



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Vertikalios ašies vėjo jėgainių aerodinamikos tyrimai

Baigiamasis magistro projektas

Gediminas Monastyreckis
Projekto autorius

Doc. dr. Kazimieras Petkevičius
vadovas

Kaunas, 2018



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Vertikalios ašies vėjo jėgainių aerodinamikos tyrimai

Baigiamasis magistro projektas
Aeronautikos inžinerija (621H40001)

Gediminas Monastyreckis
Projekto autorius

Doc. dr. Kazimieras Petkevičius
Vadovas

Doc. dr. Vaidas Lukoševičius
Recenzentas

Kaunas, 2018



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Gediminas Monastyreckis

Vertikalios ašies vėjo jėgainių aerodinamikos tyrimai

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Gedimino Monastyreckio, baigiamasis projektas tema „Vertikalios ašies vėjo jėgainių aerodinamikos tyrimai“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

BAKALAURO STUDIJŲ BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS

1. Baigiamojo projekto tema

Vertikalios ašies vėjo jėgainių aerodinamikos tyrimai

Aerodynamic Analysis of a Vertical Axis Wind Turbine

2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Tikslas: atlikti vertikalios ašies vėjo jėgainių aerodinaminę analizę, siekiant gauti kuo geresnes jėgainės efektyvumo reikšmes.

Uždaviniai: ištirti jūros regiono vėjo statistiką, atlikti jėgainės efektyvumą lemiančių veiksnių tyrimą, atlikti išsamią jėgainės taikomų profilių aerodinamikos analizę, parinkti geriausias charakteristikas turintį profilį tolimesniems mentės skaičiavimams. Sukurti skaičiavimo schemą, pagal kurią bus siekiama gauti maksimalią galios kreivę, keičiant mentės pastatymo kampą, plotą ir kitus svarbius parametrus. Apskaičiuoti jėgainės galios kreivę esant skirtingoms vėjo greičio reikšmėms ir palyginti su horizontalios ašies vėjo jėgainių galios kreivėmis, esančiomis rinkoje.

3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

Darbe pateikti rezultatai turi būti tikslūs ir aiškūs, skaičiavimo schema nuosekli ir teisinga.

4. Projekto aprašomosios dalies struktūra

Techninio lygio analizė (vėjo energetikos apžvalga, vėjo jėgainių konstrukcijų apžvalga, aerodinamikos teorija), jėgainės efektyvumą lemiantys veiksniai (žemės paviršiaus šiurkštumas, vėjo energija, sparnuotės šiurkštumas, temperatūra, aerodinaminiai nuostoliai), jėgainės aerodinaminiai skaičiavimai (skaičiuojamoji schema, aerodinaminės jėgos, efektyvūs sukimosi greičiai, jėgainės geometrija, aerodinaminė analizė, apkrovos, galios kreivė).

Studentas:
(vardas, pavardė, parašas, data)

Projekto vadovas.....
(vardas, pavardė, parašas, data)

Krypties studijų programos vadovas.....
(vardas, pavardė, parašas, data)

TURINYS

IVADAS.....	11
1. TECHNINIO LYGIO ANALIZĖ	12
1.1. Vėjo energetikos apžvalga.....	12
1.1.1. Pasaulyje ir Europoje	12
1.1.2. Lietuvoje	15
1.1.3. Baltijos jūros vėjo energijos potencialas	16
1.2. Vėjo jėgainių konstrukcijų apžvalga	19
1.2.1. Horizontalios ašies vėjo jėgainės	19
1.2.2. Vertikalios ašies vėjo jėgainės	22
1.2.3. Plūduriuojančios vėjo jėgainės	23
1.2.4. Jėgainių palyginimas.....	25
1.3. Aerodinamikos teorija	28
1.3.1. Aerodinaminių charakteristikų nustatymas	28
1.3.2. Vertikalios ašies vėjo jėgainių aerodinamika	31
1.3.3. „NACA“ profilių geometrijos skaičiavimo metodika.....	34
2. JĖGAINĖS EFEKTYVUMĄ LEMIANTYS VEIKSNIAI	35
2.1. Žemės paviršiaus šiurkštumas ir aukštis.....	35
2.2. Vėjo energija Baltijos jūroje.....	37
2.3. Sparnuotės šiurkštumas ir srauto greitis	40
2.4. Temperatūros ir aukščio poveikis aerodinamikai	41
2.5. Aerodinaminiai nuostoliai	42
2.5.1. Lietaus poveikis	42
2.5.2. Bokšto aerodinaminis šešėlis	43
2.5.3. Mentės atramų pasipriešinimas.....	44
2.6. Tinklelio dydžio poveikis skaičiavimuose	45
2.7. Skaičiavimo metodo poveikis rezultatams	47

3. JĖGAINĖS AERODINAMINIAI SKAIČIAVIMAI.....	48
3.1. Pradiniai jėgainės parametrų nustatymai.....	48
3.1.1. Parametrų skaičiuojamoji schema	48
3.1.2. Aerodinaminių jėgų skaičiavimas.....	48
3.1.3. Efektyvių greičių skaičiavimas	52
3.1.4. Projektiniai jėgainės skaičiavimai	54
3.2. Aerodinaminiai tyrimai	54
3.2.1. Profilių aerodinaminė analizė	54
3.2.2. Mentės aerodinaminė analizė.....	56
3.2.3. Jėgainės aerodinaminiai parametrai.....	57
3.3. Jėgainės apkrovų skaičiavimai	58
3.4. Galios kreivės modeliavimas.....	59
IŠVADOS.....	62
INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS	63
PRIEDAI	67

Paveikslų sąrašas

1 pav. Europos energijos produkcijos scenarijus pritaikant „ <i>Primes</i> “ skaičiavimo modelį [4]	12
2 pav. Pasauliniu mastu įrengtų vėjo jėgainių augimas per pastaruosius 20 metų bei žemynų procentinis galių pasiskirstymas 2016 metais [5]	13
3 pav. Vėjo elektros energijos kainos už 1 MWh palyginimas jūroje ir sausumoje pagal „ <i>Primes</i> “ skaičiavimo modelį (a). Skirtingų gamybos šaltinių kainų palyginimas už MWh Jungtinėje Karalystėje [4, 7]	14
4 pav. Pagamintos vėjo energijos ir įrengtos jėgainių galios augimas 2006-2016 metais, Lietuvoje [9]	15
5 pav. Baltijos jūros ir gretimų krantų vidutinio metinio vėjo greičio pasiskirstymas 5.5–9.5 m/s [14] 17	
6 pav. Klaipėdos regiono santykinio vėjo greičio priklausomybė nuo atstumo iki kranto [15]	17
7 pav. Lietuvos jūrinės teritorijos povandeninių srovių stabilumas ir judėjimo greitis 0.25–0.4 m/s [16]	18
8 pav. Kabinos elementai: 1 – mentės, 2 – atakos kampo reguliatorius, 3 – įvorė, 4 – pagrindiniai guoliai, 5 – velenas, 6 – greičio dėžė, 7 – diskinis stabdis, 8 – generatorius, 9 – pokrypio mech., 10 – bokštas [19]	19
9 pav. Mentės konstrukciniai elementai [20]	21
10 pav. Bokšto konstrukcija [22]	21
11 pav. Vertikaliųjų vėjo jėgainių tipų eskizas, „ <i>Gorlov</i> “ (a), „ <i>H-tipo</i> “ (b), „ <i>Darrieus</i> “ (c) [23]	22
13 pav. Aerodinaminio profilio eskizas ir parametrai	28
14 pav. Slėgio pasiskirstymo palyginimas esant 0° (viršuje) ir 10° (apačioje) atakos kampams	29
15 pav. Keliamosios (a) ir pasipriešinimo (b) jėgų koeficientai nuo atakos kampų	30
16 pav. Profilio poliarė (a) ir profilio kokybė (b) nuo atakos kampų	30
17 pav. VVJ sukimosi aplink ašį ir srauto pasiskirstymo dedamosios, eskizas (a) [33]. Mentės ir veikiančių jėgų eskizas (b)	31
18 pav. Atakos kampo (a) ir „ C_L “ (b) pokytis mentės apsisukimo metu, esant skirtingam „ β° “ [34]	32
19 pav. Vienos mentės sugeneruojamos „ F_N “ (a) ir „ F_T “ (b) jėgos mentės apsisukimo padėtyje bei skirtingų „ <i>TSR</i> “ reikšmių palyginimas [36]	33
20 pav. Galios koeficiento priklausomybė nuo menčių skaičiaus (a) ir vientisumo parametro (b) [37] 33	

21 pav. Keturių skaitmenų „NACA 4412“ profilis ir jo geometrinės reikšmės [38]	34
22 pav. Žemės paviršiaus šiurkštumo „Roughness class“ poveikis vėjo greičiui nuo aukščio.....	36
23 pav. Vėjo greičio pasiskirstymas Lietuvos Respublikos jūrinėje teritorijoje, 1986-2016 metais	37
24 pav. Vėjo greičio pasiskirstymas, 2015-2016 metais	37
25 pav. Vėjo greičio tikimybinis pasiskirstymas. Pateikti 8 statistiniai skirstiniai 0–104 atstumu nuo kranto, Lietuvos Respublikos jūrinėje teritorijoje 1986–2016 metais	38
26 pav. Skirstinių, galios ir sugeneruotos energijos kreivės, per 30 metų laikotarpį.....	39
27 pav. Profilio „S1223RTL“ kokybės priklausomybė nuo „Re“ ir priverstinio atitrūkimo vietos „Xtr“	40
28 pav. Sparno „S1223RTL“ aerodinaminės kokybės priklausomybė nuo srauto greičio ir atitrūkimo parametro: a) $X_{tr} = 1$, b) $X_{tr} = 0.1$	41
29 pav. Temperatūros ir aukščio poveikis aerodinamikai. Kokybės grafiko kitimas (a), tankio kitimas (b)	42
30 pav. Lietaus poveikis aerodinamikai, „ C_L “ priklausomybė (a), „ C_D “ (b) [45]	42
31 pav. Bokšto aerodinaminio šešėlio poveikis jėgainės efektyvumui (a) ir momento koeficiento pokyčiui (b). Vizualinis aerodinaminio šešėlio pateikimas „CFD“ formatu, kai bokšto santykinis bokšto storis 2 % (c) ir 4 % (d) [46].....	43
32 pav. Mentės atramų aerodinaminis pasipriešinimas. Pasipriešinimo koeficiento priklausomybė nuo „Re“ skaičiaus ir profilio tipo (a), veikiančios jėgos (b)	44
33 pav. Elementų suskaidymo rezultatų paklaida nuo tinklelio tankio:.....	45
a) 0%, b) 0.33 %, c) 0.08 %	45
34 pav. „S1223RTL“ profilio eskizas, 25 elementų (a) ir 200 elementų (b) vizualinis palyginimas	45
35 pav. Profilio „USNPS4“ kokybės (a) ir poliarės (b) priklausomybė nuo profilio elementų skaičiaus. Sparno kokybės grafikas taikant skirtingus skaičiavimo metodus (c) ir sparno tinklelio dydį (d)	46
36 pav. Sparno segmento grafikai: „ C_L “ (a), „ C_D “ (b), poliarės (c) aerodinaminės kokybės (d).....	47
37 pav. Mentės jėgų ir kampų išsidėstymo schema (vaizdas iš viršaus, kairėje) bei 10–28 formulių parametrų pateikimas (dešinėje).....	49
38 pav. Kosinuso teorema: trijų kraštinių ir kampų priklausomybė. Vėjo dedamųjų eskizas	49
39 pav. Atakos kampo priklausomybė nuo „TSR“ viso apsisukimo metu	52
40 pav. Atakos kampo diapazono priklausomybė nuo „TSR“	52

41 pav. Parinktos ir teorinės „ TSR “ reikšmės esant skirtingiems vėjo greičiams	53
42 pav. Pradinis galios kreivės modeliavimas	54
43 pav. Profilių keliamosios jėgos koeficientų priklausomybė nuo atakos kampo (a), pasipriešinimo koeficientų (b), aerodinaminės kokybės priklausomybė nuo atakos kampo (c) ir profilių poliarė (d) ..	55
44 pav. Trimačio sparno kokybės priklausomybė nuo atakos kampo, palyginant skirtingus profilius (a), skaičiavimo rezultatų eskizas su geometriniais parametrais ir slėgio pasiskirstymu (b)	56
45 pav. Mentės keliamosios jėgos koeficiento reikšmės apsisukime (a), pasipriešinimo koeficientas (b), sparno aerodinaminė kokybė (c), vėjo srauto diapazone 5–16 m/s.....	57
46 pav. Sparno sukiamų „ F_N “ jėgų reikšmės apsisukime (a), „ F_N “ ir „ F_{isc} “ jėgų suma (b) ir „ F_T “ jėgos (c) reikšmės, vėjo srauto diapazone 5–16 m/s	58
47 pav. VVJ galios kreivės priklausomybė nuo mentės pastatymo kampo, vėjo srauto diapazone 5–16 m/s	59
48 pav. VVJ galios kreivės priklausomybė nuo mentės stygos ilgio, vėjo srauto diapazone 5–16 m/s	60
49 pav. VVJ ir HVJ galios kreivių, ir sugeneruotos energijos palyginimas, vėjo srauto diapazone 0–20 m/s	60
50 pav. VVJ ir HVJ galios koeficiento „ C_P “ kreivės, vėjo diapazone 0–20 m/s	61

Lentelių sąrašas

Lentelė 1. Lietuvos VJ elektros gamybos veikla užsiimančios įmonės bei asmenys [10].....	15
Lentelė 2. Plūduriuojančių jėgainių projektus vystančių įmonių palyginimas [25].....	24
Lentelė 3. Šiurkštumo klasės klasifikavimas [3].....	35
Lentelė 4. Vėjo greičio statistinė analizė ir skirstinių palyginimas (25 pav. duomenys).....	38
Lentelė 5. Vėjo greičio, mentės linijinio greičio, „ TSR “ ir „ $Reynolds$ “ skaičiaus ryšis	53

Monastyreckis Gediminas. Vertikalios ašies vėjo jėgainių aerodinamikos tyrimai. Aeronautikos inžinerijos magistro baigiamasis darbas. Vadovas Doc. dr. Kazimieras Petkevičius. Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Reikšminiai žodžiai: *Jūros vėjo energija, vertikalios ašies vėjo jėgainės, mentės aerodinamika, galios kreivė.*

Kaunas, 2018. 70 p.

Santrauka

Darbe atlikta išsami vertikalios ašies vėjo jėgainių aerodinamikos analizė. Darbe pateikti jėgainės efektyvumą paveikiantys faktoriai (2 skyrius) ir optimalūs aerodinaminiai profiliai bei jėgainės geometriniai duomenys (3 skyrius). Skaičiavimuose palyginama suskaičiuotos jėgainės galios kreivė su esamos 4 MW jėgainės rinkoje kreive.

Darbe atlikti pagrindiniai darbo uždaviniai ir gauti šie rezultatai:

Vertikalios ašies vėjo jėgainių menčių optimalus menčių kiekis. Apskaičiuotas vientisumo parametras. Palygintas vidutinis vėjo greitis prie kranto ir 104 km atstumu, Lietuvos Respublikos jūrinėje teritorijoje. Skaičiavimuose įvertintas sparno šiurkštumo parametras, temperatūros skirtumo poveikis aerodinamikai, bokšto ir mentės atramų aerodinaminių šešėlių nuostoliai, profilio ir sparno elementų kiekio poveikis skaičiavimo paklaidai. Darbe sudarytas tikslus skaičiavimo modelis, leidžiantis stebėti aerodinamines ir apkrovas bei galios kreivės parametrų kitimą, priklausomai nuo įvestų jėgainės matmenų ir mentės geometrijos. Apskaičiuotos efektyvios „TSR“ reikšmės, atlikta 159 aerodinaminių profilių analizė. Palyginti 4 skirtingų profilių sparno charakteristikos. Apskaičiuoti jėgainės aerodinaminiai parametrai ir apkrovos veikiančios mentėje, 5–16 m/s vėjo greičio diapazone.

Svarbiausi darbe gauti rezultatai:

1. Optimizuota galios kreivė keičiant mentės pastatymo kampą, galios prieaugis – 19.5 %.
2. Optimizuota galios kreivė keičiant mentės stygos ilgį, galios prieaugis – 45 %.
3. 8–13 m/s vėjo greičio diapazone, vidutinis jėgainės efektyvumas siekia 34 %.
4. 4 MW horizontalios ašies vėjo jėgainės „Vestas“, sugeneruotos energijos kiekis jūroje per 30 metų laikotarpį siekia 471 GWh, tuo tarpu apskaičiuotosios 4 MW vertikalios ašies vėjo jėgainės – 425 GWh. Sukauptos energijos skirtumas lygus 9.8 %.

Monastyreckis Gediminas. Aerodynamic Analysis of a Vertical Axis Wind Turbine. Aeronautical engineering master's thesis. Supervisor assoc. prof. Kazimieras Petkevičius. The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Keywords: *Offshore wind energy, vertical axis wind turbines, aerodynamics of blade, power curve.*

Kaunas, 2018. 70 p.

Summary

In this paper, a deep aerodynamic analysis is made about vertical axis wind turbines. Effective factors on wind turbine power curve parameters (2nd section) and optimal aerodynamic profiles together with wind turbines geometrical properties (3rd section) are presented. In a calculation results, a designed vertical axis wind turbine's power curve is compared to 4 MW wind turbine, an example taken from the wind industry market.

The main tasks and results are these:

Vertical axis wind turbine optimal blade count and solidity parameter. An average wind speed comparison between seashore and 104 km distance, in the sea territory of the Republic of Lithuania. A roughness effect of a blade surface on aerodynamic characteristics are estimated, as well as an environment temperature impact, aerodynamic shading of tower and supporting construction, and computational mesh size influence. There is a computational scheme presented, allowing to analyse the performance of wind turbine due to various geometry parameters. Effective “TSR” values are estimated, 159 different aerodynamic profiles are compared. Four best profiles are picked for blade modelling, aerodynamic characteristics are compared. Aerodynamic parameters of wind turbine and blade loads are calculated in a wind speed range of 5–16 m/s.

The most important received results are these:

1. Optimised power curve of blade's fixed angle position, power increment– 19.5 %.
2. Optimised power curve of blade's chord length, power increment – 45 %.
3. At wind speed interval of 8–13 m/s, average turbines efficiency – 34 %.
4. 4 MW horizontal axis wind turbine “Vestas”, generated wind energy in the sea over the last 30 years equals to 471 GWh. In comparison, a 4 MW calculated vertical axis wind turbine reaches 425 GWh. The overall generated energy difference is 9.8 %.

IVADAS

Pasaulyje šiuo metu vyrauja energetinis perversmas. Baigtiniai energijos šaltiniai po truputį mažėja bei kelia vis didesnį poveikį klimato atšilimui. Tuo tarpu spartus atsinaujinančiosios energetikos technologijų tobulėjimas sukėlė elektros kainos konkurencingumą, todėl ši nauja ir švari energijos gamybos rūšis pradeda perimti energetikos rinką. Vėjo energija yra viena iš pagrindinių atsinaujinančiosios energijos rūšių. Tobulėjant aerodinamikos mokslo sričiai, vėjo jėgainės tampa efektyvesnės, tai lemia vis patrauklesnes elektros kainas vartotojų atžvilgiu. Vėjo energetika šiuo metu laikoma viena pigiausių energijos šaltinių bei turi didelį potencialą tapti dar pigesne. Viena iš šios energetikos panaudojimo galimybių – jūrose bei vandenynuose.

Jūroje esanti vėjo energija yra didesnė lyginant su sausumoje esančia, bet pritaikymo ir statybos sudėtingumas kelia inžinerinius iššūkius. Vienas iš sprendimų – plūdurių panaudojimas, tačiau tradicinės horizontalios ašies vėjo jėgainės nėra tam pritaikytos. Plūdurių technologija vėjo energetikoje yra palyginti nauja ir jos vystymas prasidėjo tik XXI amžiaus pirmo dešimtmečio pabaigoje. Plūduriuojančiųjų technologijų pritaikyme didelę perspektyvą turi vertikalios ašies vėjo jėgainės. Jos pasižymi ne tik mažesniu svoriu, žemesniu svorio centru, bet tuo pačiu priima vėjo srautą iš visų pusių, bet kuriuo laiko momentu.

Vertikalios ašies vėjo jėgainės savo efektyvumu nusileidžia tradicinėms jėgainėms, todėl šio darbo tikslas yra ištirti jų aerodinamiką siekiant gauti kuo geresnį jėgainės efektyvumą. Darbe taikyta programinė įranga: statistiniams skaičiavimams – „*Matlab*“, aerodinaminei analizei – „*Xflr-5*“ ir „*Ansys Fluent*“, parametrų ir jėgų skaičiavimams – „*Microsoft Excel*“. Šiame darbe bus siekiama ištirti jėgainėse taikomų profilių aerodinamiką, parinkti geriausias charakteristikas turinčius profilius tolimesniems mentės skaičiavimams. Taikant maksimumo ir minimumo skaičiavimo sąlygas, parinkti efektyviausią jėgainės geometriją, menčių skaičių ir pastatymo kampą. Taip pat apskaičiuoti jėgainės galios kreivę esant skirtingoms vėjo greičio reikšmėms ir palyginti su horizontalios ašies vėjo jėgainių galios kreivėmis, esančiomis rinkoje.

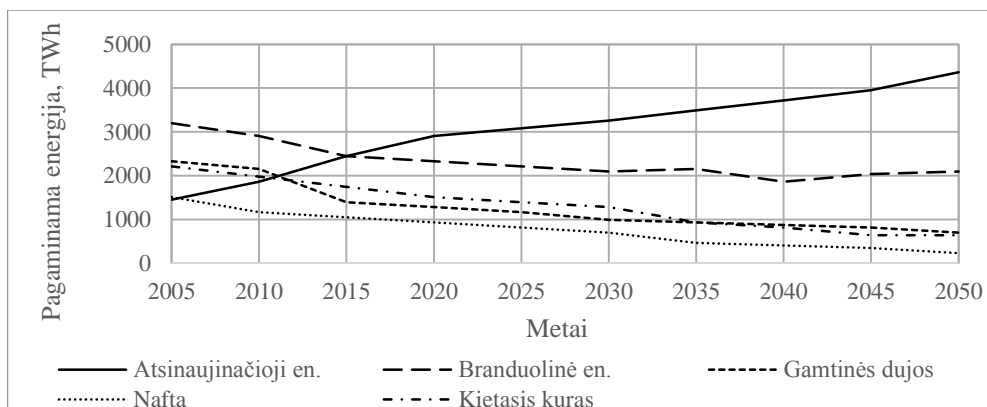
1. TECHNINIO LYGIO ANALIZĖ

1.1. Vėjo energetikos apžvalga

1.1.1. Pasaulyje ir Europoje

Energetikos technologinis perversmas prasidėjo 19 amžiaus pabaigoje, kai buvo išvystytas ir plačiai naudojamas termodinaminis procesas. Vidaus degimo varikliai atliko sukamąjį darbą, atsirado pirmieji generatoriai, deginamas kuras virto elektra. Visa gamybos pramonė varoma anglimi ir nafta klestėjo ne tik dėl labai pelningo verslo, bet ir dėl paprastumo. Jai nebuvo taikomi aplinkosaugos reikalavimai ar mokesčiai už taršą bei atliekas. Kadangi dujų bei naftos ištekliai buvo randami tik kai kuriuose regionuose, jų gavimas buvo ganėtinai sudėtingas ir brangus, todėl didžiosios dalies valstybių pagrindinė energija buvo gaunama iš anglies. Tuo tarpu anglis yra labiausiai teršiantis ir anglies dvideginio dujų išskiriantis kuras [1, 2].

