo za infrastrukturo. Celovit pregled potencialno ustreznih območij za izkoriščanje vetrne energije, Strokovna podlaga za prenovi Akcijskega načrta za obnovljive vire energije (obdobje 2010–2020), Aquarius, Ljubljana, avgust 2015.
- [7] J. Senegačnik, B. Drobniak, Obča geografija za 1. letnik gimnazij, Modrijan založba, Gorenja vas, 2002.
- [8] R. Gasch, J. Tvele, Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation, 2. izd., Springer, Berlin, 2012.
- [9] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi, Wind Energy Handbook, Wiley, Chichester, 2001.
- [10] IEC 61400-1, Wind turbines – Part 1: Design requirements, International Electrotechnical Commission, Ženeva, 2005.
- [11] Wikipedia, elektronski vir: https://sl.wikipedia.org/wiki/Vetrna_elektrarna_Trta-Krtolin, dostop: 29. 11. 2024.
- [12] L. Škerget. *Mehanika tekočin*, Tehniška fakulteta v Mariboru, Maribor, 1994.
- [13] Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO), Letališče Edvarda Rusjana Maribor: <https://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/diagrams/wind/letalisce-er-maribor/>, dostop: 29. 11. 2024.
- [14] I. Biluš, Hidravlični turbinski stroji 1, Univerzitetna založba Univerze v Mariboru, Maribor, 2020.
- [15] C. G. Anderson. Wind turbines theory and practice. Cambridge University press, 2020.
- [16] D. Bordjan, T. Jančar, T. Mihelič. Karta občutljivih območij za ptice za umeščanja vetrnih elektrarn v Sloveniji. Društvo za opazovanje in proučevanje ptic Slovenije, 2012.
- [17] Elektronski vir: https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:AND9GcQ0XQISOabWs3p2n_BBBzIB37Ydf9iAJINT-w&cs, dostop: 4. 12. 2024.
- [18] Wind Farm BoP, elektronski vir: <https://www.windfarmbop.com/wind-turbine-tower/>, dostop: 4. 12. 2024.
- [19] D. Denac. Študija aktivnosti bele štoklje (Ciconia ciconia) v Razdrtem z namenom izdelave strokovnega mnenja o potencialnem vplivu načrtovane vetrne elektrarne. Društvo za opazovanje in proučevanje ptic Slovenije, 2010.
- [20] U. S. Fish & Wildlife Service, elektronski vir: <https://www.fws.gov/library/collections/threats-birds>, dostop: 4. 12. 2024.

- [21] J. F. Manwell, J. G. McGowan, A. L. Rogers. WIND ENERGY EXPLAINED Theory, Design and Application, Second Edition. John Wiley & Sons, 2009.
- [22] G. Ivanov, S. Tomljenović, K. Čmelar, I. Grubišić, M. Marek. PRESENCE OF LARGE CARNIVORES IN THE IMPACT AREA OF WIND POWER PLANTS DURING OPERATION IN CROATIA. CWW, conference, 2023.
- [23] SHINNESS wind farm limited elektronski vir: <https://shinnesswindfarm.co.uk/wp-content/uploads/2024/01/Figure-5.2-Zone-of-Theoretical-Visibility-ZTV-to-Blade-Tip-with-Viewpoint-Locations-uai-1032x734.webp>, dostop: 4. 12. 2024.
- [24] SHINNESS wind farm limited elektronski vir: <https://shinnesswindfarm.co.uk/wp-content/uploads/2024/01/viewpoint-6.webp>, dostop: 4. 12. 2024.
- [25] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi. WIND ENERGY HANDBOOK. John Wiley & Sons, 2001.

VETRNE TURBINE

IGNACIJO BILUŠ, LUKA KEVORKIJAN, LUKA LEŠNIK (UR.)

Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Maribor, Slovenija
ignacijo.bilus@um.si, luka.kevorkiian@um.si, luka.lesnik@um.si

Publikacija obravnava vetrne turbine. V prvem, uvodnem poglavju so podane temeljne značilnosti oskrbe z energijo v Sloveniji in potencial za izkoriščanje obnovljivih virov s poudarkom na energiji vetra. Temu sledi poglavje o vetru v katerem je pojasnjen nastanek vetrov, značilnosti vetrov s porazdelitvijo hitrosti, vplivom reliefa in turbulence na energijo vetra. V poglavju je predstavljena metodologija za ocenjevanje razpoložljivosti vetrov in možnosti pridobivanja energije. V tretjem poglavju je podana matematična formulacija dinamike toka v konvencionalnih vetrnih turbinah s horizontalno osjo. Predstavljene so metode s katerimi je možno ovrednotiti učinkovitost energijske izmenjave in temeljni postopki za oblikovanje lopatic vetrnih turbin. V četrtem poglavju je predstavljen okoljski vidik umestitve vetrnih turbin v naravo. Obravnavan je vpliv vetrnih turbin na živali, degradacija pokrajine zaradi vizualnega vpliva in hrup, ki ga povzročajo vetrne turbine.

DOI

[https://doi.org/
10.18690/um.fs.6.2025](https://doi.org/10.18690/um.fs.6.2025)

ISBN

978-961-286-011-4

Ključne besede:

obnovljivi viri energije,
veter,
vetrna turbina,
dinamika toka,
vpliv na okolje



Univerzitetna založba
Univerze v Mariboru

DOI

[https://doi.org/
10.18690/um.fs.6.2025](https://doi.org/10.18690/um.fs.6.2025)

ISBN

978-961-286-011-4

Keywords:

renewable energy sources,
wind,
wind turbine,
flow dynamics,
environmental impact

WIND TURBINES

IGNACIJO BILUŠ, LUKA KEVORKIJAN, LUKA LEŠNIK (EDS.)

University of Maribor, Faculty of Mechanical Engineering, Maribor, Slovenia
ignacijo.bilus@um.si, luka.kevorkian@um.si, luka.lesnik@um.si

The publication addresses wind turbines. The first, introductory chapter presents the basic characteristics of energy supply in Slovenia and the potential for harnessing renewable resources, with an emphasis on wind energy. This is followed by a chapter on wind, explaining the origin of winds, wind characteristics with speed distribution, the influence of terrain and turbulence on wind energy. The chapter introduces a methodology for assessing wind availability and energy generation potential. The third chapter provides a mathematical formulation of the flow dynamics in conventional horizontal-axis wind turbines. Methods for evaluating the efficiency of energy exchange and fundamental procedures for designing wind turbine blades are presented. The fourth chapter discusses the environmental aspect of placing wind turbines in nature, including the impact of wind turbines on wildlife, landscape degradation due to visual impact, and noise caused by wind turbines.



University of Maribor Press



Univerza v Mariboru

Fakulteta za strojništvo