Atsinaujinančioji energetika (toliau AE) kaip neišsenkami ir masiški Saulės kilmės ištekliai buvo minimi tik po Antro pasaulinio karo. Vystantis kosminei pramonei, buvo sparčiai patobulinti saulės elementai, įgavus supratimą apie aviaciją ir aerodinamiką – atsirado pirmosios vėjo jėgainės (toliau VJ). Laivyne naudoti itin efektyvūs propeleriai buvo pritaikomi didelių galių hidro-elektros. Bėgant metams iškastinio kuro kaina pamažu didėjo dėl palaipsniui senkančių išteklių, papildomų akcizų bei mokesčių už taršą, tačiau didžiausią atsinaujinančios energetikos proveržį davė pirmoji naftos krizė, prasidėjusi 1973 metais [3].

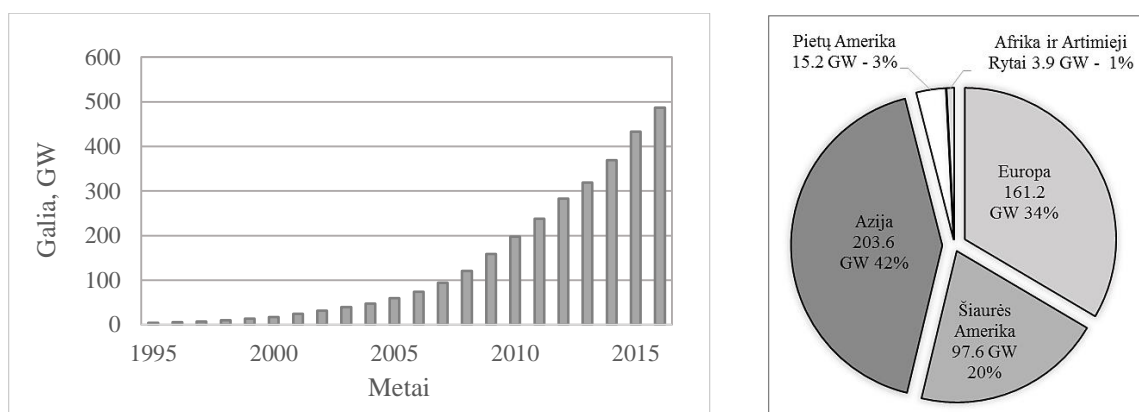


1 pav. Europos energijos produkcijos scenarijus pritaikant „Primes“ skaičiavimo modelį [4]

Naudojant vieną iš prognozuojamų „Primes“ skaičiavimo modelių, buvo rastas energetinis scenarijus (1. pav.), kuris teigia, kad visos Europos energijos produkciją 2050 m. sudarys AE – 54 %, branduolinė energija – 26 %, kietasis kuras ir gamtinės dujos po 8,6 %, nafta – 4 %. Žvelgiant į Europos energijos produkciją, galime matyti, kad 2005 metais AE sudarė tik 16 %, 2015m. – 27 %. Priklausomai naujų valstybinių ir tarptautinių valdomųjų partijų, atsiradus naujiems sprendimams ir strategijoms, rodikliai gali kisti į vieną ar kitą pusę [4].

Spartus vėjo energetikos augimas Europoje ir pasaulyje prasidėjo 21 amžiaus pradžioje. Nuo 2000 iki 2016 m. įrengtų VJ galia pasauliniu mastu padidėjo nuo 18 GW iki 483 GW arba apytikriai 26 kartus. Šis progresas tęsiasi iki šių dienų ir tendencija toliau didėti yra labai palanki. Vėjo pramonei klestėti padeda ne tik milžiniškos verslo perspektyvos – dešimtys kompanijų su milijardinėmis apyvartomis, bet ir politiniai sprendimai – tarptautiniai ir nacionaliniai šalių įsipareigojimai aprašyti Baltojoje knygoje. Vėjo energetika, kuri apytikriai sudaro 30 % atsinaujinančiosios energetikos dalį, yra ne tik švari ir pigi, bet kartu suteikia energetinę nepriklausomybę, sukuria tarpvalstybinę ekonomiką, konkurencingumą, verslo skatinimą, naujų darbo vietų kūrimą, mokslo bei technologijų progresą [5].

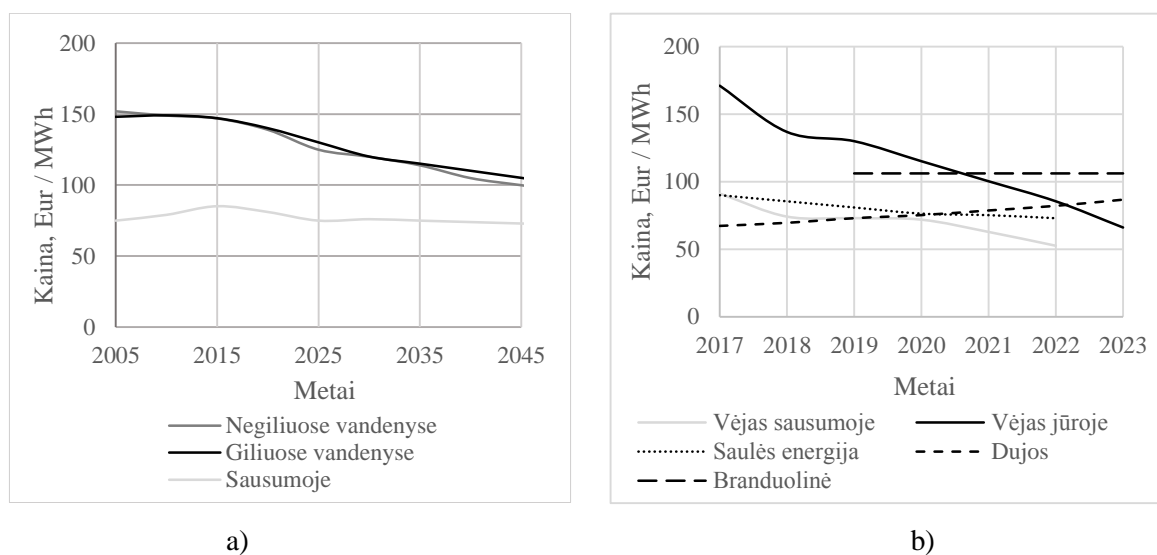
Prie sparčios jėgainių energetikos plėtros pasauliniu mastu, labai prisidėjo Azijos žemynas, tiksliau – Kinijos valstybė, kuriai priklauso 82 % arba 166 GW visoje Azijoje įrengtų VJ galios. Tuo tarpu Europoje, pagal statistiką pirmuoja tokios valstybės, kaip Vokietija (32 %), Ispanija (15 %), Jungtinė Karalystė (10 %), o pagarsėjusi savo efektyviomis jėgainėmis Danija – tik 3,3 %. Tačiau galios kiekis tenkantis vienam gyventojui Danijoje siekia 0,9 kW, o Vokietijoje – 0,6 kW [5].



2 pav. Pasauliniu mastu įrengtų vėjo jėgainių augimas per pastaruosius 20 metų bei žemynų procentinis galių pasiskirstymas 2016 metais [5]

Lietuva pagal šią statistiką Europoje rikiuojasi per vidurį, tačiau per pastaruosius kelis metus sparčiai auga, įvertinant mažėjantį gyventojų skaičių bei plintančią rinką. Šiaurės Amerika pasaulio statistikoje užima penktadalį – 98 GW. Įrengtų jėgainių sausumoje kiekis valstijose siekia apytikriai 40 tūkstančių. Tai prišaukia didelius nusiskundimus iš gyventojų dėl triukšmo ir žemų dažnių sukeliama poveikio bei aplinkosaugos – dėl didelio skaičiaus paukščių žūčių. Tačiau, Amerika turi labai didelį potencialą vystyti vėjo jėgaines jūroje, kurios padėtų išspręsti minėtas problemas. Atlikus tyrimą buvo nustatyta, kad rytų ir vakarų krante esama vėjo energija, kuri galėtų būti sugeneruota, siekia 7200 TWh. Šis skaičius net du kartus viršija JAV elektros suvartojimą [6].

Prie tokios didelės vystymosi spartos vėjo energetikoje (2 pav.) prisidėjo naujų medžiagų panaudojimas. Lengvos ir stiprios anglies bei stiklo pluošto kompozitinės medžiagos leido rotoriaus skersmeniui išaugti nuo 40 iki 80 metrų, tai sudarė nominalios galios padidėjimą nuo kelių šimtų vatų iki 4+ MW. Atsiradus automatikos technologijoms, mentės gamybos darbus pradėjo atlikti didžiulės mašinos. Gamybos procesas pagreitėjo kelis kartus, tuo pačiu buvo išvengta žmogiškosios klaidos faktoriaus bei užtikrinta aukštesnė gamybos kokybė. Pritaikius specialias transportavimo ir statybos technologijas, buvo galima lengviau ir greičiau vykdyti logistiką. Visi procesai liečiantys vėjo jėgainių sritį per 4 dešimtmečius buvo labai patobulinti ir optimizuoti. Visa tai lėmė, kad jėgainių pagaminta elektros kaina tapo viena pigiausių pasaulyje – vidutinė kaina už MWh siekia 50–70 eurų [7].

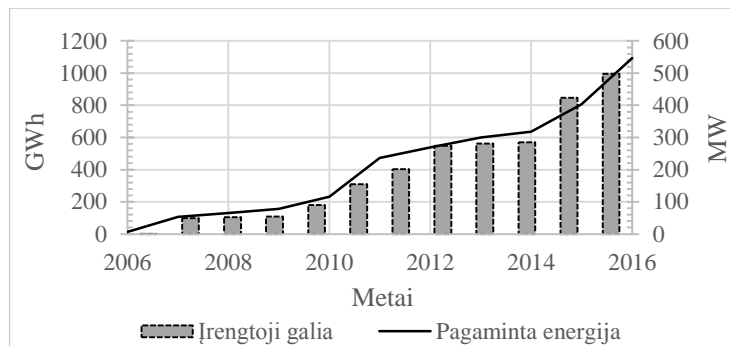


3 pav. Vėjo elektros energijos kainos už 1 MWh palyginimas jūroje ir sausumoje pagal „Primes“ skaičiavimo modelį (a). Skirtingų gamybos šaltinių kainų palyginimas už MWh Jungtinėje Karalystėje [4, 7]

Jungtinės Karalystės elektros kainos palyginimas, atsižvelgiant į skirtingus gamybos šaltinius ir 2017–2023 metų periodą, pateiktas 3 paveikslo b) dalyje [7]. Rezultatai teigia, kad vėjo energetika jūroje smarkiai pigs ir 2023 metais sieks 82 Eur/MWh, tuo tarpu saulės energetika – 52 Eur/MWh, dujų – 81 Eur/MWh, branduolinės – 106 Eur/MWh. Kainų perversmas, kada elektros gamyba iš atsinaujinančiųjų šaltinių bus pigesnė negu dujų ar branduolinės energetikos, numatomas 2020–2021 metais. Tačiau, atsižvelgiant į 2017-2018 metų aukcionų kainų siūlymus [8], jūrinė vėjo energetika skirtinguose aukcionuose jau pateikė 98, 81, 72, 65, 60, 50 Eur/MWh kainas, o sausumoje – 35 Eur/MWh, tuo tarpu saulės energetika – 40 Eur/MWh [8]. Galima teigti, kad taikyti skaičiavimo modeliai, spėjantys atsinaujinančiosios energetikos ateitį dažnai būna klaidingi, nes ji vystosi žymiai sparčiau. Tai sukelia tik dar geresnes investavimo sąlygas ir mažesnę riziką.

1.1.2. Lietuvoje

Lietuva, neturinti vėjo jėgainių gamyklų ar su ja susijusių technologijų kūrimo, Europos gretose, pagal įrengtos galios kiekį gyventojų skaičiui, rikiuojasi per vidurį [5]. Vienas iš pagrindinių mūsų valstybės privalumų – mažai apgyvendintas plotas ir palyginus ne itin miškingi ir vandeningi regionai. Lietuvoje taip pat egzistuoja pakankamai geros vėjo sąlygos, atitinkamuose regionuose vidutinis vėjo greitis siekia 5–6 m/s [9].



4 pav. Pagamintos vėjo energijos ir įrengtos jėgainių galios augimas 2006-2016 metais, Lietuvoje [9]

Lietuvoje vėjo energetikos vystymas prasidėjo XXI amžiaus pradžioje. Pirmoji 160 kW galios jėgainė buvo įrengta Skuode, tačiau projektas dėl techninių gedimų buvo nesėkmingas. Pagrindinis energetinis šuolis prasidėjo, kai Kretingos rajone buvo įrengtas 30 MW parkas su naujos kartos vokiškomis 2 MW jėgainėmis. Po to spartus augimas tęsėsi nuo 2010 metų, kai prasidėjo kurtis didžiųjų Lietuvos kompanijų kaip „Achema“ dukterinės įmonės, užsiimančios jėgainių parkų projektų steigimu, pritraukia į Lietuvos rinką tokius vakarinių valstybių vėjo jėgainių gamintojus kaip „Siemens“, „Enercon“, „Vestas“, „Nordex“. Jau 2016 metų pabaigoje, įrengtų jėgainių skaičius padidėjo 7 kartus ir bendra galia siekė 498 MW (4 pav.) [9].

Lentelė 1. Lietuvos VJ elektros gamybos veikla užsiimančios įmonės bei asmenys [10]

Įmonės pavadinimas	Parkai, vnt.	Jėgainių skaičius	Bendroji galia, MW	El. produkcija, GWh/metus	el. kaina, Eur/MWh	Parduodama el. Mln. Eur/metus
<i>4 energia</i>	5	60	139	348	26–71	9.1
<i>Renega</i>	3	26	57	159	31–86	8.9
<i>Eurakras</i>	1	8	24	60	50	3
<i>Inter RAO</i>	1	15	30	70	50	3.5

Didžiausios šiuo metu elektrą iš vėjo energijos gaminančios įmonės pateiktos 1 lentelėje. Parkuose įrengtų jėgainių skaičius svyruoja nuo 8 iki 15, vidutinis vienos jėgainės galingumas siekia 2.5 MW. Priklausomai nuo paros laiko ir vėjo stiprumo, parduodama elektros vidutinė kaina – 5 euro centai už kilovatvalandę [10].

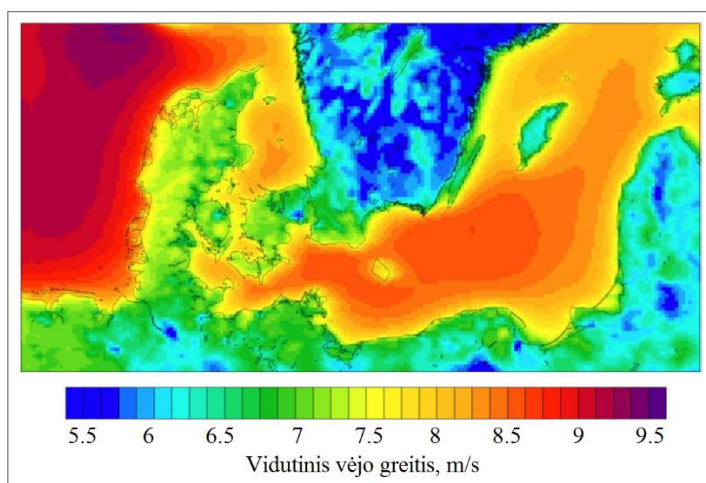
1.1.3. Baltijos jūros vėjo energijos potencialas

Vienas didžiausių ir dar visiškai neišnaudotų atsinaujinančių šaltinių Lietuvoje – Baltijos jūroje esantis vėjas. Pirmame priede [Priedas 1] pateiktas Lietuvos Respublikos jūrinės teritorijos žemėlapis, kuriame geltona spalva vaizduojama ūkinė paskirtis – vėjo jėgainėms vystyti numatyta teritorija. Priimkime prielaidą, kad viename kvadratiname kilometre įrengtų jėgainių bendra galia, taikant optimalų atstumą tarp jėgainių (5 roatoriaus atstumai į ilgį ir 3 į plotį) lygi 10MW. Tada šioje ūkinės veiklos teritorijoje, kuri apytikriai siekia 1024 km², maksimali bendra VJ galia siektų 10 GW. Tokia masiška vėjuje slypinti energija prilygsta 7 šiuolaikiniams atominės elektrinės reaktoriams ir pagaminamos elektros energetinis potencialas per metus siekia 41 TWh. Tuo tarpu palyginimui, Lietuva per 2016 metus elektros suvartojo 10.47 TWh, o patalpoms ir karštam vandeniui šildyti, suvartotas energijos kiekis siekė tik 0.2 TWh [3, 11].

Įvertinkime augančią elektromobilių rinką per ateinančius 30 metų ir pasirinkime vieną iš galimybių, kad 2050 metais visą Lietuvos transportą sudarys elektromobiliai. Šiuo metu registruotų automobilių skaičius yra 1.34 milijono. Priimkime, kad visi automobiliai kiekvienas per dieną suvartotų 25 kWh – pusė valandos darbo 50 kW galios varikliui. Tada per metus sunaudotume papildomai 12.25 TWh elektros energijos. Visus anksčiau minėtus kriterijus: transportą, elektros suvartojimą ir šildymą galėtų patenkinti vėjo jėgainių parkai jūroje. Žinoma, įrengti 10 GW galios prilygstančius parkus 1000 km² plote kainuotų apytikriai 15 milijardų, tačiau įvertinant elektros pardavimo kainą 50 eurų už MWh, ši suma atsipirktų per 10 metų, o vienos VJ vidutinis gyvenimo laikas – 25 metai [3, 12].

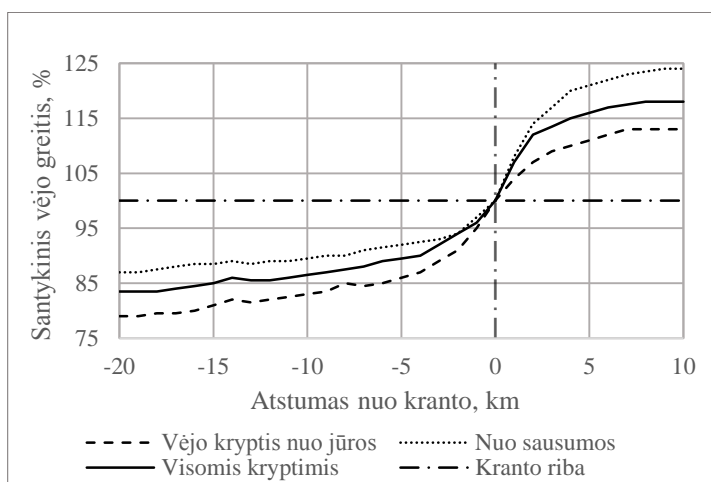
Pagal dabartines technologijas VJ jūroje galima statyti iki 50 metrų gylio, todėl visas potencialus Baltijos jūros plotas, skirtas ūkinei veiklai, sudaro tik 50%. Pirmame priede pavaizduotas plotas (brūkšninės geltonos linijos, juoda spalva skaičiai – jūros reljefo gylis), galėtų būti pritaikytas plūduriuojančioms vėjo jėgainėms. Jis apytikriai siekia 1231 km² ir prilygsta daugiau nei dvigubai elektros energijos generavimo galimybei. Susumavus bendrą Lietuvos jūros teritoriją skirtą stacionarioms ir plūduriuojančioms jėgainėms statyti, teorinė galima elektra 8 kartus pralenktų valstybės suvartojimą. Pilnai įgyvendinus šią idėją, į valstybės biudžetą kasmet įplauktų 3 milijardai eurų vien tik iš elektros eksporto, nes žvelgiant į kitas valstybes ir jų būsimą elektromobilių plėtrą, nusimato dvigubas elektros suvartojimo kiekis, kuris sukurs labai puikias sąlygas tarpvalstybinėje energetinėje rinkoje. Vėjo jėgainių vystymas Baltijos jūroje ne tik suteiktų visišką valstybės energetinį savarankiškumą, bet kartu ir prisidėtų prie BVP augimo, švaresnės aplinkos ir globalinio atšilimo sulėtinimo [13].

Lygindami sausumos ir jūros stiprumo pasiskirstymą matome ryškius skirtumus (5 pav.). Ši iliustracija buvo sukurta naudojant statistines vėjo vertes remiantis „CoastDat2“ duomenų baze ir skaičiavimo modeliu „Regional climate model COSMO-CLM“. Galime matyti, kad jūroje ir sausumoje vėjo greitis skiriasi nuo 5.5 iki 9 m/s [14].



5 pav. Baltijos jūros ir gretimų krantų vidutinio metinio vėjo greičio pasiskirstymas 5.5–9.5 m/s [14]

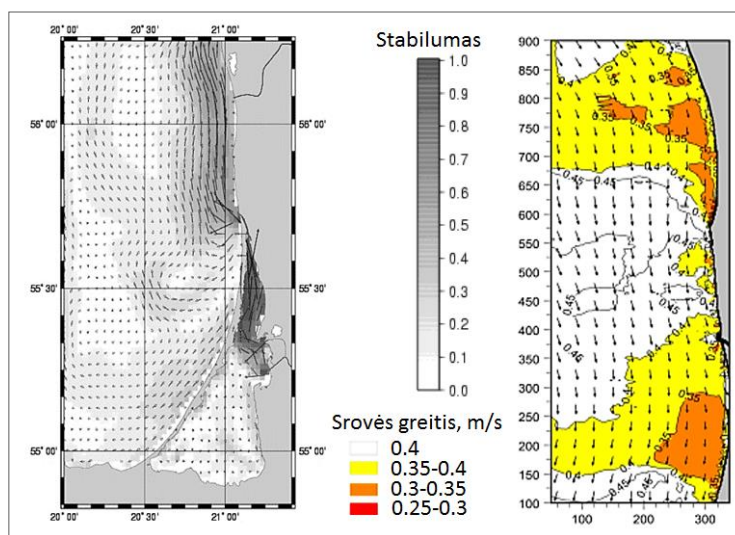
Lietuvos jūros regione matuotas greitis svyruoja nuo 7.5 iki 8.5 m/s. Tokia priklausomybė pasireiškia dėl paviršiaus šiurkštumo, kurį plačiau aptarsime 2.1 skyriuje. Taip pat dėl ilgalaikių geografinių termodinaminių savybių, kai atsiradus temperatūrų skirtumui tarp jūros ir smėlio atitinkamai naktį arba dieną, susidaro aukštesnio ir žemesnio slėgio zonos, kurios sukuria papildomą energetinę vertę prie jau esančio vėjo.



6 pav. Klaipėdos regiono santykinio vėjo greičio priklausomybė nuo atstumo iki kranto [15]

Lietuvos pajūrio regione esantis vėjo greičio kitimas buvo nagrinėtas tyrime [15], matavimai buvo atlikti Kretingoje, Giruliuose ir Vilkyčiuose. Anemometro prietaiso tvirtinimo aukštis siekė 50 m. Tyrimo metu rezultatai parodė, kad santykinis greitis skiriasi ne tik nuo atstumo iki kranto, bet ir nuo vėjo krypties. Stipriausia energetinė dedamoji pasireiškė pučiant vėjui nuo sausumos (6 pav.). Lyginant šį tyrimą su anksčiau minėtu (5 pav.), abiejų rezultatai panašūs ir leidžia daryti prielaidą – jūroje egzistuoja vidutiniškai 25 % stipresnis vėjas. Šis reiškiny yra vienas iš reikšminių argumentų, kodėl būtent jūroje reikėtų vystyti vėjo energetiką [15].

Nagrinėdami Baltijos jūros perspektyvas galime įžvelgti ir daugiau teigiamų savybių: mažas gylis palyginus su kitų valstybių jūrų ir vandenynų krantais, dugno sąlygos palankios tiek stacionarioms jėgainėms statyti, tiek plūduriuojančioms, nedidelis povandeninių srovių greitis ir geras stabilumas. Paskutinė savybė galėtų būti naudingai panaudota plūduriuojančioms jėgainėms, nes paviršinių srovių judėjimas turi tiesioginę priklausomybę nuo vėjo krypties. Sparnuotę veikianti jėga galėtų būti iš dalies atsveriamą povandeninių srovių, tačiau tai yra tik prielaida ir jai reikėtų skirti daugiau inžinerinių skaičiavimų [16].



7 pav. Lietuvos jūrinės teritorijos povandeninių srovių stabilumas ir judėjimo greitis 0.25–0.4 m/s [16]

Vėjo energetikos plėtra jūroje turi labai dideles perspektyvas, geras sąlygas bei daugumą teigiamų savybių [3, 17]:

- 20 % didesnis vėjo energetinis potencialas;
- Nesudėtingas menčių ir kitų agregatų transportavimas statybos metu;
- Sukeliamo triukšmo neutralumas gyventojams;
- Bokšto ir besisukančių menčių krentančio šešėlio neutralumas gyventojams;
- Saugumas gyventojams jėgainės avarijos atveju;
- Žemės ploto atlaisvinimas ūkio darbams.

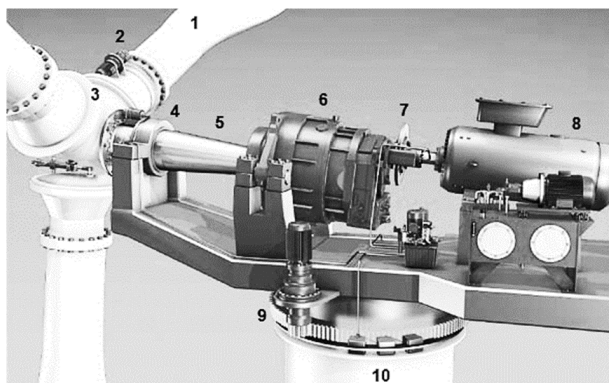
Tačiau, susiduriama ir su nemažai trūkumų, kuriuos būtų galima eliminuoti taikant naujas statybos technologijas bei inžinerinius sprendimus [3, 17]:

- Sudėtingi techninės priežiūros ir aptarnavimo darbai;
- Sudėtingi statybos darbai vandenyje;
- Brangus povandeninio kabelio tiesimas;
- Stipresni gūsiai ir audrų dažnumas, reikalaujantys didesnio jėgainės patikimumo;
- Reikalingas papildomas atsparumas bangoms, lietaus ir jūros vandens korozijai.

1.2. Vėjo jėginių konstrukcijų apžvalga

1.2.1. Horizontalios ašies vėjo jėginės

Horizontalios ašies vėjo jėginių (toliau HVJ) išoriniai konstrukciniai elementai skirstomi į šias grupes: sparnuotę, kabiną, bokštą ir pamatą. Taikant skirtingą optimizavimo ir skaičiavimo metodiką, konstrukcinių vėjo jėginių sprendimų gauta įvairių: menčių skaičius, rotorius skersmuo, bokšto tipas ir aukštis, kabinos agregatų parinkimas ir išdėstymas, generatoriaus tipas. Atsižvelgiant į daugelį skaičiavimo metodų, buvo prieita ir apsisota prie trijų menčių, horizontalios sukimosi ašies VJ tipo. Pačių pirmųjų tokio tipo jėginių pradiniai galios parametrai svyravo 0.5–1 MW ribose, tuo tarpu šiuolaikinės moderniosios jėginės su pažangia aerodinamika ir aukštu generatoriaus naudingumo koeficientu, nominali galia siekia iki 8 MW [17, 18].



8 pav. Kabinos elementai: 1 – mentės, 2 – atakos kampo reguliatorius, 3 – įvorė, 4 – pagrindiniai guoliai, 5 – velenas, 6 – greičio dėžė, 7 – diskinis stabdis, 8 – generatorius, 9 – pokrypio mech., 10 – bokštas [19]

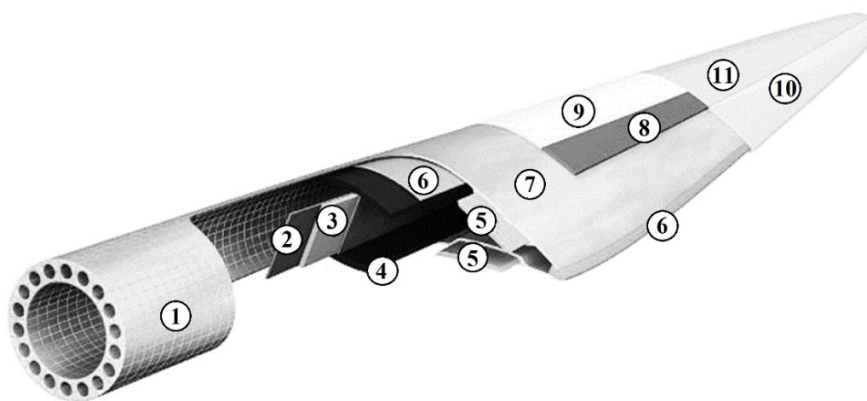
Kabinos (8 pav.) paskirtis yra transformuoti vėjo kinetinę energiją į elektros energiją. Tam reikalingos mentės, kurios dėl slėgių skirtumo ir nukreipto oro srauto generuoja keliamąją jėgą. Šios jėgos išsidėstymas per mentės ilgį sudaro 30–50 m petį ir sukuria labai didelį sukimo momentą, kuris greičio dėžėje (dažniausiai planetarinio tipo su pagreitinimo koeficientu 90:1) yra konvertuojamas į didelius sūkius, reikalingus optimaliam generatoriaus veikimui. Besisukančios mentės sukuria dideles išcentrines jėgas ir visas mentes veikiančias apkrovas bei vibracijas turi priimti įvorė. Tuo tarpu sukimosi apkrovas priima pagrindiniai guoliai ir velenas, kuriems keliami dideli atsparumo bei ilgaamžiškumo reikalavimai. Kabinoje taip pat yra įmontuojamas vienas pagrindinių, stiprių vėjų metu saugumą užtikrinančių agregatų – hidraulinis diskinis stabdis, sinchronizuotai veikiantis kartu su aerodinaminiais stabdžiais arba atakos kampų reguliavimu. Kintamos srovės generatorius paprastai turintis 4–12 polių, taip pat turi savo stabdymo bei aušinimo sistemą. Kabinos pastatymo kampo prieš vėją reguliatorius montuojamas prie bokšto ir kabinos slankios jungties. Tuo pačiu, į kabiną įeina tepalo ir hidraulikos aušinimo sistema, vėjo krypties ir stiprumo indikatoriai, priešgaisriniai ir vibraciniai jutikliai, ir kai kuriais atvejais, kiti elektrotechniniai įrenginiai, kaip kontrolės pultas ar transformatoriai [17, 18].

Mentės pagrindinė paskirtis aiški – priimti vėjo energiją, paversti sukamuoju judesiu, tačiau kaip efektyviausiai konvertuoti šią energiją priklauso nuo agregatų kokybiškumo: guolių, generatoriaus, greičių dėžės, aušinimo sistemos naudingumo koeficientų ir labiausiai nuo pačių menčių formos. Aukštas aerodinamiškumas pasiekiamas: tinkamai parenkant profilius, išlaikant gerą gamybos kokybę, kuri užtikrina menčių paviršinį lygumą, taikant didelį tikslumą turinčius atakos kampo aktuatorius ir kitas valdymo sistemas. Aerodinamikai pagerinti yra taikomi tokie inžineriniai sprendimai kaip: turbulizatoriai, valdomos plokštumos sparnuotės galuose, anti-apledėjimo sistema [3, 17].

Sparnuotės konstrukcija yra optimizuota taip, kad jos masė būtų kuo mažesnė, atlaikytų kuo didesnes apkrovas atsirandančias sukimosi metu, tuo pačiu būtų pakankamai standi – tolygiai, nevibruodama suktųsi ir netrukdytų aptekančiam srautui bei turėtų ilgaamžiškumą, kuris dėl įvairių defektų vidutiniškai siekia 10 metų. Visi šie reikalavimai sukelia daug sudėtingų sąlygų projektavimo metu, todėl prie užsibrėžto optimumo stengiamasi priartėti kuo arčiau. Menčių gamybai dažniausiai naudojamos kompozitinės medžiagos dėl jų lengvumo, stiprumo, atsparumo nuovargiui bei korozijai. Tačiau, pagal mechanines charakteristikas pirmaujantis anglies pluoštas, dėl savo didelės kainos, naudojamas retai. Standartinės 2 MW galios VJ vienos mentės masė siekia 13–16 tonų, o anglies ir stiklo pluošto kaina skiriasi kelis kartus, todėl dažniausiai naudojamas mažesnėmis mechaninėmis savybėmis pasižymintis stiklo pluoštas [3, 17].

Mentės konstrukcija dažniausia būna „Kesoninė“ (pagrindinė nešančioji konstrukcija – uždaro tipo lonžeronas) arba „Monokokinė“ (nešančioji konstrukcija – dvitėjinės formos lonžeronas ir danga). Lonžeronui dažniausiai taikomos medžiagos – daugiasluoksnis stiklo pluoštas (rečiau anglies), impregnuotas epoksidine derva bei sutvirtintas standumo briaunomis – aviacinės putos užpildu. Nerviūros mentėse naudojamos retai, tačiau dangos standumui išlaikyti taikoma daugiasluoksnė stiklo pluošto konstrukcija su putos arba balzos užpildu. Mentė taip pat dengiama impregnamentais, dažais, papildomais plėvelių sluoksniais, kurie gerina paviršiaus lygumą, apsaugo nuo lietaus korozijos, ultravioletinių spindulių, kurie savo ruožtu sendina polimerus, dervą bei aviacinę putą [3, 17, 20].

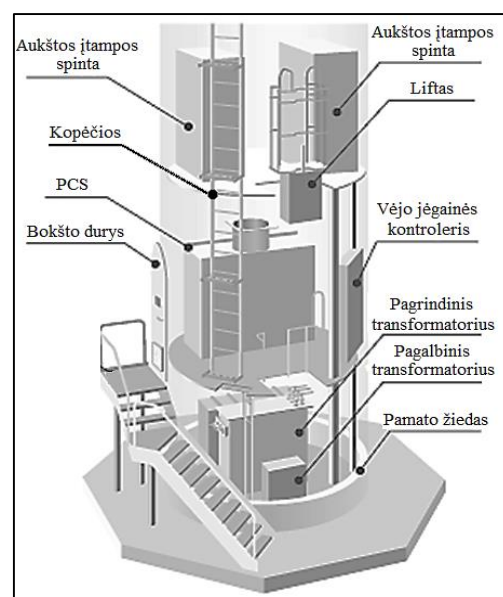
Paanalizuokime šiuolaikinės mentės konstrukcijos pavyzdį pateiktą 9 paveiksle. Tvirtinimo mazgas (1), sudarytas iš stiklo pluošte įklijuotos plieninės dalies, prie kurios prisukami varžtai. Lonžerono vertikali sienelė (2) gaminama iš anglies arba stiklo daugiasluoksnio audinio su „Corecell“ putos užpildu (3). Pagrindinį mentės stiprumą suteikianti dalis – lonžerono plokštumos (4). Dangos standumui užtikrinti (5) – „Infusion Core“, „Prepreg core“, „Corecell“, „G-Balsa“ arba „G-PET“ kompozitinės šerdys. Lonžeroną prie dangos klijuojanti ir sparnuotės galinę briauną sandarinanti medžiaga (6) – epoksidinė derva „SP340“. Pagrindinė stiklo pluošto danga (7) – „SPRINT Prepreg Infusion“. Mentės tarnavimo laiką prailginantis sluoksnis dėl UV spindulių atsparumo (8) – „Gelcoat CR3400“. Dažų sluoksnis (9) – „PU Paint“. Lakavimo sluoksnis (10) – „Epoxy Gelcoat“. Papildomas audinio, dažų ar epoksidinės dervos sluoksnis (11) uždedamas atliekant techninę apžiūrą [20].



9 pav. Mentės konstrukciniai elementai [20]

Bokšto aukštis vidutiniškai svyruoja nuo 80 iki 150 m atitinkamai pagal jėgainės galingumą. Bokšto konstrukcija dažniausiai gaminama 10-20 mm plieninių lakštų, kurie valcavimo metu yra susukami ir suvirinami, sudarant cilindro formą. Optimizuotos, į viršų siaurėjančio skerspjūvio ir plonėjančio sienelės storio, bokšto konstrukcijos masė svyruoja nuo 150 iki 500 tonų. Skirtingo skersmens ir storio cilindrai tarpusavyje suvirinami išilgai sudarant 3–4 pakopas, kurios yra lengviau transportuojamos, o statybos metu viena su kita sujungiamos varžtais. Kiti svarbūs elementai: guoliavietės, krumpliaračiai, durys, pailsėjimo aikštelės, storų laidų laikikliai, kopėčios ir lifto agregatai yra privirinami prie vidinės bokšto sienelės [3, 17, 21].

Bokšto apatinėje konstrukcijoje dažniausiai montuojami elektrotechniniai agregatai, dėl savo svorio, paprastesnio VJ techninio aptarnavimo bei parametrų stebėsenos. Šių komponentų išdėstymas atitinkamai priklauso nuo gamintojo, tačiau standartiškai atrodo taip kaip pateikta 10 paveiksle. Pagrindinis komponentas – transformatorius, kuris dėl darbuotojų saugumo montuojamas apačioje. Jo paskirtis – iš generatoriaus gautą įtampą padidinti kelis kartus ir su mažesniais elektriniais nuostoliais bei plonesniais laidais perduoti į elektrinę skydinę, dažniausiai statomą VJ parko pakraštyje. Dėl nenustojančio veikimo ir patikimumo transformatorius yra dubliuojamas. Galios stebėsenos sistema „PCS“ – atsakinga už visų elektrinių agregatų valdymą ir monitoringą. Vėjo jėgainės kontroleris skirtas rankiniu būdu valdyti, tikrinti bei kalibruoti visus elektrinius agregatus ir jutiklius, taip užtikrinant saugią techninę priežiūrą, bei tolimesnę VJ eksploataciją. Bokšto pamatas, kuris apytikriai užima 2–3 metrų gylį ir 15–20 metrų skerspjūvį, gaminamas iš plieniniais strypais armuoto betono. Bokštas prie pamato jungiamas varžtais, kurių skaičius siekia 100–150, skersmuo 20–30 mm [3, 17].

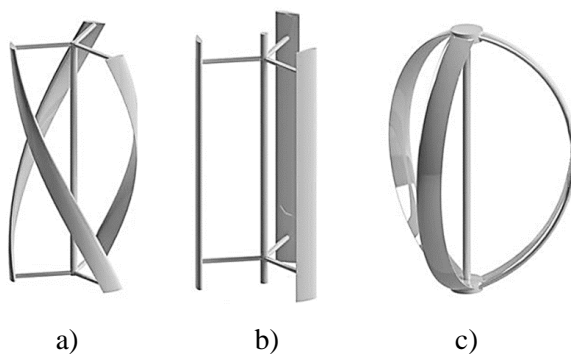


10 pav. Bokšto konstrukcija [22]

1.2.2. Vertikalios ašies vėjo jėgainės

Vertikalios ašies vėjo jėgainės (toliau VVJ) taip vadinamos dėl jų sparnuotės sukimosi ašieskumo. Vėjo kinetinės energijos konvertavimo principas į elektros energiją iš dalies yra toks pat kaip HVJ. Šiam procesui reikalingas generatorius, pavarų dėžė, stabdžių bei aušinimo sistemos, transformatoriai, keitikliai ir kontrolieriai [23].

Tačiau, VVJ aerodinamikos veikimo principas yra šiek tiek skirtingas negu HVJ ir nuo jo pobūdžio, priklauso jėgainės efektyvumas ir darbo režimai. Vienas iš jų, remiasi diferencialiniu aerodinaminiu pasipriešinimu, kai mentės viena pusė turi mažesnę pasipriešinimą negu kita, tokiu būdu sukurdamos sukimo momentą. Tokio tipo jėgainės yra efektyvios tik prie mažų vėjo greičių kaip 3–5 m/s, tačiau yra tylios ir pritaikomos miestuose. Antrasis pobūdis remiasi keliamosios jėgos atsiradimu, kai mentės su dažniausiai simetriniu profiliu, sukasi didesniu kampiniu greičiu negu esantis vėjas ir tam tikrose apsisukimo vietose atsiranda keliamoji jėga, kuri sukuria sukimo momentą. Šio tipo jėgainės turi geresnę efektyvumą prie didesnių vidutinių vėjo greičių, taip pat jų galios koeficiento reikšmės padidėja kartu su jėgainės masteliu. Toliau šiame darbe bus nagrinėjamos tik antru principu veikiančios vertikaliosios ašies vėjo jėgainės bei jų aerodinamika, kurią plačiau aptarsime 1.3.2 skyriuje [3, 17, 23].



11 pav. Vertikaliųjų vėjo jėgainių tipų eskizas, „Gorlov“ (a), „H-tipo“ (b), „Darrieus“ (c) [23]

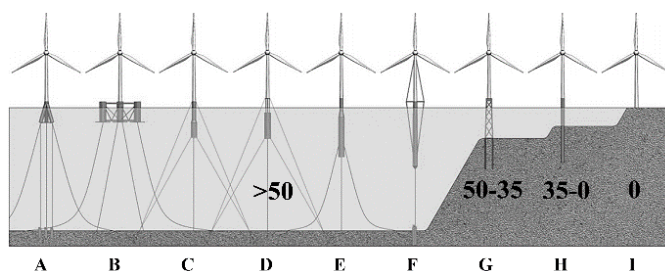
Pagal sparnuotės išgaubimo formą, VVJ skirstomos į 3 tipus (11 pav.): „Gorlov“ – (a), „H-tipo“ – (b), „Darrieus“ – (c). Visų VVJ tipų aerodinamika ir veikimo principas išlieka tokie patys, tačiau skiriasi tokios savybės kaip: gamybos technologijos, efektyvus veikimas prie skirtingų vėjo greičių, atsparumo ir ilgaamžiškumo charakteristikos, rėminės konstrukcijos išdėstymas, skleidžiamo triukšmo lygis, sukimosi stabilumas esant gūsiams.

Medžiagų panaudojimas šiose jėgainėse yra panašus kaip HVJ. Kadangi didžioji dauguma VVJ yra mažo galingumo, atsižvelgiant į gamybos paprastumą, dažniausiai mentės gaminamos iš aliuminio, o bokštas iš plieno. Retesniais atvejais norint gauti sudėtingą išlenkimą kaip pavaizduotoje „Gorlov“ tipo jėgainėje, sparnuotė būna gaminama iš kompozitinių medžiagų – stiklo ir anglies pluošto [23].

1.2.3. Plūduriuojančios vėjo jėgainės

Atsižvelgdami į neišsenkančią vėjo energiją ir gyliu apribotą jėgainių parkų vystymą jūrose, inžinieriai ir mokslininkai nusprendė tirti plūduri technologijas bei jų pritaikymą jau egzistuojančioms jėgainėms. Plūduriuojančios vėjo jėgainės (toliau PVJ) suteikia dideles perspektyvas gilius kratus turinčioms valstybėms, kaip Norvegija, Jungtinė Karalystė, Portugalija, Šiaurės Amerika, Japonija ir t.t.. Šis sprendimas sukuria naują gamybinę industriją ir darbo vietas. Taip pat ateityje gali suteikti pigesnę elektros kainą už MWh, kuri priklauso nuo šių aspektų [24]:

- PVJ parko atstumo iki kranto, kuris lemia statybų, transportavimo ir elektros perdavimo linijos įrengimo kaštus;
- VJ viename parke ar vieno projekto rengimo metu kiekio;
- PVJ parko gylio, kuris turi tiesioginę priklausomybę ir limitus tvirtinant inkarus;
- Plūduri tipo, kuris tiesiogiai priklauso nuo gylio ir regione esančių bangų dydžio;
- Valstybės jūrinės infrastruktūros: uostų, vilkikų, kranų, keltų, tinkamų darbuotojų kvalifikacijos ir kiekio. Valstybės žaliavų ir gamybos infrastuktūros;
- Regione esančio vidutinio vėjo greičio lemiančio vėjo energijos kiekį W/m^2 .



12 pav. Plūduriuojančių vėjo jėgainių tipai ir pritaikymo gylis, metrais [24]

Plūdurai skirstomi į tris pagrindines grupes: baržos – pusiau panirusio tipo (angl. Barge/Semi Sub), plūduriuojančios įtemptos platformos (angl.: TLP – Tension Leg Platform) ir plūdiniai – balastiniai (angl. TLB – Tension Leg Bouy). Plūdurai parenkami pagal montuojamą gylį, bangų aukščius, uosto gamybos ir transportavimo infrastruktūrą. Viena iš labiausiai pasiteisinusių – pusiau paniręs trikojis plūduras (12 pav. B), sukurtas ir patentuotas tarptautinės Amerikiečių įmonės „Principle Power“, kuri 2011-2016 metais sėkmingai įvykdė 2 MW plūduriuojančios jėgainės bandomąjį projektą Portugalijos krantuose „WindFloat“ ir toliau rengia pritaikymą 8 MW jėgainėms. Plūdurią sudaro plieninė konstrukcija, kurio masė siekia 2500 tonų. Kita gerai pasiteisinusi konstrukcija yra plūdinė – balastinė (12 pav. E), sukurta Norvegų kompanijos „Statoil“ ir 8-erių metų sėkmingo bandomojo projekto „Hywind“. Ši kompanija 2017 metų spalio mėnesį Škotijos krantuose atidarė pirmąjį pasaulyje plūduriuojančių jėgainių parką, siekiantį 30 MW galią, sudarytą iš šešių, 5 MW galios jėgainių. Plūduras taip pat sudarytas iš plieninės konstrukcijos, masė – 3500 tonų [24, 25].

Neseniai startavusi, inovatyvi ir daug potencialo turinti plūdūro konstrukcija patentuota Prancūzų kompanijos „Ideol“ – baržos tipo su viduryje esančia ertme, dar vadinama – slopinančiu baseinu (angl. Damping Pool). Šiuo metu ši kompanija atlieka bandomąjį 2 MW plūduriuojančios jėgainės projektą „Floatgen“ Prancūzijoje, startavusį 2016 metais. Esant bangavimui, dėl hidrodinaminių savybių vandens kiekis baseine kinta priešingai negu išorėje, taip slopindamas bangų veikiančias apkrovas ir stabilizuodamas plūdūrą. Tokio tipo konstrukcija plūdūrų technologijos rinkoje turi pranašumą dėl savo stabilumo ir paprasto medžiagų panaudojimo – cemento, kuris yra pigus bei daugumoje valstybių gaminamas, įskaitant Lietuvoje. Cementinės plūduriuojančios konstrukcijos jūroje yra išbandytos ir pasitvirtinusios naftos platformose, kurios pasižymi ilgaamžiškumu bei atsparumu sūraus vandens korozijai. Visi prieš tai minėti projektai apima plūdūrų projektavimą, gamybą ir pritaikymą jau egzistuojančioms HVJ. Žinant, kad tokių jėgainių svorio centras yra susitelkęs aukštai, kyla didesni stabilumo reikalavimai plūdūrams, dėl to labai išauga jų masė bei gamybos kaštai. Tačiau, kuriasi naujos kompanijos, kurios rengia inovatyvius projektus, apimančius plūduriuojančias VJ, kuria pirmuosius sumažinto mastelio modelius, siekiančius 30–100 kW galios. Labiausiai paplitusi VVJ – „H-tipo“, o plūdūro sprendimai pritaikomi tiek baržos, tiek plūdinio pobūdžio [24, 25].

Lentelė 2. Plūduriuojančių jėgainių projektus vystančių įmonių palyginimas [25]

Įmonės ir projekto pavadinimas	Šalis	Metai	VJ tipas	Plūdūro tipas	Galia, MW
<i>Nenuphar „TwinFloat“</i>	Prancūzija	2021	VVJ	Barža	2.5
<i>SeaTwirl „S2“</i>	Švedija	2020	VVJ	TLB	1
<i>ETI „PelaStar“</i>	Anglija	2018	HVJ	TLP	6
<i>Ideol „Floatgen“</i>	Prancūzija	2015	HVJ	Barža	2
<i>Statoil „Hywind“</i>	Norvegija	2017	HVJ	TLB	5
<i>Principle power „Windfloat“</i>	Amerika	2018	HVJ	Barža	5

Labiausiai pažengusios su plūduriuojančių jėgainių vystymu susijusios įmonės bei tarptautiniai projektai pateikti 2 lentelėje. Pagal vystymo metus ir jėgainių galingumą, galima matyti, kad HVJ tipo projektai yra labiau pažengę į priekį ir artimiausiu metu numatomi plūduriuojančių jėgainių parkai. Tuo tarpu VVJ pritaikymo plūdūrams projektai pradėti visai neseniai ir yra tik pirmuose žingsniuose. Tačiau, šio tipo jėgainės turi daug teigiamų, savybių būtent jūrinėms sąlygoms ir pritaikomumui plūdūrams, kurias aptarsime kitame skyriuje.

Atsižvelgiant į Lietuvos jūrinės teritorijos galimybes: dugno gylis siekia 50–80 m, Klaipėdos uosto vidutinis – 15 m bei įvertinant esamą jūrinę ir gamybinę infrastruktūros padėtį, labiausiai pritaikomas plūdūro tipas – cementinės baržos su slopinančiu baseinu. Tokio tipo plūdūrams nereikalingas gilus uostas, taip pat yra nesudėtinga gamyba bei transportavimas į eksploatuojamą vietą [16].

1.2.4. Jėginių palyginimas

Žvelgiant į jėginių efektyvumą, išvystytas technologijas ir gamybą, vienareikšmiškai rinkoje dominuoja HVJ jėgainės. Tačiau, pasamprotaukime apie pritaikomumą giliuose vandenyse, kur galimi didelį bangavimai, stiprūs gūsiai bei rizikos faktorių keliančios audros. Įvertinus HVJ kabinos ir rotoriaus masę, kuri atitinkamai kelia didelius atsparumo reikalavimus bokšto konstrukcijai, visumoje stabilumą užtikrinanti plūduro masė turi siekti 2000–3500 tonų (1.2.3. skyrius). Eksploatacijos metu turi būti užtikrinta itin stabili padėtis, nes dėl kelių laipsnių posvyrio bokštas patiria necentrines apkrovas – padidėja klupimo tikimybė. Taip pat esant nuolatiniam, nors ir minimaliam svyravimui, atsiranda aerodinaminiai nuostoliai, kurie gali sudaryti kelis procentus metinėje elektros generavimo statistikoje. Masė ir svyravimai yra vieni iš pagrindinių faktorių, kodėl HVJ pritaikymas plūduriuojančioje vėjo energetikoje yra sudėtingas [3, 17].

Didelį potencialą tokioje eksploatacijoje turi VVJ. Pagal dabartines technologijas, šios jėgainės savo efektyvumu nusileidžia ~10 % [3, 17], tačiau kai kurios kompanijos kuriančios didelių galių VVJ teigia, kad jų jėginių efektyvumas pranoksta tradicinių HVJ efektyvumą [26]. Jeigu šie teiginiai bei palankūs moksliniai tyrimai pasitvirtintų, galbūt rinkoje išvystume masiškos gamybos plūduriuojančias VVJ, kurios galėtų vėjo parkų aukcionuose konkuruoti su HVJ. Bendrai palyginkime šių dviejų vėjo jėginių teigiamas ir neigiamas savybes bei pritaikomumo plūduriuojančiai technologijai.

Vertikaliųjų vėjo jėginių pagrindinės teigiamos savybės [3, 17, 27, 28, 29]:

1. Nėra pokrypio mechanizmo (sparnuotės pasukimo prieš vėją). Sutaupomi pavarų ir guolių projektavimo bei gamybos kaštai, remontavimo darbai. Vėjas priimamas iš visų krypčių tuo pačiu laiko momentu, todėl nesukelia papildomų galios nuostolių.
2. Nėra menčių atakos kampo valdymo mechanizmo. Besisukančių apie savo ašį menčių atakos kampai svyruoja nuo -20 iki +20 laipsnių, priklausomai nuo jėgainės mastelio, šie kampai ir jų dydis keičiasi. Menčių profiliai parinkti taip, kad aerodinaminės charakteristikos pasireikštų optimaliau ir generuotų maksimalų sukimo momentą. Sutaupomi projektavimo ir gamybiniai kaštai, nereikalinga techninė priežiūra, prailginama eksploatacija ir ilgaamžiškumas.
3. Generatorius montuojamas apačioje, sukimosi ašis – vertikali. Tokiu būdu neapribojamas jo skersmuo ir ši savybė leidžia optimaliai parinkti polių skaičių. Daugiapoliams elektros generatoriams nereikia didelių sukimosi greičių, todėl eliminuojamas papildomas 90 % greičių dėžės naudingumo koeficiento daugiklis, bendrame jėgainės galios skaičiavime. Taip pat sutaupomi techninio aptarnavimo ir remontavimo kaštai, tuo pačiu atsiranda paprastesnė ir prieinamesnė generatoriaus remontavimo galimybė. Taip pat, dėl šios „apatinio montavimo“ savybės sumažėja aerodinaminis bokšto pasipriešinimas ir šešėliavimas, kai nėra sukeltos

papildomos srauto turbulencijos. Dar viena teigiama savybė – svorio centro pasiskirstymas plokštumoje, kuri gerina inertiškumą bei stabilumą. Apačioje esantis generatorius neapkrauna bokšto, kuriam telieka atlaikyti kompozitinių menčių svorį ir sukimo momentą. Bendras masės sumažinimas dėl eliminuojamo reduktoriaus ir bokšto supaprastinimo veda prie eksponentiškai mažesnių plūduriavimo matmenų, medžiagų panaudojimo bei visumoje – mažesnių kaštų.

4. Efektyvesnė aerodinamika prie mažesnių apsisukimų lemia mažesnes išcentrines apkrovas, skleidžiamą triukšmą ir stabilumą. Tuo pačiu turi didesnį sukimo momentą prie mažų apsisukimų lyginant su HVJ. Mažesnis kampinis greitis siejasi su linijiniu greičiu ir mažina susidūrimo su paukščiais smūginę galią, padarytą žalą tiek gyvūnui tiek konstrukcijai. Taip pat mažesnę susidūrimo su vandens lašais kinetinę energiją, kuri per ilgą laikotarpį pasireiškia kaip lietaus korozija.
5. Pasižymi didesniu išgyvenamuoju vėjo greičiu (angl. Surviving Wind Speed). Dėl savo rėminės konstrukcijos išdėstymo bei menčių aerodinamikos, VVJ gali priimti didesnius vėjo srautus ir nestabdoma toliau generuoti elektrą. Išaugus srauto greičiui, apsisukimai ir galia išlieka tokia pati dėl padidėjusio pasipriešinimo, kuris generuoja atsveriamąjį sukimo momentą. Tokiu būdu jėgainė pati save stabdo, neleidžia viršyti sūkių bei apkrovų. Palyginant išgyvenamąjį vėjo greitį HVJ siekia iki 30–40 m/s, tuo tarpu VVJ iki 50–60 m/s. Ši savybė sumažina griauamosios vėjo jėgos rizikos faktorių visos eksploatacijos laikotarpiu (20–25 metams).
6. VVJ ir ypač „*H-tipo*“ jėgainės konstrukcinis išdėstymas suteikia mažesnių gabaritų galimybę lyginant su HVJ, įskaitant bokšto, rėminės konstrukcijos bei sparnuotės gabaritus. Priimant tvirtinimo vietą – mentės viduryje, galimas dviejų sparno dalių sujungimas, kuris palengvintų gamybos, surinkimo bei transportavimo darbus. Atsiradus nepataisomui pažeidimui, galimas vienos mentės dalies pakeitimas. Tai reikalauja mažesnių galingumo kranų bei dvigubai sutaupo remontavimo kaštus.

VVJ neigiamos savybės [3, 17, 26 27, 28, 29]:

1. Šiuo metu mažų galių VVJ nusileidžia savo efektyvumu ~10 %, tačiau šis faktas yra ginčytinas lyginant didelių galių VVJ, kai kurių gamintojų teigimu jis netgi pralenkia HVJ.
2. „*Darrieus*“ tipo VVJ reikalingas pradinis įsukimas norint efektyviai dirbti prie mažų vėjo srautų. Ši savybė reikalauja papildomų ir sudėtingesnių elektrotechninių agregatų ir kontroliavimo sistemų.
3. Sukimo momento pulsacijos, atsirandančios dėl besisukančios mentės kintamojo atakos kampo, kuris sukelia skirtingų verčių keliamašias jėgas. Šios momento pulsacijos pablogina variklio našumą, kuriam reikalinga nuolatinė apkrova bei paspartina nuovargio pasireiškimą guoliuose. Norint suvienodinti sukimo momentą naudojamas didesnis skaičius menčių, tačiau kenčia ir

aerodinamikos charakteristikos dėl sujaukto šešėlinio srauto, todėl optimaliausia nusistovėjusi vertė – 3 mentės, rečiau 2, 4.

4. Neišvystyta didelių galių VVJ gamybos pramonė, technologijos. Lyginant su HVJ, atliktas mažesnis mokslinių tyrimų skaičius bei neaiškūs surinktų atitarnavusių jėgainių statistiniai duomenys liečiantys patikimumo, ilgaamžiškumo, elektros generavimo viso laikotarpio metu. Nežinomos tikslios nuovargio charakteristikos, pagal kurias būtų galima daryti patobulinimus ar modifikacijas, tuo pačiu – parduodamos elektros kainos neapibrėžtumas.

Horizontaliųjų vėjo jėgainių teigiamos savybės [3, 17, 27, 28, 29]:

1. Gausiai išvystyta pramonė bei menčių gamybos technologijos. Didelė pažanga ir pasiekimai mokslinėje ir tyrinėjimų srityje: sukurti nauji aerodinaminiai profiliai, optimizuota bokšto konstrukcija, sukurti ir pritaikyti atitinkamos galios ir charakteristikų generatoriai bei greičių dėžės. Išvystyta HVJ transportavimo bei statybų technologija ir logistika tiek sausumoje, tiek jūroje.
2. Dėl aerodinamikos ir kitų agregatų efektyvinimo optimizavimo pažangos, bendras HVJ naudingumo koeficientas, vadinamas jėgainės efektyvumo parametru bei dar žymimas galios koeficientu „ C_P “ siekia 40–45 %, tuo tarpu VVJ – 30–35 %.
3. Per pilną tarnavimo laiką surinkti duomenys apie jėgainės veikimo našumą, gedimus, veikiančias apkrovas, vibracijas, nuovargį. Visa tai paskatina tobulinti ir kurti naujas sistemas, agregatus, gerinti aerodinamiką, reikiamose vietose daryti naujus konstrukcinius sprendimus. Jėgainėms praėjusioms savo gyvavimo laiką atitinkamai taikomi pirmieji utilizavimo sprendimai, kuriais perdirbimo cechai, ieškomos naujos atliekų panaudojimo sritys, tokios kaip statybų inžinerija.

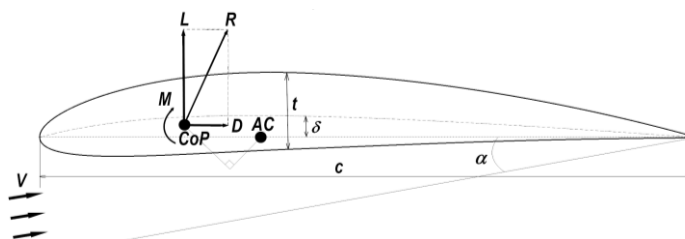
HVJ neigiamos savybės [3, 17, 27, 28, 29]:

1. Aukštas svorio centras reikalauja masyvaus bokšto bei plūduri.
2. Lyginant su VVJ, panaudotas menčių atakos kampo reguliavimo mechanizmas.
3. Lyginant su VVJ, panaudotas rotorius pastatymo prieš vėją (krypties valdymo) mechanizmas;
4. Lyginant su VVJ, panaudota greičių dėžė, atskira aušinimo ir tepimo sistema.
5. Dėl bendros masyvios konstrukcijos, pamatinė konstrukcija yra gerokai didesnė negu VVJ.
6. Ilgų menčių ir bokšto transportavimo bei logistikos darbų sudėtingumas.
7. Sudėtingesnė ir didesnių kaštų reikalaujanti kabinos techninė priežiūra. Keičiant tokius agregatus kaip generatorių ar greičių dėžę, kurių masė sumoje lygi 100–200 tonų, reikalingi atitinkamo dydžio kranai ir transportavimo įranga.

1.3. Aerodinamikos teorija

1.3.1. Aerodinaminių charakteristikų nustatymas

Profilio formą apibrėžia šie parametrai (13 pav.): stygos ilgis „ c “, priekinės briaunos ovalumas, išgaubtumas nuo stygos ir jo tipas „ δ “, profilio maksimalus storis „ t “ bei jo padėtis stygos atžvilgiu. Pagrindiniai profilio parametrai aprašomi dviem jėgomis: keliama „ L “ bei pasipriešinimo „ D “. Primoji, statmena skridimo kryptiai, atsiranda dėl nevienodo srauto aptekėjimo greičio profilio viršutinėje ir apatinėje dalyse, sukuriant slėgio skirtumą, taip pat dėl srauto nukreipimo kinetinės jėgos dedamosios, esant didesniems atakos kampams. Atsirandančių jėgų vektoriai veikiantys per visą profilio ilgį susumuojami ir atidedami slėgio centre „ CoP “. Esant net menkiausiam procentiniam slėgių skirtumui, fiksuoto ploto sparnas generuoja labai didelę keliamąją jėgą, nes slėgis jūros lygyje siekia 10^5 N/m^2 [30].



13 pav. Aerodinaminio profilio eskizas ir parametrai

Pasipriešinimo jėga, lygiagreči skridimo kryptiai, atsiranda dėl priekinės briaunos teigiamo slėgio, turbulentinio srauto virsmo padėties ir srauto paviršiaus trinties. Molekulinė trintis atsiranda dėl dujų klampumo savybių. Esant didesniai aptekančiam srauto greičiui, pasipriešinimo jėgos koeficientas „ C_D “ mažėja, dujų molekulių kinetinė energija įgyja didesnę vertę ir labiau nugali klampos jėgas, tuo pačiu gerėja bendros profilio aerodinaminės savybės. Inercijos ir klampos jėgų santykį nusako bedimensinis „ $Reynolds$ “ skaičius, žymimas raidėmis „ Re “ [30, 31]:

$$Re = \frac{\rho V c}{\mu} \quad (1)$$

čia:

ρ – aptekančio srauto tankis [kg/m^3];

V – srauto greitis [m/s];

c – styga [m];

μ – dinaminės klampos koeficientas [$\text{Pa}\cdot\text{s}$].

Kitas svarbus parametras – sukimo momentas „ M “ (13 pav.), atsiranda dėl aerodinaminio centro ir slėgio centro padėties skirtumo, kurio reikšmė priklauso nuo profilio formos bei atakos kampo „ α “. Ši savybė VJ mentėje svarbi tik dėl atsparumo ir standumo skaičiavimų.

Pagrindines aerodinamines charakteristikas nusakančios jėgos ir jų koeficientai [30, 31]:

$$\{L, D\} = \frac{\rho V^2 A}{2} \{C_L, C_D\} \quad (2)$$

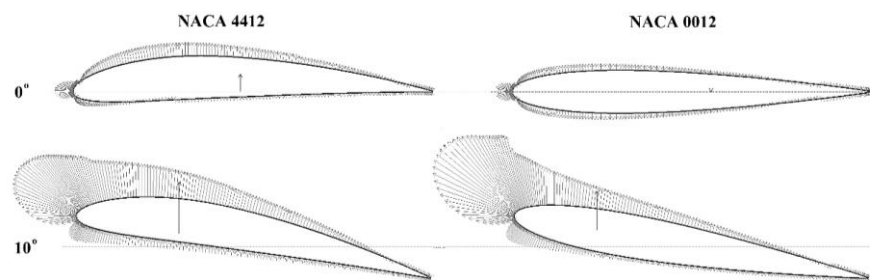
čia:

C_L – keliamosios jėgos koeficientas;

C_D – pasipriešinimo jėgos koeficientas;

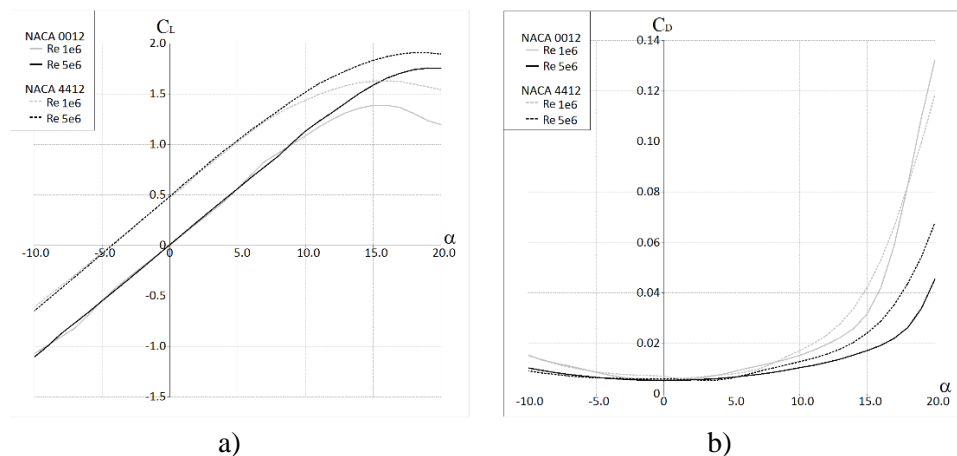
A – sparno plotas [m^2].

Paminėti koeficientai dažniausiai randami eksperimentiškai – aerodinaminame vamzdyje, kuriame tyrimo metu gaunami jėgų ir slėgio parametrai. Profilio paviršiuje slėgis pasiskirsto nevienodai, priekyje susidaro teigiamo slėgio zona, viršutinėje dalyje – išretėjusi, apatinėje išlieka tokia pat arba padidėja, priklausomai nuo atakos kampo. Besisukančios VVJ aplink savo ašį atakos kampo vertė nuolatos svyruoja ($-15^\circ + 15^\circ$), tuo pačiu atitinkamai keičiasi ir slėgio pasiskirstymas, kuris lemia keliamosios bei pasipriešinimo jėgų dedamąsias. Toliau pateiktame paveiksle (14 pav.) palyginamas dviejų profilių „NACA 4412“ (išgaubto) ir „NACA 0012“ (simetrinio) su 12 % santykinio storio slėgių pasiskirstymas esant 0 ir 10 laipsnių atakos kampui.



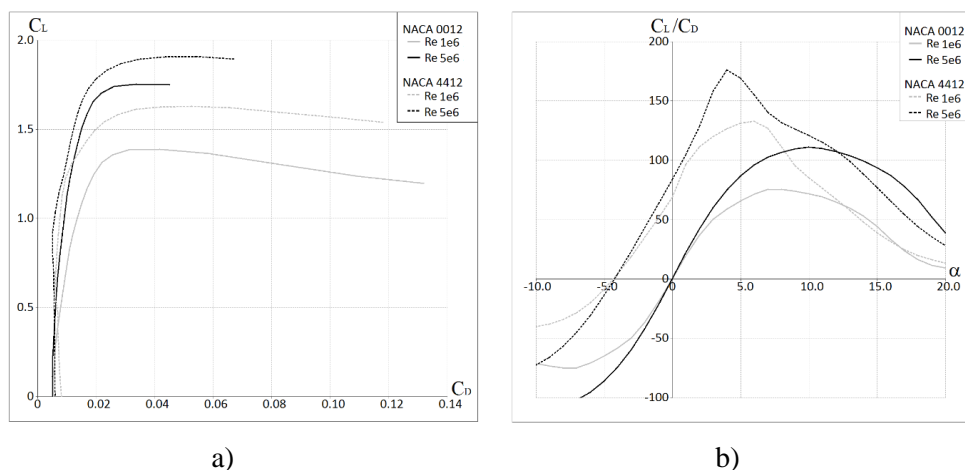
14 pav. Slėgio pasiskirstymo palyginimas esant 0° (viršuje) ir 10° (apačioje) atakos kampams

Atliekant šių profilių tyrimus esant 10^6 ir $5 \cdot 10^6$ „ Re “ reikšmėms ir atakos kampų $-10^\circ + 20^\circ$ diapazone, gaunamos keliamosios ir pasipriešinimo jėgų koeficientų reikšmės – „ C_L “, „ C_D “ bei grafikai (15 pav.). Punktyrinė linija vaizduoja „NACA 4412“ profilį, kurio „ C_L “ vertė esant 0° kampui lygi 0.5, tuo tarpu simetrinio „NACA 0012“ profilio reikšmė lygi 0. Taip pat grafike matome skirtingą kritinį atakos kampą, kuriam esant „ C_L “ pradeda mažėti. Išgaubto profilio maksimalios „ C_L “ reikšmės yra didesnės, tačiau prie neigiamų atakos kampų – blogesnės charakteristikos. Paveikslo b) dalyje matome profilio pasipriešinimo koeficiento priklausomybę nuo atakos kampo, kuriam didėjant „ C_D “ reikšmė eksponentiškai auga, tačiau esant didesniai „ Re “ skaičiui, pasipriešinimo koeficientas mažesnis lyginant konkretų atakos kampą. Išgaubto profilio neigiamuose atakos kampuose pasipriešinimo koeficiento reikšmė dvigubai didesnė. Šios abi „ C_L “ ir „ C_D “ parametų priklausomybės nuo atakos kampų labai svarbios norint tinkamai parinkti profilius VVJ mentėms bei juos optimizuoti esant atitinkamoms „ Re “ reikšmėms.



15 pav. Keliamosios (a) ir pasipriešinimo (b) jėgų koeficientai nuo atakos kampų

Profilio poliarė (16 pav. a) yra pagrindinis kriterijus, pagal kurią galima nustatyti šias reikšmes: iš koordinatų pradžios taško išvesta liestinė su poliare vaizduoja didžiausią kokybės kampą, lygiagreti „x“ ašiai liestinė – kritinį atakos kampą, lygiagreti „y“ ašiai liestinė – mažiausio pasipriešinimo kampą, kai poliarė kerta „x“ ašį – nulinės keliamosios jėgos kampą. Profilio poliarė gaunama dažniausiai pritaikant skaičiavimo metodus tokius kaip panelinį, baigtinių elementų ir kt.. Aerodinaminės kokybės nuo atakos kampo grafikas (16 pav. b) gaunamas iš tų pačių kintamųjų kaip poliarės, tačiau šiuo atveju „y“ ašis atitinka „ C_L “ ir „ C_D “ santykį. Tokiu būdu aiškiau matoma priklausomybė nuo atakos kampo bei lyginamųjų profilių pranašumas. Palyginant anksčiau minėtus „NACA“ profilius, matoma žymiai didesnė išgaubto profilio kokybė mažuose teigiamuose atakos kampuose.



16 pav. Profilio poliarė (a) ir profilio kokybė (b) nuo atakos kampų

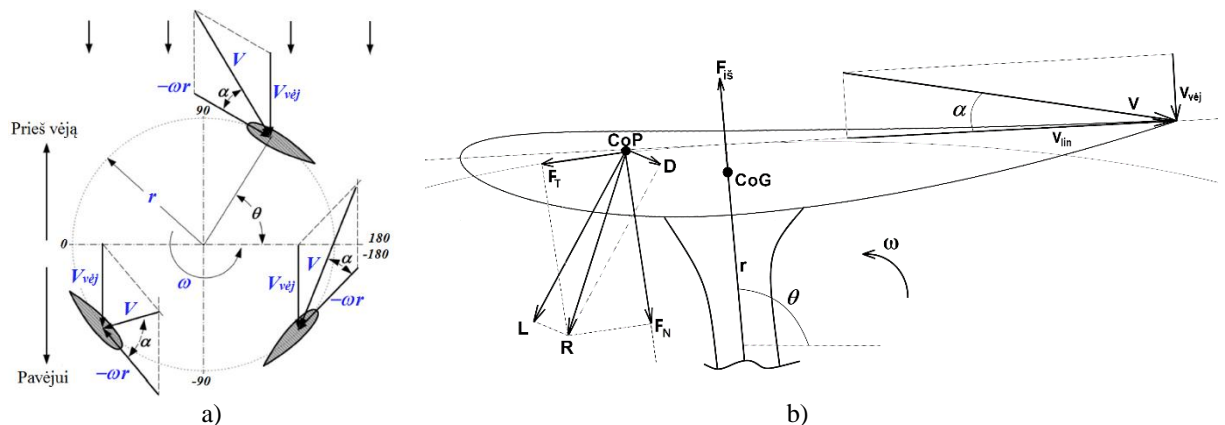
Jeigu tomis pačiomis sąlygomis lygintume sparno ir profilio kokybę, pastebėtume, kad ji skiriasi keletą kartų. Modernių sklandytuvų sparno aerodinaminė kokybė siekia 50–70, tuo tarpu profilių 150–200. Toks skirtumas atsiranda dėl papildomų pasipriešinimo jėgos dedamųjų – indukcinio, interferencinio ir padidėjusio paviršinės trinties. Sparno poliarės ir kokybės grafikai gaunami dviem būdais – eksperimentiškai, apipūtus sparną aerodinaminiame vamzdyje arba apskaičiuojant atitinkamos paskirties programomis [31].

1.3.2. Vertikalios ašies vėjo jėgainių aerodinamika

Vertikaliųjų vėjo jėgainių aerodinamika remiasi tuo pačiu sparno sukuriamų keliamosios ir pasipriešinimo jėgų principu, kaip lėktuve. Tačiau, besisukančios jėgainės mentės patiria skirtingas srauto aptekėjimo bei atakos kampų reikšmes, nes sukantis apie centrinę ašį, vienoje dalyje mentė skrieja prieš vėją, kitoje – pavėjui. Dėl šio reiškinio aptekančio srauto dedamoji „ V “ ir jos kryptis (atakos kampas) „ α “ nuolat kinta (17 pav. a). Atsižvelgiant į profilių aerodinamines charakteristikas ir jų efektyvius atakos kampus, VVJ panaudojime galimi du profilių tipai: simetriniai ir nesimetriniai. Pirmieji turi platų atakos kampą – apytikriai 30° , antrieji siauresnį – $15\text{--}20^\circ$. Vienas pagrindinių VVJ parametrų yra santykinis sukimosi greitis, kuris lygus linijinio mentės greičio ir vėjo greičio santykiui – „ TSR “ (angl. Tip Speed Ratio) [17, 32]:

$$TSR = \frac{V_{lin}}{V_{v\acute{e}j}} \quad (3)$$

Linijinis mentės greitis priklauso nuo sukimosi greičio – kampinio greičio „ ω “ ir jėgainės spindulio „ r “ sandaugos. Kuo didesnis linijinis greitis, tuo didesnis „ TSR “ santykis, todėl aptekantis srautas patiria mažesnį vėjo greičio poveikį – mažesnį aptekančio srauto kitimą bei mažesnį atakos kampų pokytį. Kitas svarbus reiškinys yra slėgio centro padėties slinkimas stygos atžvilgiu esant atakos kampo nepastovumui. Ši savybė mentėje sukelia jėgų ir momentų nepastovumą, kuris lemia skirtingus lenkimo bei sukimo momentus [17, 32].

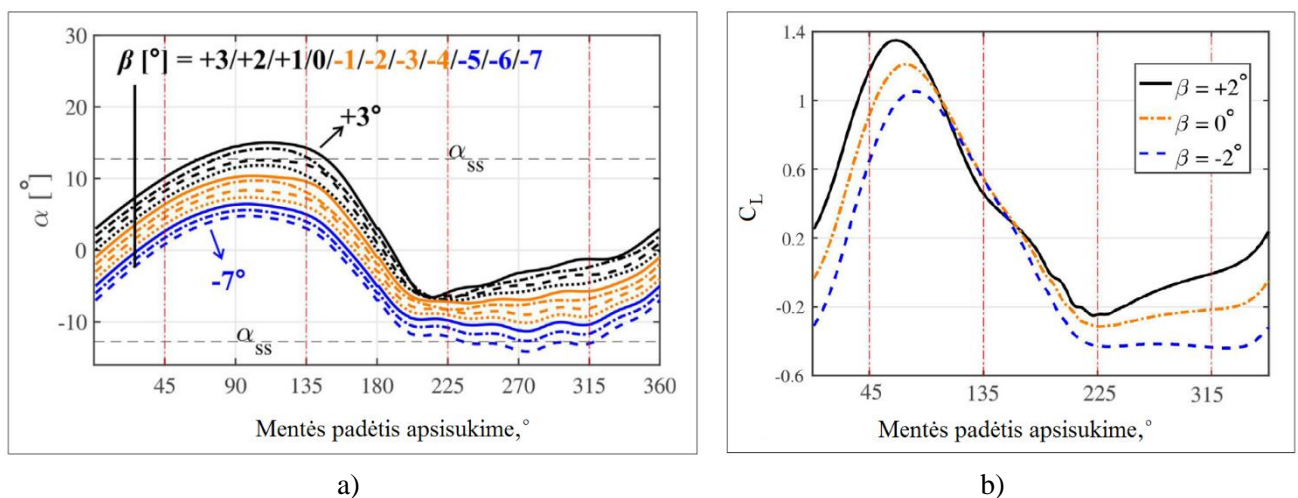


17 pav. VVJ sukimosi aplink ašį ir srauto pasiskirstymo dedamosios, eskizas (a) [33]. Mentės ir veikiančių jėgų eskizas (b)

Taip pat žinome savybę, kad keliamoji jėga „ L “ yra visada statmena srauto kryptčiai, o pasipriešinimo „ D “ – lygiagreti, todėl kintant atakos kampui, „ L “ ir „ D “ pakrypsta atitinkamu kampu ir sudaro skirtingas normalios jėgos „ F_N “ ir tangentinės jėgos „ F_T “ reikšmes, kurios nukreiptos į sukimosi ašį ir statmenai jos, atitinkamai. Išsamesnis aptekančio srauto dedamosios, visų jėgų pasiskirstymo, kampų ir kitų parametrų skaičiavimo algoritmas bus pateiktas 3.1.2. skyriuje [17, 32].

Mažos galios VVJ, kurios spindulys siekia 2–5 metrų (1–10 kW) ir priimant apytikrį jėgainių darbo režimo diapazoną (5–15 m/s), atakos kampo diapazono plotis gali siekti 40°, tuo tarpu didesnių galių jėgainėse su 10+ m spinduliu (50 kW +), „ α “ plotis siekia 20° ir mažiau. Šis reiškinys yra vienas pagrindinių kodėl didesnių galių VVJ aerodinaminis efektyvumas yra geresnis nei mažesnių. Tuo pačiu didesnę stygą turinčios mentės ir dirbančios greituose srauto reikšmėse, lemia didesnes „*Reynolds*“ reikšmes, kurios siejasi su geresnėmis sparno aerodinaminėmis charakteristikomis [17, 32].

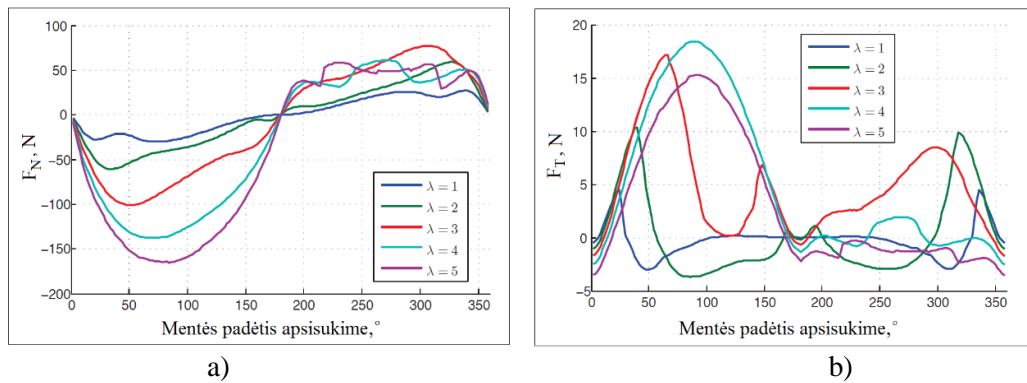
Vertikalios vėjo jėgainės patiria teigiamas ir neigiamas keliamosios jėgos kryptis, tai ilgainiui nuvargina laikančiąją konstrukciją ir pačią mentę. Turint 20° atakos kampo plotį, teoriškai būtų galima „sutilpti“ teigiamose reikšmėse, todėl galima tirti ne tik simetrinius profilius, bet ir nesimetrinius, kurie generuotų vienos krypties keliamąją jėgą. Plačiau ši savybė bus aptarta 3.2.1. skyriuje. Toliau pateiktame tyrime [34] buvo analizuojamas mažos galios (200 W) VVJ efektyvumas, nuo mentės pastatymo kampo „ β “, naudojant simetrinį „*NACA0015*“ profilį ($Re = 10^5$). Galime matyti kaip kinta atakos kampo reikšmės viename mentės pasisukime (18 pav. a). Turint gerų savybių profilį ir siaurą darbo režimo „ α “ plotį, galima disponuoti mentės pastatymo kampa, randant geriausią „ C_L/C_D “ santykio vertę. 18 pav. b) dalyje matome „ C_L “ reikšmes apsisukimo metu ir jų skirtumą pritaikius -2, 0, +2 „ β “ vertes. Taip pat galime prisiminti, kad didesnės atakos kampų reikšmės gali lemti atstojamosios jėgos „ R “ posvyrį, tuo pačiu – didesnes „ F_T “ vertes. Todėl, atliekant profilių analizę, bus bandoma rasti teigiamas „ C_L/C_D “ reikšmes, platų „ α “ diapazoną ir kuo didesnes kritines atakos kampo reikšmes [34].



18 pav. Atakos kampo (a) ir „ C_L “ (b) pokytis mentės apsisukimo metu, esant skirtingam „ β “ [34]

Vienas svarbiausių jėgainės faktorių yra geros aerodinaminio profilio charakteristikos prie plataus atakos kampo spektro, nes viršijus kritines reikšmes, keliamoji jėga mažėja, o pasipriešinimo didėja, sumoje gaunant staigiai krentančią profilio aerodinaminę kokybę. Visa tai lemia tangentinės jėgos „ F_T “ ir bendrą jėgainės efektyvumo kritimą. Toliau pateiktame tyrime (19 pav.) buvo analizuojama mažos galios (~1 kW) jėgainė su simetriniu „*NACA0021*“ profiliu. Galime matyti kaip esant neefektyvioms

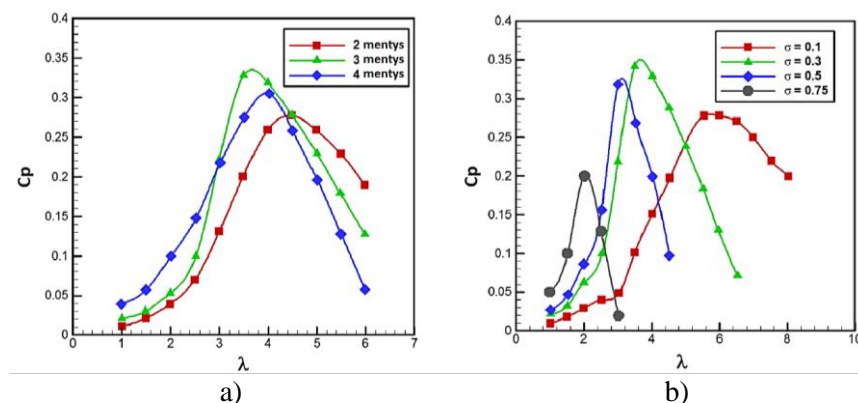
„ TSR “ reikšmėms, dar literatūroje žymimoms simboliu „ λ “, krenta tangentinės jėgos reikšmės (19 pav. b). Taip pat esant žemoms „ TSR “ reikšmėms, „ F_N “ jėgų vertės rodo sparnuotės blogai generuojamą keliamąją jėgą, dėl kritinių atakos kampų viršijimo (19 pav. a). Taip pat, dėl simetrinio profilio panaudojimo galime matyti ir teigiamas ir neigiamas „ F_N “ reikšmes, kurių turėtų būti vengiama projektuojant didelių galių VVJ. Nevienodos krypties keliamoji jėga buvo vienas pagrindinių faktorių kodėl jėgainės patirdavo medžiagų nuovargį. Tai lėmė trumpą eksploatacijos laiką ir neturėjo pasisėkimo rinkoje [35].



19 pav. Vienos mentės sugeneruojamos „ F_N “ (a) ir „ F_T “ (b) jėgos mentės apsisukimo padėtyje bei skirtingų „ TSR “ reikšmių palyginimas[36]

Vertikalių vėjo jėgainių efektyvumas taip pat priklauso nuo jėgainės vientisumo parametro „ σ “, kuris aprašomas menčių skaičiaus „ N “, spindulio „ r “ ir stygos „ c “ santykiu [32, 37]:

$$\sigma = \frac{N \cdot c}{r} \quad (4)$$



20 pav. Galios koeficiento priklausomybė nuo menčių skaičiaus (a) ir vientisumo parametro (b) [37]

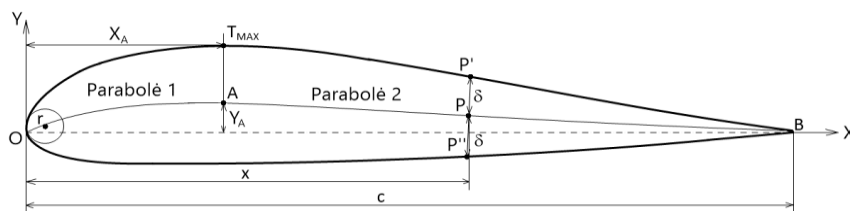
Visa tai turi sąsają su aerodinaminio šešėlio efektu. Kuo mažesnis vientisumas, tuo jėgainė yra efektyvesnė bei turi geresnes savybes esant didesnėms „ TSR “ reikšmėms. Galime matyti kaip kinta galios koeficiento „ C_P “ (tiesioginis jėgainės efektyvumo parametras) reikšmės nuo menčių skaičiaus (20 pav. a) ir vientisumo parametro (b) [32, 37]. Trijų menčių skaičius yra optimalus dėl sukimo momento tolygumo ir bendro jėgainės efektyvumo, o vientisumo parametro reikšmė siektina kuo mažesnė.

1.3.3. „NACA“ profilių geometrijos skaičiavimo metodika

Tyrinėjant profilius buvo norima aerodinamines priklausomybes nuo storio bei maksimalios padėties reikšmės, stygos atžvilgiu. Ši priklausomybė buvo apibrėžta tyrinėjant simetrinį profilį, kurio išgaubtumas lygus 0. Remiantis dviem pavykusiais profiliais „Clark Y“ ir „Gottigen 398“, „NACA“ išvedė storio priklausomybės funkciją, kur „ c “ – stygos ilgis, „ t “ – maksimalus storis [38]:

$$\delta = \pm t \left[1.4845 \sqrt{\frac{x}{c}} - 0.63 \frac{x}{c} - 1.758 \left(\frac{x}{c} \right)^2 + 1.4215 \left(\frac{x}{c} \right)^3 - 0.5075 \left(\frac{x}{c} \right)^4 \right] \quad (5)$$

Kai atstumas „ x “ iki „ δ “ lygus nuliui, išvestinė „ $d\delta/dx$ “ lygi begalybei. Kai $x = c$, delta reikšmė lygi $\pm 0.0105t$ ir tai reikštų visiškai smailų profilį. Kai $x = 0.3c$, išvestinė „ $d\delta/dx$ “ tampa neapibrėžta ir delta reikšmė tampa maksimali – $0.5t$. Tuo tarpu priekinis apvalumas randamas $1.1 \cdot t^{2/c}$, kai $x = 0$. Bet kokia „NACA“ nesimetrinio profilio forma gali būti pilnai nusakyta keturių ar penkių skaičių sekos. Pirmas skaičius reprezentuoja atstumo „ Y_a “ šimtąją dalį stygos atžvilgiu, antras skaičius atstumo „ X_a “ dešimtąją dalį, paskutiniai du – maksimalaus storio šimtąją dalį. Paimkime „NACA 4412“ profilio pavyzdį, kurio šifravimas yra toks: $Y_a = 0.04c$, $X_a = 0.4c$ ir storis $t = 0.12c$. Penkių skaitmenų profilis skiriasi tik tuo, kad vidurinis skaičius reprezentuoja profilio išgaubtumo pobūdį. Jei lygus 0, profilio išgaubtumas – įprastasis, jei lygus 1, išgaubtumas – „refleksinis“ [38].



21 pav. Keturių skaitmenų „NACA 4412“ profilis ir jo geometrinės reikšmės [38]

Profilis bei jo skaičiuojamosios geometrinės reikšmės pavaizduotos 21 paveiksle. Išgaubtumo linija sudaryta iš dviejų parabolė – priekinės nuo taško „O“ iki taško „A“ ir galinės nuo taško „A“ iki „B“. Jei taško „A“ koordinatės yra išreikštos reikšmėmis „ X_a “ ir „ Y_a “, tai dviejų parabolė išraiškos lygios formulėse 6, 7 [38]:

$$y = \frac{Y_A}{X_A^2} x(2X_A - x) \quad , \text{ kai } 0 \leq x \leq X_A \quad (6)$$

$$y = \frac{Y_A}{(c - X_A)^2} (c - X)(c + x - 2X_A) \quad , \text{ kai } X_A \leq x \leq c \quad (7)$$

Žinant profilio stygą ir profilio storį, kreivumo storio parametro „ δ “ reikšmė gali būti randama kiekviename stygos ilgio taške. Pritaikius atitinkamą profilio elementų tikslumą, galimas viso profilio geometrijos apibrėžimas X ir Y koordinatėse. Skirtingos klasės profilių geometrijos apibrėžimo metodika remiasi kitomis empirinėmis formulėmis, patvirtintomis aerodinaminiais eksperimentais.

2. JĖGAINĖS EFEKTYVUMĄ LEMIANTYS VEIKSNIAI

2.1. Žemės paviršiaus šiurkštumas ir aukštis

Paviršiaus šiurkštumas mikro ir makro pasaulyje sukelia aptekancio oro srauto kinetinius nuostolius. Mikroskopiniame lygyje jis pasireiškia dėl oro klampumo, atsiranda paviršiniai tarp molekuliniai įtempiai, šis reiškinys dar vadinamas adhezija. Ties sparno profilio paviršiumi aptekantis srautas pradeda lėtėti, susidaro sūkurių, prarandama oro srauto kinetinė energija. Šis sulėtėjimas aerodinamikoje vadinamas paribio sluoksniu. Žemės paviršiuje šiurkštumas nusakomas didesnėje skalėje. Įvertinamas pastatų aukštis ir tankumas, krūmynai, medžiai, daugiabučiai, dangoraižiai ir t.t.. Visa tai sudaro trintį bei turbulenciją, kuri atima iš srauto kinetinę energiją [3, 31, 32 38].

Vėjo energetikoje norima išgauti kuo didesnę energiją iš to paties ploto. Todėl, projektuojant jėgaines įvertinamas rotorius aukštis, parenkama optimaliausia geografinė vieta pagal vėjo stiprumo statistiką bei įvertinamas reljefo paviršiaus šiurkštumas (3 lentelė).

Lentelė 3. Šiurkštumo klasės klasifikavimas [3]

Šiurkštumo klasė, „Roughness class”	Šiurkštumo matmuo „z ₀ “, m	Aplinka
0	0.0002	Vandens paviršius
0.5	0.0024	Atviras lygus laukas, oro uostai, nupjauta žolė, smėlynas
1	0.03	Atvira dirbama žemė, žema tvora, labai retas namų išsidėstymas
1.5	0.0055	Ūkinės paskirties žemė, tvoros, pasėliai, 8 metrų aukščio namai, 1.25 km atstumu vienas nuo kito
2	0.1	Ūkinės paskirties žemė, tvoros, pasėliai, 8 metrų aukščio namai, 0.5 km atstumu vienas nuo kito
2.5	0.2	Ūkinės paskirties žemė, tvoros, pasėliai, krūmai, 8 metrų aukščio namai, 0.25 km atstumu vienas nuo kito
3	0.4	Kaimai, maži miesteliai, ūkinės paskirties žemė, miškai
3.5	0.8	Didmiesčiai su vidutinio aukščio pastatais
4	1.6	Didmiesčiai su aukštais pastatais ir dangoraižiais

Vėjo greičio sąryšis su aukščiu aprašomas pagal natūrinio logaritmo funkciją [3]:

$$v = \frac{v_{atsk}}{\ln\left(\frac{h_{atsk}}{z_0}\right)} \cdot \ln\left(\frac{h}{z_0}\right) \quad (8)$$

čia:

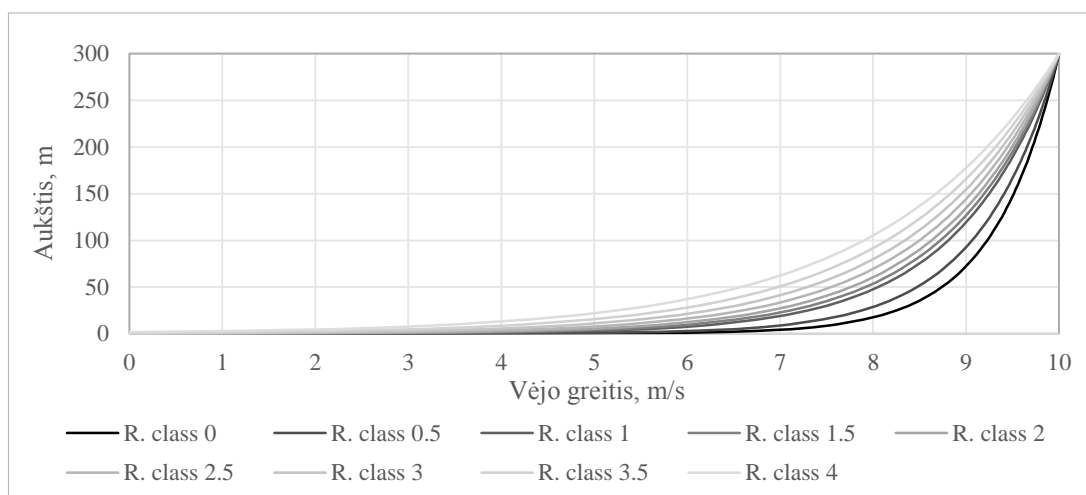
V_{atsk} – atskaitos taško vėjo greitis [m/s];

h_{atsk} – atskaitos taško aukštis [m];

z_0 – šiurkštumo matmuo [m];

h – parinktas aukštis [m].

Vėjo greičio priklausomybė nuo aukščio esant skirtingoms šiurkštumo klasėms pavaizduota 22 iliustracijoje, kur juoda spalva žymi 0 klasę, šviesiausia pilka – 4 klasę. Galime palyginti 50 m aukštį, kuris apytikriai galėtų būti priskirtas didelės galios VVJ vidutiniam aukščiui. Jūros vandens paviršius priskiriamas 0 klasei, tuo tarpu jėgainių parkai sausumoje priskiriami 1.5–2.5 klasei. Esant 0 klasei, vėjo greitis tokiam aukštyje siekia 8.5 m/s, tuo tarpu 1.5 klasės – 7.9 m/s, 2.5 klasės – 7.5 m/s. Nors 1 m/s skirtumas atrodo nedidelis, galios skaičiavimuose siejamas trečiuoju laipsniu (žr. 10 formulę) ir būtent šiuo atveju siekia 30 % generuojamos galios skirtumui [3].

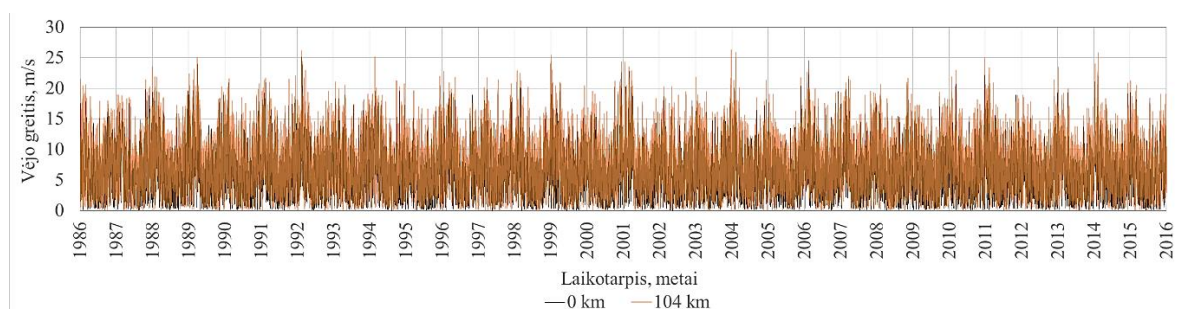


22 pav. Žemės paviršiaus šiurkštumo „Roughness class“ poveikis vėjo greičiui nuo aukščio

Projektuojant HVJ stengiamasi kuo aukščiau iškelti sparnuotę, tačiau šis sprendimas sukelia daug inžinerinių kliūčių – aukšta masės centro padėtis, per didelė apkrova bokštui ir sparnuotei, kuri siejasi su medžiagų atsparumo galimybėmis. Šiuolaikinių technologijų VJ rotorius skersmuo siekia 100–130 m. VVJ sparnuotės aukštis lyginant su HVJ yra mažesnis, bet efektyvios reikšmės nėra tiksliai apibrėžtos, nes galimi įvairūs VVJ tipai ir menčių išdėstymas. Tačiau, VVJ pritaikomumas jūroje turi dideles perspektyvas, kur yra nustatytas 0 klasės šiurkštumas – vėjo greitis turi didesnę vertę mažesniuose aukščiuose. Svarbu paminėti, kad palyginus mentės apatinę ir viršutinę padėtis, vėjo dedamoji gali skirtis ~1 m/s, tuo pačiu atsirastų ir efektyvių „TSR“ reikšmių nesutapimas bei skirtingos „ F_T “ ir „ F_N “ reikšmės mentės ilgyje. Tačiau, visas šias neigiamas savybes galime išspręsti suprojektuojant atitinkamas sparno geometrijas [3, 17, 37].

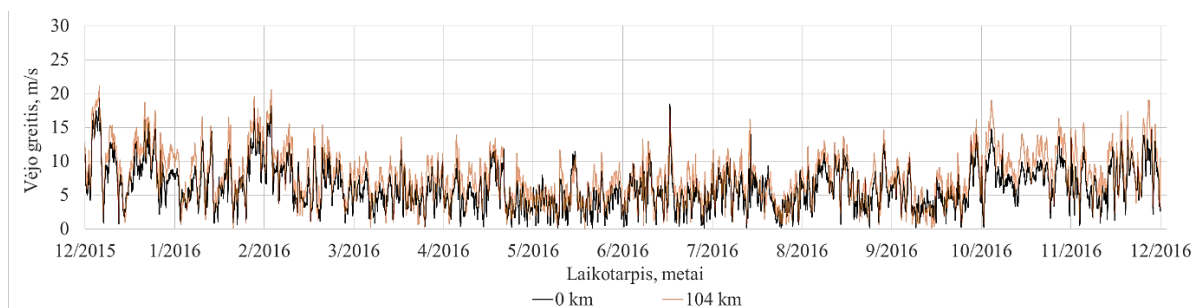
2.2. Vėjo energija Baltijos jūroje

Norint įvertinti Baltijos jūros vėjo energetinį potencialą, buvo naudojama laisvai prieinama duomenų bazė [39], teikianti vėjo, bangavimo ir temperatūros duomenis, jūrų ir vandenynų regionuose. Šiame tyrime buvo analizuojamas vėjo greitis Lietuvos Respublikos jūrinėje teritorijoje. Pirminis atskaitos taškas (0 km nuo kranto) buvo pasirinktas Palangos krantas. Matavimai daryti 13 km atstumu, statmena krantui kryptimi – į jūros pusę. Duomenų bazėje vėjo greičio duomenys buvo pateikti valandos tikslumu, vidutine reikšme, 10 m aukštyje. Tiriamas laikotarpis – 30 metų, nuo 1986 iki 2016. Toliau pateiktame grafike (23 pav.) galime matyti vėjo pasiskirstymą 30 metų bėgyje, prie kranto ir 104 km atstumu į jūrą. Taip pat galime išvelgti pasikartojantį reiškinį – fluktuaciją, kai vėjo greitis šaltuoju sezonu sustiprėja, šiltuoju – susilpnėja [39].



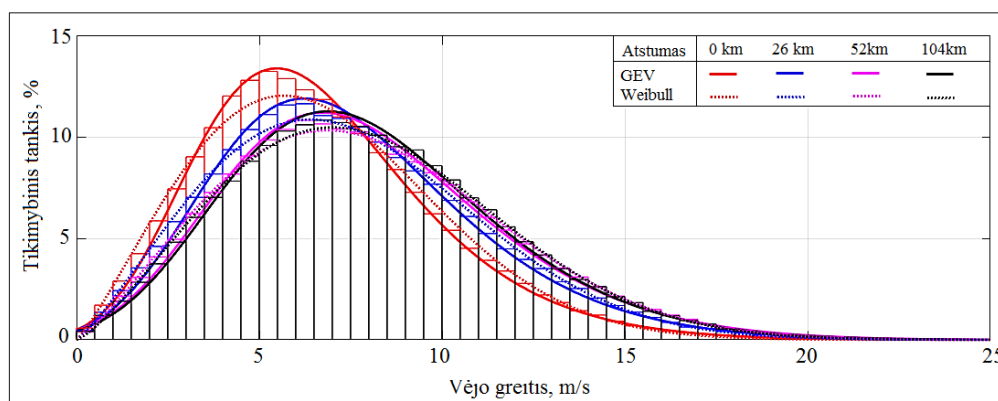
23 pav. Vėjo greičio pasiskirstymas Lietuvos Respublikos jūrinėje teritorijoje, 1986-2016 metais

Vėjo greičio pasiskirstymas mėnesių bėgyje pateiktas 24 iliustracijoje. Galime matyti 104 km atstumo (oranžinė spalva) vėjo greičio vertes, kurios yra didesnės lyginant su 0 km (juoda spalva). Taip pat šaltuoju sezonu dažniau pasireiškia stiprus vėjas (15–20 m/s) ir srauto nepastovumas.



24 pav. Vėjo greičio pasiskirstymas, 2015-2016 metais

Šio tyrimo tikslas buvo sužinoti, kokios metinės vidutinio greičio reikšmės pasireiškia Lietuvos Respublikos jūrinėje teritorijoje. Taip pat buvo įvertintos maksimalios vėjo greičio vertės ir pritaikytas vienas svarbiausių elementų – statistinis skirstinys, naudojant programą „*Matlab*“, kuris nusako jėgainės efektyvių darbo režimų diapazoną, vėjo greičio atžvilgiu. Iš skirstinio taip pat galima apskaičiuoti metinės teorinės generuojamos galios vertes, vidurkį ir dažniausiai pasireiškiantį vėjo dydį – skirstinio modą.



25 pav. Vėjo greičio tikimybiniis pasiskirstymas. Pateikti 8 statistiniai skirstiniai 0–104 atstumu nuo kranto, Lietuvos Respublikos jūrinėje teritorijoje 1986–2016 metais

Vėjo greičio statistikos palyginimas pateiktas 25 paveiksle, kur vaizduojami 4 skirstiniai, išsidėstę nuo 0 iki 104 km atstumu nuo kranto. Galime matyti, kad tolstant į jūrą, kreivės pasislenka į dešinę, kur dažniau pasitaiko stipresnių vėjo greičių vertės. Taip pat galima paminėti: esant 52 km ir 104 km atstumui, skirstiniai praktiškai nesiskiria. Galime daryti prielaidą, kad vėjo energija jūroje nusistovi ir išlieka panaši, taip pat, kad tarp kranto ir 52 km atstumo, pasireiškia „kranto efektas“, panašiai kaip mikro aerodinamikoje – su paribio sluoksniu, kai vėjo energija pamažu pradeda mažėti. Tyrimo metu buvo pritaikyti „GEV“ (angl. Generalized Extreme Value) ir „Weibull“ skirstinių modeliai, tačiau lyginant duomenų statistinį vidurkį tiksliau atitiko „Weibull“. Išsamus skirstinių vidurkio reikšmių palyginimas pateiktas 4 lentelėje.

Lentelė 4. Vėjo greičio statistinė analizė ir skirstinių palyginimas (25 pav. duomenys)

Atstumas nuo kranto, km	Statistikos vidurkis, m/s	GEV skirstinio vidurkis, m/s	Weibull skirstinys vidurkis, m/s	Weibull skirstinio parametrai: c, k
0	6.679	6.671	6.681	7.543, 2.171,
26	7.465	7.456	7.466	8.430, 2.196
52	7.937	7.926	7.936	8.961, 2.229
104	7.983	7.974	7.979	9.008, 2.287

„Weibull“ skirstinio funkcija [3, 17, 37, 40]:

$$F(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right]} \quad (9)$$

čia:

k – formos parametras;

c – skalės parametras;

V – vėjo greitis [m/s].

Teorinės vėjo galios išraiška fiksuotam plotui [3, 17, 37, 41]:

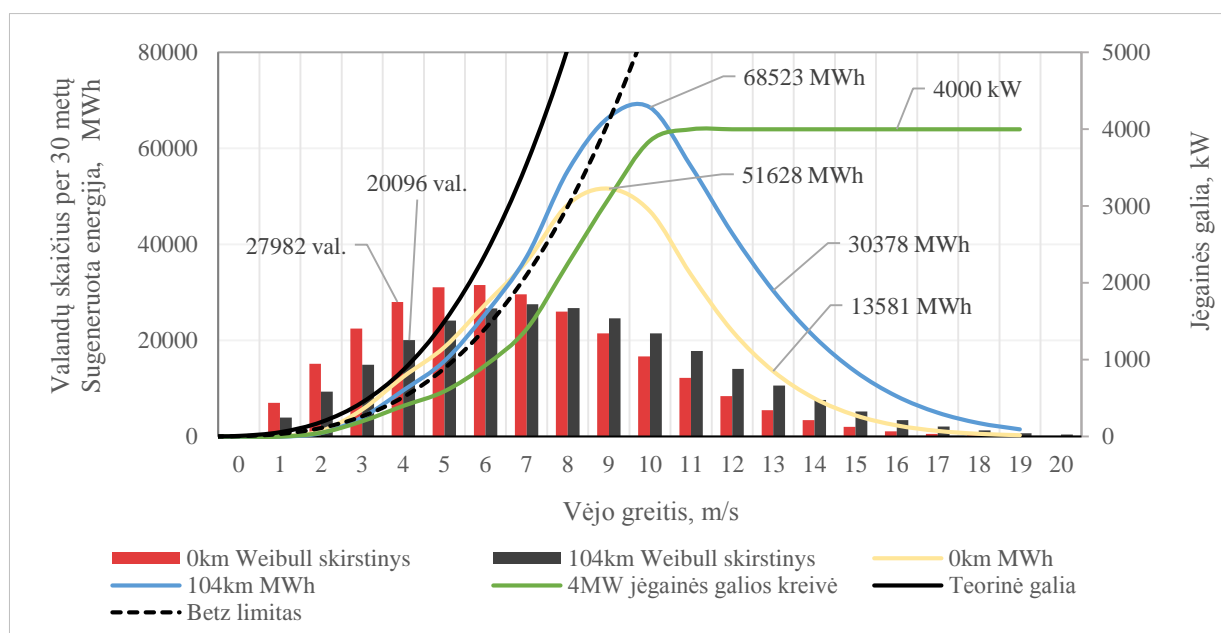
$$P = 0.5 \cdot C_P \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (10)$$

čia:

C_P –galios koeficientas – „jėgainės efektyvumo parametras“;

A – jėgainės rotoriaus plotas [m²].

Toliau buvo atliktas tyrimas, kiek viena jėgainė sugeneruotų energijos (GWh) per 30 metų. Žinant, kad duomenys buvo fiksuojami kas valandą (viso 263017 duomenų), tikimybių tankis buvo perskaičiuotas į valandų skaičių (26 pav. kairioji vertikali ašis), kur kiekvienas vėjo greitis atitinkamai turėjo valandų. Priimant 4 MW galios „Vestas“ jėgainės pavyzdį ir užrašant jos galios kreivę (žalia linija, dešinioji vertikali ašis – kW), buvo suskaičiuota sugeneruota energija pagal 0 km atstumo iki kranto skirstinį (geltona spalva) ir palyginta su 104 km (mėlyna linija). Taip pat 26 paveiksle juoda linija žymi teorinę vėjo galią išreikštą pagal 10 formulę, punktyrinė linija– „Betz“ limitas, 59.3% [3, 17, 39, 42].

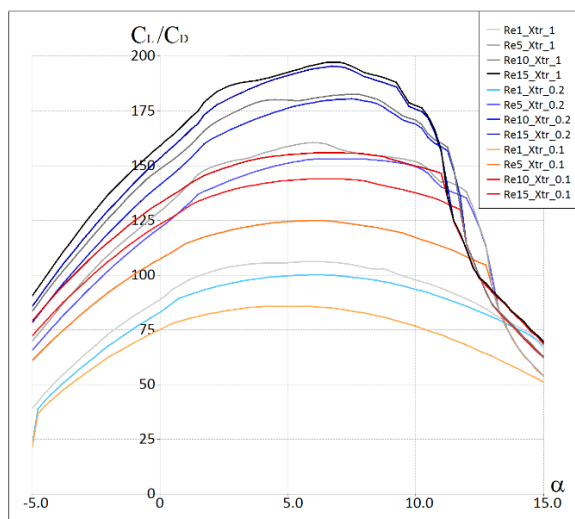


26 pav. Skirstinių, galios ir sugeneruotos energijos kreivės, per 30 metų laikotarpį

Tokiu būdu buvo gautas sugeneruojamos elektros kiekis bei pajamos per metus, priimant 50 eurų už megavatvalandę ir 4 MW jėgainės kainą – 7 mln. Eur [42]. Vienos, 4 MW jėgainės esančios sausumoje, sugeneruotos energijos kiekis per 30 metų siekia 338 GWh, o jūroje šis skaičius prilygsta 471 GWh. Apskaičiuotas vienos jėgainės atsipirkimo laikas: sausumoje siekia 12.5 metų, jūroje – 9 metus. Atliekant tolimesnius jėgainių ekonomiškumo skaičiavimus, reikėtų palyginti HVJ ir VVJ statybos ir eksploatacijos kainą, tačiau šiame darbe tai nebus nagrinėjama.

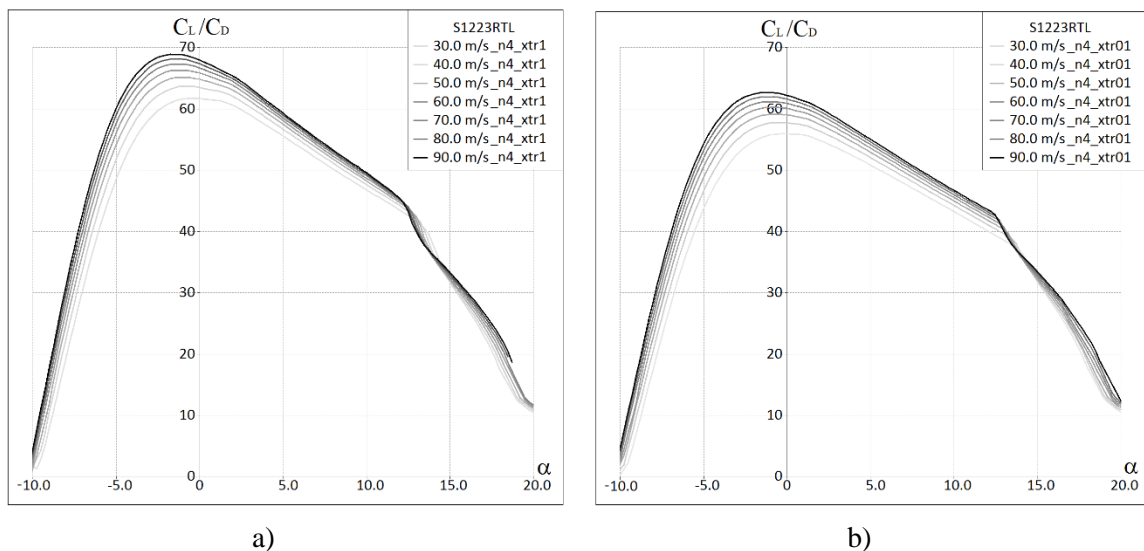
2.3. Sparnuotės šiurkštumas ir srauto greitis

Profilų ir sparno aerodinamikoje labai didelę reikšmę turi laminarinis srautas bei jo neatitrūkimas. Taikant laminarinius skaičiavimo modelius ir atliekant eksperimentus aerodinaminiuose vamzdžiuose, srautas pasiekiantis profilį yra labai nusistovėjęs bei tolygus. Tokiu būdu laminarinis srautas gali siekti iki 30–40 % stygos ilgio ir aerodinaminės savybės bus labai geros. Tačiau, eksploatacijos metu aplink sparnuotę aptekantis srautas neatitinka skaičiavimo modelių ar eksperimentų tuneliuose. Vienas pagrindinių faktorių, kodėl aplink sparnuotę neteka laminarinis srautas, yra ankstyvus srauto atitrūkimas ir virtimas į turbulentinį. Ši savybė siejasi su paribio sluoksnio dydžiu ir jo atsiradimu. Mentės užterštumas: vabzdžiai, gamybinis netikslumas, lietaus lašų korozija, ledo susidarymas ir kiti defektai, laikui bėgant pablogina mentės aerodinamines savybes. Todėl, projektuojant svarbu parinkti tinkamas charakteristikas ir metodus, tokiu būdu gerai įvertinant turbulentiškumą bei būsimą jėgainės efektyvumą visos eksploatacijos metu [30, 38].



27 pav. Profilio „S1223RTL“ kokybės priklausomybė nuo „Re“ ir priverstinio atitrūkimo vietos „Xtr“

Šiam tikslui buvo atlikta užterštumo parametro „ N_{crit} “ analizė naudojant „Xflr-5“ atviros paskirties programą, kur $N_{crit} = 9$ – neužterštas profilis, $N_{crit} = 4$ – vidutiniškai užterštas, $N_{crit} = 1$ labai užterštas. Remiantis atliktais skaičiavimais ir kitais tyrimais [43, 44], priimta naudoti $N_{crit} = 4$ reikšmę. Taip pat buvo analizuojama srauto priverstinio atitrūkimo vietos poveikis profilio charakteristikoms, kur $X_{tr} = 1$ – srautas laminarinis per visą profilio ilgį, $X_{tr} = 0.2$ – priverstinai atitrūksta ties 20 % stygos ilgiu, $X_{tr} = 0.1$ – ties 10 %. Skaičiavimo rezultatai pateikti 27 paveiksle, kur išskirti trys grafikų tipai: $X_{tr} = 1$, $X_{tr} = 0.2$, $X_{tr} = 0.1$. Taip pat pateiktas „Re“ mažėjimas nuo $15 \cdot 10^6$ iki 10^6 kiekvienu atveju. Galime matyti, kad didėjant „Re“, profilio kokybė didėja. Tuo tarpu palyginant priverstinį atitrūkimą ($X_{tr} = 0.1$) su nepriverstiniu ($X_{tr} = 1$), „ C_L/C_D “ santykis esant $Re = 15 \cdot 10^6$, skiriasi nuo 155 iki 195.

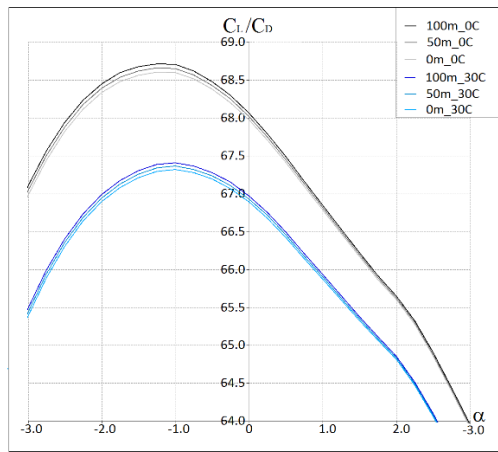


28 pav. Sparno „S1223RTL“ aerodinaminės kokybės priklausomybė nuo srauto greičio ir atitrūkimo parametro: a) $X_{tr} = 1$, b) $X_{tr} = 0.1$

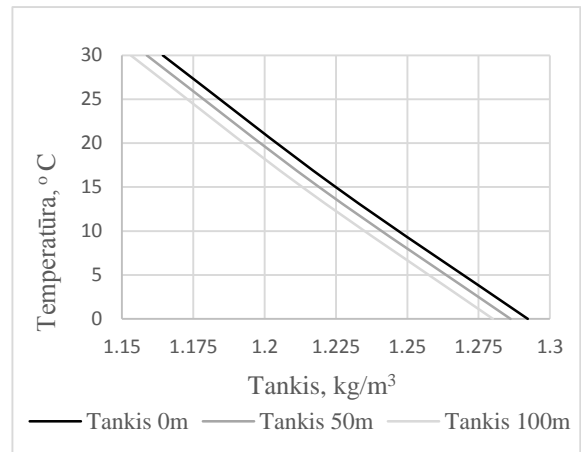
Aptekantis srauto greitis apie mentę taip pat turi įtakos jos aerodinaminėms charakteristikoms, nes profilis efektyviau dirba esant didesnėms „ Re “ reikšmėms, o savo ruožtu „ Re “ tiesiogiai susijęs su srauto greičiu (žr. 1 formulę). Todėl atlikus trimačio sparnui srauto greičio analizę, kurio ilgis – 80 m, vidutinė aerodinaminė styga – 1.5 m, profilis – „S1223RTL“, gauname aerodinaminės kokybės „ C_L/C_D “ 11% sumažėjimą (28 pav. juoda ir šviesiai pilka spalva). Taip pat 28 iliustracijoje palyginama ir trimačio sparno aerodinaminė kokybė esant skirtingiems atitrūkimo parametrui $X_{tr} = 1$ (a), $X_{tr} = 0.1$ (b). Galime matyti, kad kokybė apytikriai skiriasi nuo 69 iki 63 (8.7 %). Remiantis blogesniu efektyvumu ir kitais literatūros šaltiniais [43, 44], tolimesniuose skaičiavimuose visur priimta naudoti $X_{tr} = 0.1$ reikšmę.

2.4. Temperatūros ir aukščio poveikis aerodinamikai

Norint įvertinti temperatūros ir aukščio poveikį aerodinamikai, buvo atlikta atitinkama parametrinė analizė „Xflr--5“ programa. Tyrimui pasirinkta naudoti 0 ir 30°C vertes bei 0, 50, 100 metrų aukštį. Tyrimo metu buvo prietos išvados, kad aerodinaminės charakteristikos kinta dėl pasikeitusio oro tankio, bet ne dėl atmosferos slėgio sumažėjimo kylant aukštyn. Oro tankio vertę labiausiai lemia aplinkos temperatūra. Toliau pateiktame 29 paveiksle (a) galime matyti nežymų aerodinaminės kokybės kritimą dėl aukščio skirtumo, tačiau temperatūros mažėjimas lemia 1.89 % kokybės prieaugį dėl pasikeitusio tankio, (30°C mėlyna spalva – 67.4, 0°C juoda spalva – 68.7. Oro tankio priklausomybė nuo temperatūros ir aukščio pateikta 29 paveikslo b) dalyje, kur esant 30 laipsnių temperatūrai, tankis $\rho = 1.164 \text{ kg/m}^3$, tuo tarpu esant 0°C, $\rho = 1.292 \text{ kg/m}^3$.



a)



b)

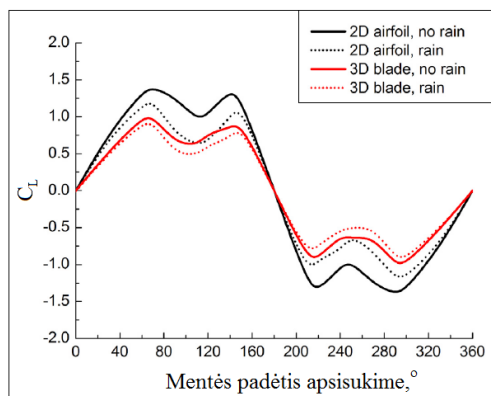
29 pav. Temperatūros ir aukščio poveikis aerodinamikai. Kokybės grafiko kitimas (a), tankio kitimas (b)

Taip pat oro poveikio tankiui didelę reikšmę gali turėti oro drėgmė, kuri sausumoje ir jūroje bei skirtinguose regionuose skiriasi, tačiau šiame darbe į šią savybę neatsižvelgiama. Visuose tolimesniuose skaičiavimuose priimtos standartinės sąlygos: 0 metrų aukštis ir 15° C temperatūra.

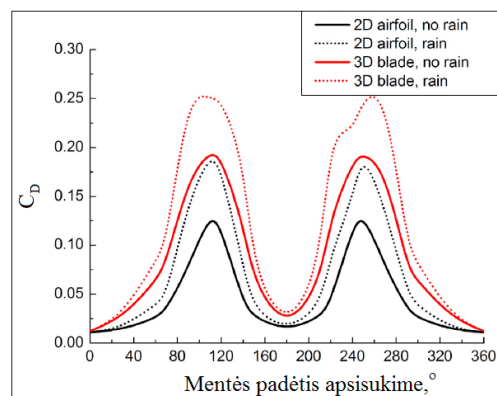
2.5. Aerodinaminiai nuostoliai

2.5.1. Lietaus poveikis

Lietaus poveikis aerodinamikai turi dvi savybes. Pirma, ilgalaikio lietaus menčių dangos korozija nuo lietaus lašų atsitrenkimo į kompozito paviršių, kuri lemia pablogėjusias aerodinamines charakteristikas ir turi sąsają su ankstesnio srauto atitrūkimu. Energiniai nuostoliai dėl šios savybės gali siekti nuo 3 iki 8 %, remiantis 2.3. skyriumi. Antru atveju lietaus lašai turi tiesioginį poveikį srauto aptekėjimui. Lašų momentinis atsitrenkimas ne tik siejasi su laminarinio srauto sutrikdymu, bet tuo pačiu prisideda prie paribio sluoksnio padidėjimo, lemiančio paviršinį sparnuotės pasipriešinimą.



a)



b)

30 pav. Lietaus poveikis aerodinamikai, „ C_L “ priklausomybė (a), „ C_D “ (b) [45]

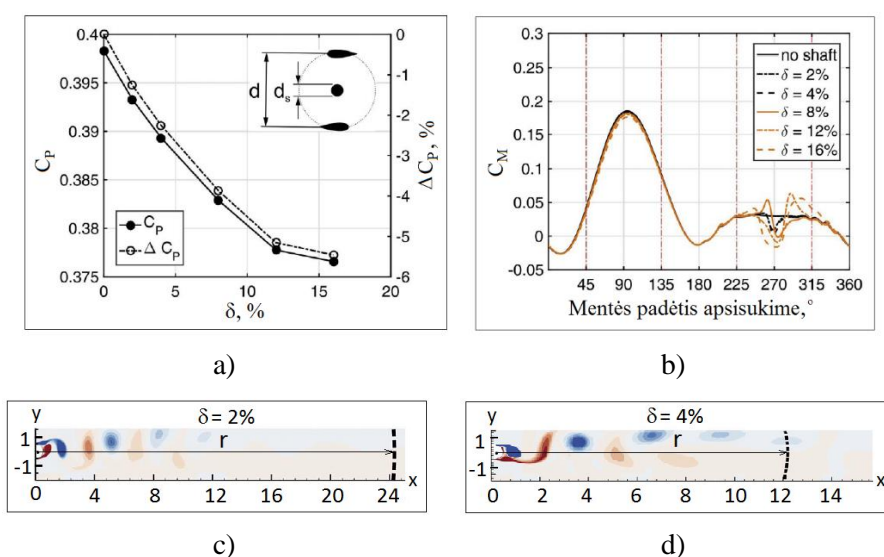
Remiantis literatūra, tyrimo metu buvo modeliuojama vidutinio ir smarkaus lietaus iškritimo keikis (30 ir 80 g/m³) bei skirtingas lietaus lašelio dydis (1 ir 4 m m skersmens). Tyrimo rezultatai (4 mm ir 80 g/m³) pateikti 30 paveiksle, kur matome „ C_L “ koeficiento kritimą ir „ C_D “ augimą tiek 2D profiliui, tiek sparnui [45]. Šie rezultatai nėra esminiai ir tolimesniuose skaičiavimuose nebus įtraukiami, tačiau atliekant profilių aerodinaminę analizę bus taikomas priverstinio atitrūkimo metodas (2.3. skyrius).

2.5.2. Bokšto aerodinaminis šešėlis

Kitas svarbus aspektas siejantis jėgainių aerodinaminį efektyvumą yra bokšto šešėliavimas. HVJ rotorius padėtis dažniausiai yra prieš bokštą, todėl šis reiškinys nepasireiškia, tačiau VVJ priklausomai nuo vėjo krypties, sparnuotės tam tikroje apsisukimo vietoje patiria aerodinaminį šešėlį. Tai yra sujaukto oro srauto kiekis, kuris turi ne tik mažesnę kinetinę energiją (mažesnę srauto greitį), bet ir netolygią srauto kryptį. Visai tai lemia pasikeitusius atakos kampus ir sujauktas „ TSR “ vertes. Remiantis literatūra [46], tyrimo metu buvo modeliuojamas jėgainės efektyvumo parametras „ C_P “ ir jo priklausomybė nuo santykinio bokšto storio „ δ “, kuris nusako bokšto skersmens „ d_s “ ir jėgainės skersmens „ d “ santykį [46]:

$$\delta = \frac{d_s}{d} \cdot 100\% \quad (11)$$

Tyrimo rezultatai pateikti 31 paveiksle. Dalyje (a) pateiktos „ C_P “ reikšmės, esant $\delta = 5\%$, jėgainės nuostoliai „ ΔC_P “ siekia 2.7 %, $\delta = 10\%$ – $\Delta C_P = 4.5\%$. Taip pat (b) dalyje pateiktos aerodinaminio momento koeficiento „ C_M “ reikšmės. Esant 270° mentės apsisukimo kampui, šiuo atveju aerodinaminio šešėlio zonoje, matome išsikraipiusias momento reikšmes, kurios lemia padidėjusias sparnuotės apkrovas bei pablogėjusias aerodinamines charakteristikas [46].

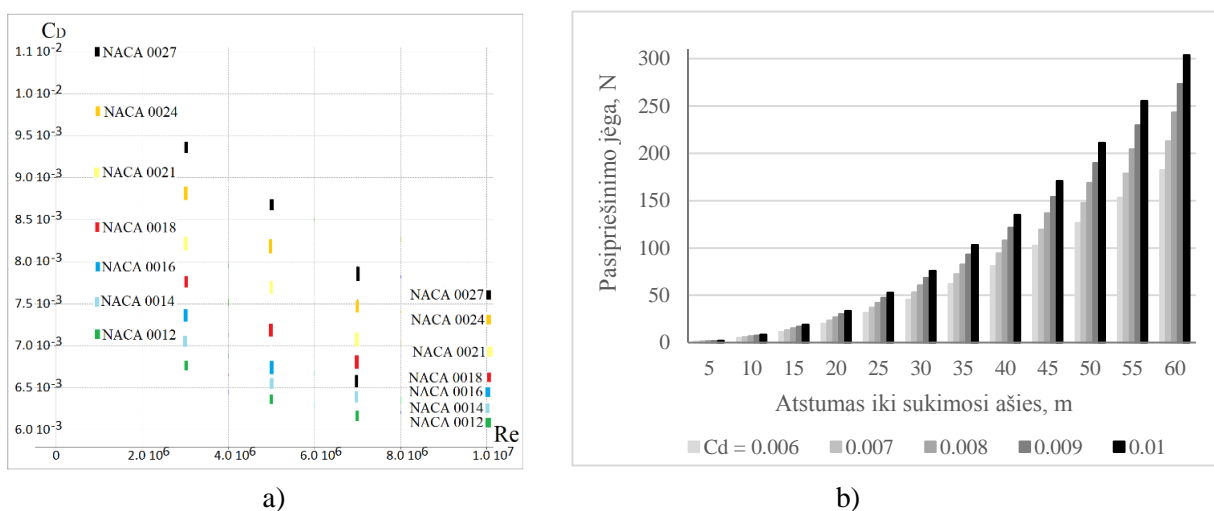


31 pav. Bokšto aerodinaminio šešėlio poveikis jėgainės efektyvumui (a) ir momento koeficiento pokyčiui (b). Vizualinis aerodinaminio šešėlio pateikimas „CFD“ formatu, kai bokšto santykinis bokšto storis 2 % (c) ir 4 % (d) [46]

Sujaukto srauto 2D aerodinaminis „CFD“ modelis (angl. Computational Fluid Dynamics) pateiktas 31 paveikslo c) ir d) dalyse, kur palyginamas santykinis dydis $\delta = 2\%$ ir $\delta = 4\%$ atitinkamai. Galima taip pat paminėti, kad didelių galių VVJ šis dydis yra mažesnis už 2% . Tolimesniuose skaičiavimuose bokšto aerodinaminis šešėlis nebus tiksliai įvertintas, nes nėra žinomas jo konstrukcijos dydis. Tačiau, galutiniame jėgainės gailios skaičiavime bus priimti papildomi 1.5% nuostoliai [46].

2.5.3. Mentės atramų pasipriešinimas

Vertikalios ašies vėjo jėgainės menčių skaičius gali siekti 2, 3, 4, forma galima sukto tipo „Gorlov“, tiesaus – „H-tipo“ ir ovalaus „Darrieus“. Kiekvienas tipas gali turėti skirtingus laikančiųjų atramų inžinerinius sprendimus – kiekis, storis, papildomų lynų išdėstymas ir t.t.. Bendram įsivaizdavimui, galima paimti vieną storą ir tvirtą atramą, arba kelias plonas. Tačiau, kuris sprendimas yra aerodiniškai efektyvesnis, literatūroje nepateikiama. Šiuo tyrimo tikslas buvo išsiaiškinti kokį aerodinaminį pasipriešinimą gali sukelti viena atrama. Tyrimui buvo pasirinkti simetriniai „NACA“ profiliai kurių santykinis storis svyruoja nuo 12% iki 27% („NACA 0012 – NACA 0027“). Taip pat analizei atlikti buvo pasirinkti atitinkamo dydžio „Re“ skaičiai – nuo 10^6 iki $10 \cdot 10^6$. Toliau pateiktame 32 paveiksle (a) vaizduojamas profilių pasipriešinimo koeficiento pasiskirstymas skirtingose „Re“ reikšmėse. Tuo tarpu laikančiosios atramos pasipriešinimo jėga apskaičiuota remiantis 2 formule (1.3.1. skyrius). Skaičiavime priimta, kad atrama yra suskaidyta į 5 metrų atkarpas. Tolstant nuo sukimosi ašies, pasipriešinimo jėga didėja – didėjant linijiniam srauto greičiui. Pasipriešinimo jėgos pasiskirstymas pateiktas 32 pav. (b). Taip pat reikėtų paminėti, kad tyrime nebuvo atsižvelgtą į aerodinaminį šešėlį sukeltą atramų, tačiau galutiniuose skaičiavimuose galime priimti prielaidą – papildomus aerodinaminis nuostolius $\sim 3\%$, dvigubai didesnius nei sukeliamus bokšto (2.5.2. skyrius).

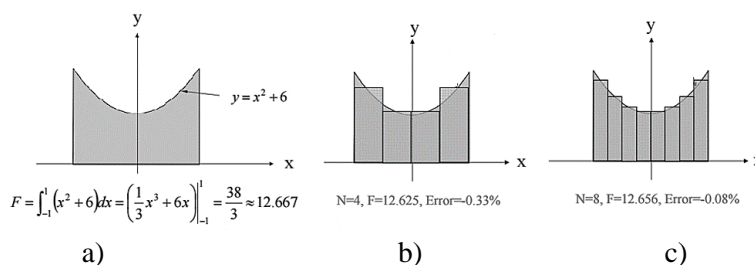


32 pav. Mentės atramų aerodinaminis pasipriešinimas. Pasipriešinimo koeficiento priklausomybė nuo „Re“ skaičiaus ir profilio tipo (a), veikiančios jėgos (b)

Vis dėlto verta paminėti, kad atraminė konstrukcija nesudaro didelių pasipriešinimo jėgų. Paimkime pavyzdį, kai VVJ jėgainė yra didelių galių (2–4 MW), kurios spindulys siekia 60 m, vidutinis vienos atramos pasipriešinimas sumoje sudaro tik 1,1 kN (priimant vidutinį pasipriešinimo koeficientą $C_D = 0.008$), tuo tarpu tangentinė jėga esant efektyviems darbo režimams, gali siekti kelis šimtus kN. Atramų pasipriešinimas bendrame jėgainės efektyvume turi šiek tiek didesnę poveikį esant mažiems vėjo greičiams. Šiame darbe įvertinsime kiekvienos atramos pasipriešinimą, tačiau kituose darbuose projektuojant, pirmenybę teiksime medžiagų atsparumui bei mentės stabilumui.

2.6. Tinklelio dydžio poveikis skaičiavimuose

Elementų suskaidymo principas pirmiausia pradėtas naudoti matematikoje – plotui apibrėžti, po to mechanikoje: standumui ir stiprumui analizuoti. Šiuo metu taikomas skysčių dinamikos, aerodinamikos ir termodinamikos uždaviniams spręsti. Skaičiavimo algoritmas remiasi vientiso elemento suskaidymu į mažas dalis. Tokiu būdu gaunamas skaičiuojamasis tinklelis, kurio kiekvieno langelio parametrai priklauso vienas nuo kito ir rezultato tikslumas priklauso nuo tinklelio tankumo. Toliau pateiktame pavyzdyje (33 pav.) vaizduojama kaip keičiasi apskaičiuojamo ploto tikslumas ir paklaida nuo suskaidymo į mažesnius plotelius: a) – tikslus plotas 12.667 m² išreikštas formule „ F^x “, b) – suskirstyto į 4 stačiakampius, suminis plotas siekia 16.625 m², netolygumo paklaida – 0,33 %, c) suskirstyto į 8 dalis, suminis plotas – 16.656 m², paklaida 0,08 %.



33 pav. Elementų suskaidymo rezultatų paklaida nuo tinklelio tankio:

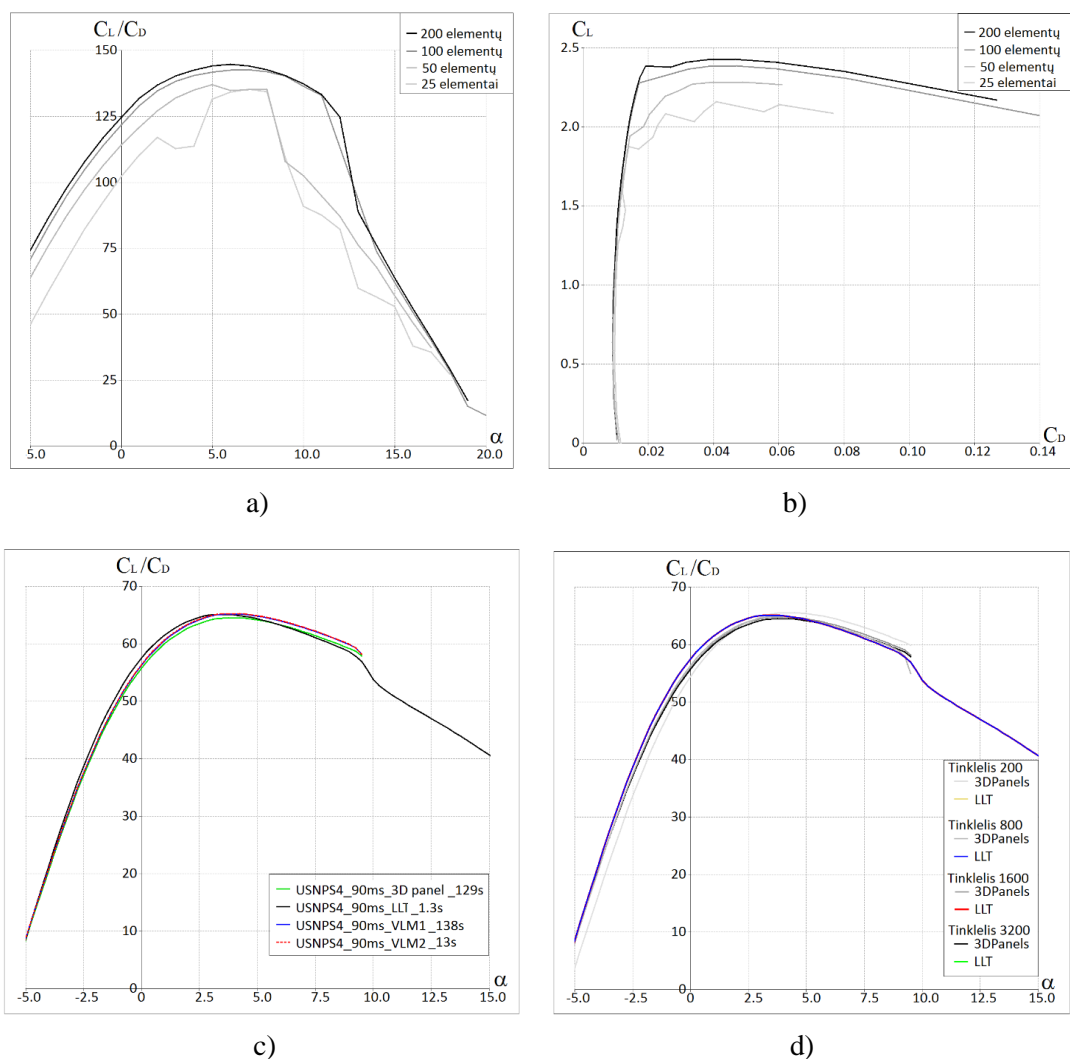
a) 0%, b) 0.33 %, c) 0.08 %

Aerodinaminiuose skaičiavimuose tikslumas iš dalies remiasi ta pačia prielaida – kuo smulkesnis tinklelis (34 pav.), tuo paklaida mažesnė. Tyrimo metu buvo atlikta dvimatė (profilio) ir trimatė (sparno) aerodinaminė analizė, ir jos priklausomybė nuo tinklelio dydžio. Kai kuriais atvejais, tiriant dvimatį profilį turintį mažai elementų, lygtys tampa nesuskaičiuojamos ir esant tam tikriems atakos kampams, skaičiavimai diverguoja. Tokiu būdu gaunamos labai netikslios „ C_L/C_D “ vertės (35 pav. a, b).



34 pav. „S1223RTL“ profilio eskizas, 25 elementų (a) ir 200 elementų (b) vizualinis palyginimas

Gaunant netikslias profilio charakteristikas, sparno skaičiavimai lieka netikslūs. Taip pat galime pastebėti, kad didėjant elementų dydžiui, aerodinaminės charakteristikos gerėja. Visose tolimesniuose skaičiavimuose buvo priimta naudoti 200 elementų profilio suskaidymą, ne dėl geresnių reikšmių, bet dėl tolygesnio skaičiavimo rezultatų – be klaidų.



35 pav. Profilio „USNPS4“ kokybės (a) ir poliarės (b) priklausomybė nuo profilio elementų skaičiaus. Sparno kokybės grafikas taikant skirtingus skaičiavimo metodus (c) ir sparno tinklelio dydį (d)

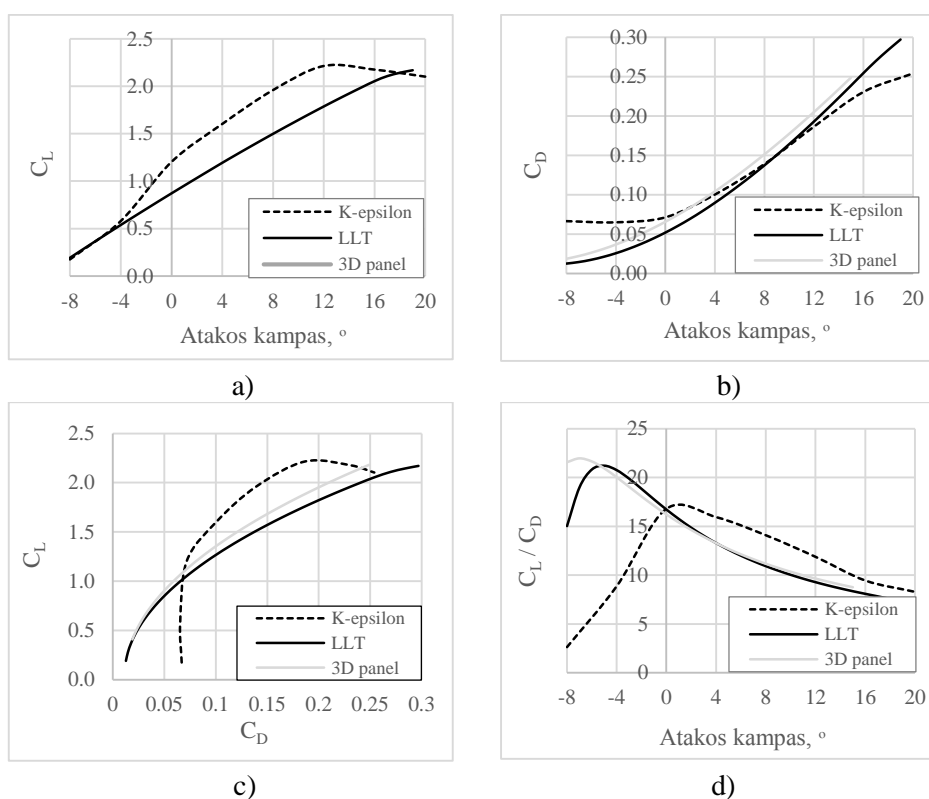
Tyrime buvo nagrinėjamos sparno aerodinaminės charakteristikos taikant 200 elementų analizę (c). Pritaikius skirtingus skaičiavimo metodus: „3D panel“, „LLT“ (angl. Lifting Line Theory), „VLM1“ (angl. Vortex Lattice Method), „VLM2“, didelių aerodinaminės kokybės skirtumų nebuvo pastebėta, tačiau remiantis skaičiavimo greitumu, kur „LLT“ metodas siekė 1.3 s, o „3D panel“ – 129 s, tolimesnėse analizėse buvo priimta naudoti „LLT“ metodą. Išsamesnis metodo poveikis skaičiavimuose ir skirtingų programų rezultatų palyginimas bus aptartas 2.7. skyriuje.

Trimačio sparno tinklelio kiekis taip pat neturėjo didelės reikšmės. Aerodinaminės kokybė svyravo 1–2 % ribose (d). Visuose kituose tyrimuose, sutaupant skaičiavimo laiką, buvo priimta naudoti vidutinio tankumo – 1600 elementų tinklį.

2.7. Skaičiavimo metodo poveikis rezultatams

Aerodinaminiai skaičiavimų rezultatai gali nesutapti taikant skirtingus skaičiavimo modelius. Vieni jų skirti mažų greičių aerodinamikai, kiti – didelių. Apibrėžiamas srauto pobūdis gali būti tiek laminarinis, tiek turbulentinis. Metodų pritaikymas remiasi eksperimentinių rezultatų atitikimo tikslumu ir sprendžiant įvairius aerodinaminius uždavinius, gali skirtis iš esmės [32].

Šiame tyrime buvo analizuojami, dažniausiai VVJ aerodinamikai skaičiuoti taikomi metodai: turbulentinis „K-epsilon“, „3D-panel“ ir „LLT“. Pirmasis metodas buvo tiriamas taikant programinę įrangą „Ansys Fluent“, kur klampumo sąlyga buvo nusakyta turbulentiškumo kinetinės energijos parametru „ k “ ir turbulentiškumo sklaidos koeficientu – „epsilon“. Taip pat formuluotės sąlyga priimta „Explicit“, srauto tipas – „Roe FDS“ [32, 43].



36 pav. Sparno segmento grafikai: „ C_L “ (a), „ C_D “ (b), poliarės (c) aerodinaminės kokybės (d)

Kiti du metodai buvo tiriami programa „Xflr-5“, kur turbulentiškumo sąlyga buvo nustatyta parametrais „ N_{crit} “ ir „ X_{tr} “ (2.3. skyrius). Bendru atveju, tyrimo metu buvo skaičiuojami 1 metro sparno segmento „S1223RTL“ koeficientai „ C_L “ ir „ C_D “. Rezultatai pateikti 36 paveiksle, kur matome skirtingų metodų neatitikimus. Labiausiai būtų galima aptarti aerodinaminės kokybės grafiką, kur esant mažiems atakos kampams, reikšmės prasilenkia keletą kartų. Tokia savybė galima dėl sudėtingo ir netaisyklingo srauto aptekėjimo aplink profilį, todėl labiau reikėtų pasikliauti „Ansys Fluent“ programa. Atliekant tolimesnius skaičiavimus (3.2.2. skyrius), šis netikslumas, esant didelėms proilgio vertėms, nepasireiškė. „Ansys Fluent“ programos „CFD“ skaičiavimų eskizai ($\alpha = -8^\circ$) pateikti antrame priede [Priedas 2].

3. JĖGAINĖS AERODINAMINIAI SKAIČIAVIMAI

3.1. Pradiniai jėgainės parametrų nustatymai

3.1.1. Parametrų skaičiuojamoji schema

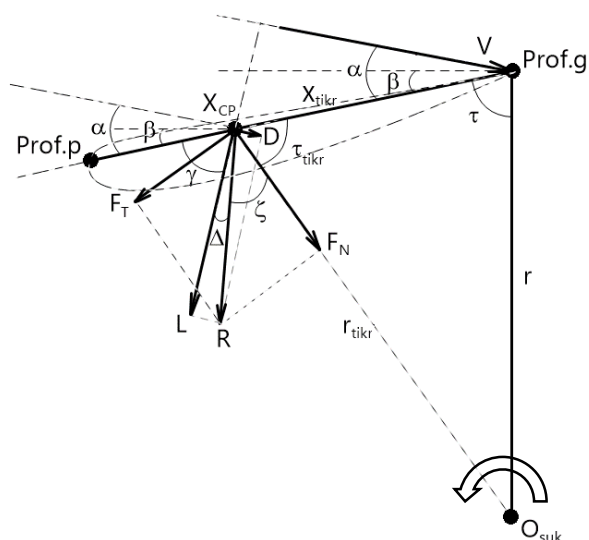
Vertikalių vėjo jėgainių aerodinaminiai skaičiavimai ir jėgų analizė yra sudėtingas skaičiavimo uždavinys, kadangi į projektavimo klausimus įeina labai daug kintamų parametrų. Visų pirma, norint suprasti skaičiavimo modelį, buvo stengiamasi jį kuo labiau supaprastinti. Parametrų skaičiuojamoji schema pateikta trečiame priede [Priedas 3]. Vienas iš sprendimų buvo apibrėžti kas yra projektavimo parametras (geltona spalva) bei kintamasis parametras (mėlyna spalva) ir kokios yra projektavimo tikslo sąlygos, vieni parametrai turi būti kuo mažesni, pavyzdžiui pasipriešinimo jėga D (minimumo sąlyga – raudona spalva), kiti kuo didesni – keliamoji jėga L (maksimumo sąlyga – žalia spalva).

Trečiame priede taip pat pateikiamas ryšis tarp vieno ir kito kintamojo. Jei rodyklė yra vienos krypties – ryšis vienpusis, jei dviejų krypčių – dvipusis, tai reiškia, kad abu parametrai turi vienas kitam grįžtamąjį poveikį. Pirminė duomenų šaltinio ir analizės kilmė – aerodinaminiai skaičiavimai programa „*Xflr-5*“, pradžioje atliekami profilio skaičiavimai, toliau trimačio sparno analizė, iš kurios gaunami „ C_L “ ir „ C_D “ koeficientai bei jų kitimas atakos kampo diapazone. Taip pat vieni iš pirmųjų apibrėžtų parametrų yra šie (vertės ateityje gali būti keičiamos – projektuojamos): „ r “ ir „ h “ – VVJ spindulys ir aukštis, styga „ c “, pastatymo kampas „ β “ bei rotoriaus sukimosi greitis „ ω “. Toliau iš jų gaunami kai kurie kintamieji parametrai: „ TSR “, „ A “ – plotas, „ Re “, „ F_{isc} “ – išcentrinė jėga. Toliau schemoje seka „ L/D “ maksimumo sąlyga, iš kurios apskaičiuojamos „ F_N “ ir „ F_T “ jėgos, atitinkamai su tikslu siekti minimumo ir maksimumo sąlygų. Toliau – sukimo momento radimas „ T “ ir galia „ P “. Išsamesni skaičiavimo metodai bus pateikti 3.1.2. skyriuje. Taip pat galima paminėti, kad šiame darbe nebus aptarinėjamos mentės ir kitų konstrukcinių jėgainės dalių apkrovos, masės, medžiagų parinkimas, kaina ir t.t., kurie reikalingi, norint apskaičiuoti jėgainės ekonomiškumą ir MWh kainą.

3.1.2. Aerodinaminių jėgų skaičiavimas

Aerodinamikos sukiamų jėgų skaičiavimui taikytos aerodinamikos, trigonometrijos bei mechanikos formulės (žr. 12–28 formules). Mentės jėgų ir atitinkamų kampų išdėstymo schema pateikta 37 paveiksle. Skaičiavimą komplikuoja tai, kad mentei sukantis aplink jėgainės centrinę ašį „ O_{suk} “ keičiasi srauto greičio ir atakos kampo vertės. Šiame skaičiavime dėl paprastumo buvo parinktas 5° žingsnis, nuo $+180^\circ$ iki -180° . Tokios reikšmės parinktos dėl to, kad būtų aiškiau, kurioje vietoje srautas yra prieš mentės sukimosi kryptį, kurioje dalyje pagal. Tačiau, svarbu paminėti, kad aptekantis srautas „ V “ aplink mentę yra nukreiptas į ją, pradedant nuo profilio pradžios (noselės) „ $Prof.p$ “ ir baigiant profilio galinėje smailioje dalyje – „ $Prof.g$ “. Ilgis esantis tarp šių taškų yra lygus stygai „ c “, tuo tarpu

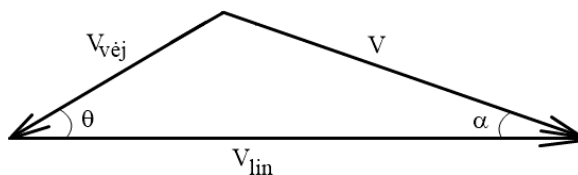
„ X_{CoP} “ žymi aerodinaminio slėgio centrą, kuriame veikia keliamoji „ L “ ir pasipriešinimo jėga „ D “. Taip pat svarbu atkreipti dėmesį, kad atakos kampas yra sudarytas ne tik iš srauto dedamųjų, bet ir pastatymo kampo „ β “ sumos, todėl keičiant pastatymo kampus, galima valdyti atakos kampo darbo diapazoną (paslinkti į vieną ar kitą pusę). Kiekvieno kampo ir atitinkamų jėgų apskaičiavimas remiasi 12–28 formulėmis.



$V_{vėj}, V_{lin}, V$ – vėjo, mentės (linijinis) ir aptekancio srauto greitis [m/s];
 C_L, C_D – keliamosios ir pasipriešinimo jėgų koeficientai;
 L, D, R – keliamoji, pasipriešinimo ir atstojamoji jėga [N];
 F_N, F_T – normalinė ir tangentinė jėga [N];
 α, β, θ – atakos, mentės pastatymo ir padėties kampas [°];
 A, ρ – mentės plotas [m²] ir oro tankis [kg/m³];
 N, r – menčių skaičius ir rotoriaus spindulys [m];
 T, ω – sukimo momentas [N·m] ir kampinis greitis [rad/s].

37 pav. Mentės jėgų ir kampų išsidėstymo schema (vaizdas iš viršaus, kairėje) bei 10–28 formulių parametrų pateikimas (dešinėje)

Toliau aptarsime nuoseklią skaičiavimo eigą kiekvieno kampo bei jėgos. Vienas pirmųjų skaičiavimo etapų prasideda nuo kosinuso teoremos panaudojimo (38 pav.), kada žinome dviejų netaisyklingo trikampio kraštinių ilgius (mūsų atveju – srauto greičių vektoriai) ir esantį kampą tarp jų, galime rasti trečios kraštinės ilgį. Tokiu būdu, per kelis etapus, galime surasti visus kampus ir atitinkamus vektorius. Visų toliau pateiktų (12–28) formulių parametrai, dėl patogumo, pateikti iš anksto (37 pav.).



38 pav. Kosinuso teorema: trijų kraštinių ir kampų priklausomybė. Vėjo dedamųjų eskizas

Kosinuso teoremos vėjo dedamųjų kraštinių ir kampų sąryšis:

$$\begin{aligned} V^2 &= V_{vėj}^2 + V_{lin}^2 - 2V_{vėj}V_{lin} \cdot \cos(\theta) \\ V_{vėj}^2 &= V^2 + V_{lin}^2 - 2VV_{lin} \cdot \cos(\alpha) \end{aligned} \quad (12)$$

Aptekančio srauto radimas kiekviename apsisukimo laipsnyje „ θ “:

$$V = \sqrt{V_{vej}^2 + V_{lin}^2 - 2 \cdot V_{vej} \cdot V_{lin} \cdot \cos(\theta)} \quad (13)$$

Kiekviename apsisukimo taške atitinkamo atakos kampo radimas:

$$\cos(\alpha) = \frac{V_{vej}^2 - V_{lin}^2 - V^2}{-2 \cdot V_{lin} \cdot V} \quad (14)$$

Kampo „ γ “ radimas, kuris yra tarp profilio stygos ir keliamosios jėgos:

$$\gamma = 90 - \alpha \quad (15)$$

Kiekvieno apsisukimo taške turint skirtingas srauto greičio bei „ C_L “, „ C_D “ vertes (pritaikant „Xflr-5“ programos gautas koeficiento „ C_L “, „ C_D “ reikšmes), apskaičiuojame sparno atitinkamas keliamąsias ir pasipriešinimo jėgas:

$$L = 0.5 \cdot C_L \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 \quad (16)$$

$$D = 0.5 \cdot C_D \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 \quad (17)$$

Randame „ Δ “ kampą, kuris yra tarp keliamosios ir atstojamosios „ R “ jėgos:

$$\tan \Delta = \frac{D}{L} \quad (18)$$

Apskaičiuojame slėgio centro padėtį kiekvienai atakos kampo reikšmei. „ X_{CoP} “ reikšmės gautos iš „Xflr-5“ programos skaičiavimų, 0.25° tikslumu:

$$X_{tikr} = c - X_{CoP} \quad (19)$$

Randamas „ τ “ kampas, kuris yra tarp jėgainės spindulio „ r “ ir profilio stygos „ c “:

$$\tau = 90 - \beta \quad (20)$$

Apskaičiuojama gretimo spindulio reikšmė „ r_{tikr} “, kuri yra išvesta iš slėgio centro į sukimosi ašį „ O_{suk} “. Svarbu paminėti, kad ši reikšmė yra labai artima spindulio ilgiui, nes „ r “ siekia 30–60 m, tuo tarpu styga siekia 1–2 m. Tolimesniuose skaičiavimuose priimsime prielaidą ir suapvalinta „ r_{tikr} “ iki spindulio ilgio „ r “:

$$r_{tikr} = \sqrt{r^2 + X_{tikr}^2 - 2 \cdot r \cdot X_{tikr} \cdot \cos(\tau)} \quad (21)$$

Randamas „ τ_{tikr} “ kampas:

$$\cos(\tau_{tikr}) = \frac{r^2 - r_{tikr}^2 - X_{tikr}^2}{-2 \cdot r_{tikr} \cdot X_{tikr}} \quad (22)$$

Apskaičiuojamas kampas „ ζ “ tarp atstojamosios jėgos „ R “ ir nukreiptos į sukimosi ašį jėgos „ F_N “:

$$\zeta = 180 - \tau_{tikr} - \Delta - \gamma \quad (23)$$

Apskaičiuojama normalios jėgos „ F_N “ vertė, nukreipta į sukimosi ašį:

$$F_N = R \cdot \cos(\zeta) \quad (24)$$

Taip pat randama tangentinė jėga „ F_T “, kuri yra statmena „ r_{tikr} “ linijai ir sudaro petį, kuris lygus jos ilgiui:

$$F_T = R \cdot \sin(\zeta) \quad (25)$$

Susumuojama kiekvienos padėties tangentinės jėgos dalis, ir randamas vidurkis:

$$F_{Tsum} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_T(\zeta) d(\theta) \quad (26)$$

Apskaičiuojamas sukimo momentas:

$$T = N \cdot F_{Tsum} \cdot r \quad (27)$$

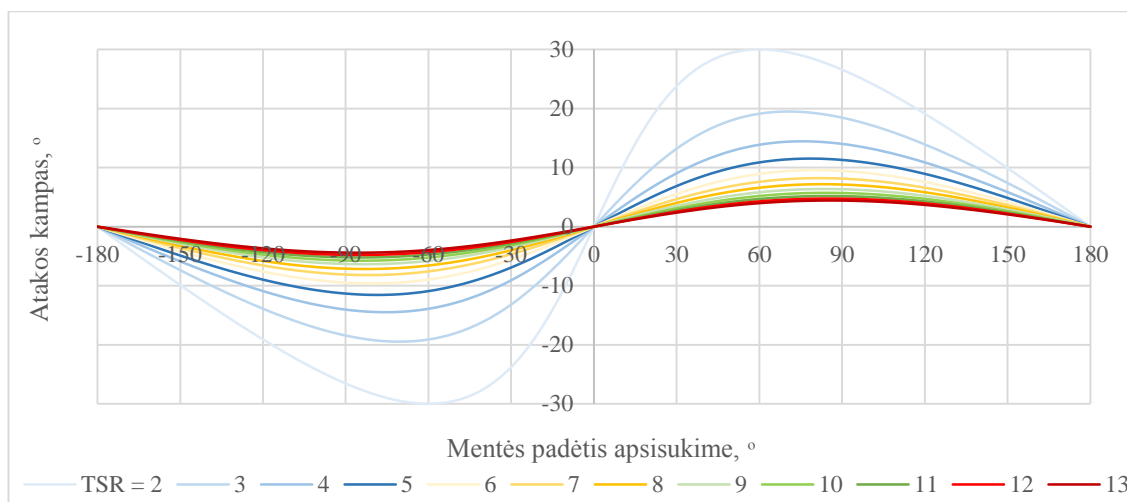
Randama jėgainės galia:

$$P = T \cdot \omega \quad (28)$$

Apskaičiavus šias jėgas, bus gauta vėjo jėgainės galios kreivė kiekvienoje vėjo greičio vertėje. Pagal tokio tipo kreivę bus galima įvertinti jėgainės efektyvumą – „ C_P “ reikšmes „ TSR “ ar vėjo greičio diapazone bei palyginti su kitomis jėgainėmis. Taip pat remiantis galios kreive, galima apskaičiuoti jėgainės generuojamos elektros kiekį per metus, kuris yra pagrindinis jėgainių ekonomiškumo rodiklis ir pagal kurį galime vertinti MWh kainą.

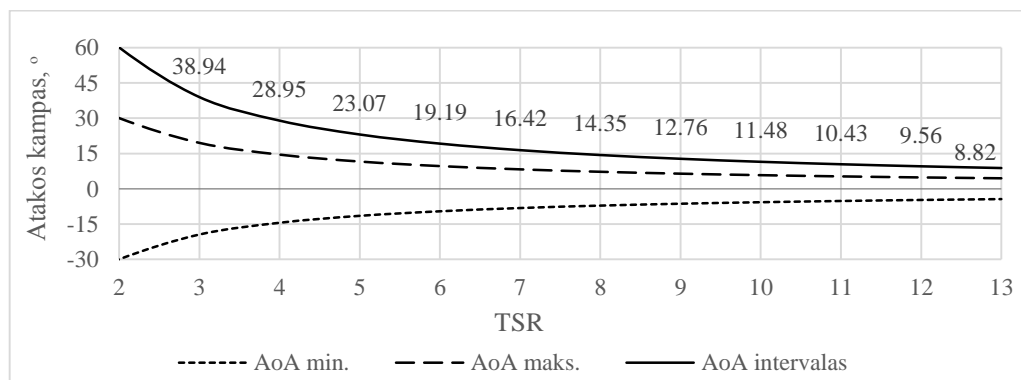
3.1.3. Efektyvių greičių skaičiavimas

Vertikalių vėjo jėgainių atakos kampo priklausomybė nuo santykinio greičio „ TSR “ visada yra tokia pati kaip pateikta 39 paveiksle, nepriklausomai nuo vėjo ar mentės sukimosi greičio. Taip pat, esant pastoviai vėjo kryptiai, mentės padėties apsisukime ir atakos kampo svyravimas išlieka toks pat. Galimas atakos kampo koregavimas, keičiant mentės pastatymo kampą (1.3.2. skyrius). Grafike yra pateiktos „ TSR “ reikšmės nuo 2 iki 13. Galime matyti kaip kinta atakos kampo plotis kiekviename iš „ TSR “ reikšmių ir išvada darosi aiški: kuo didesnis „ TSR “, tuo mažesnis atakos kampo plotis.



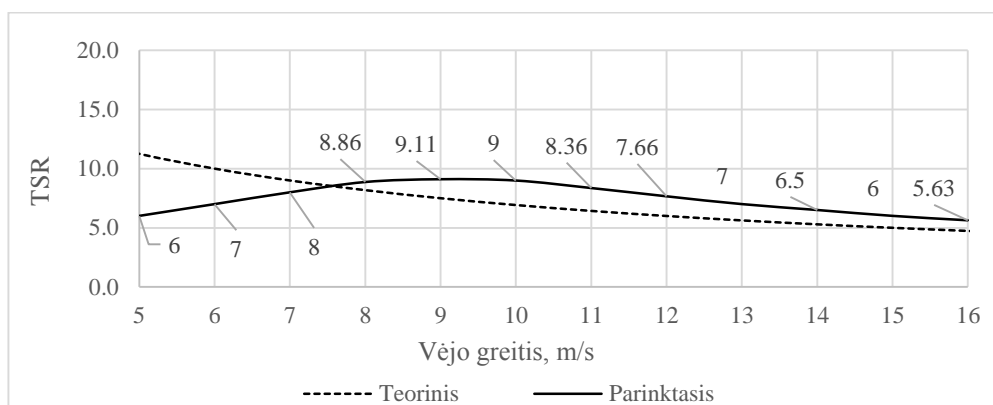
39 pav. Atakos kampo priklausomybė nuo „ TSR “ viso apsisukimo metu

Atakos kampo pločio priklausomybė nuo „ TSR “ detalčiau pateikta 40 iliustracijoje. Esant $TSR = 2$, „ α “ diapazono plotis = 60° , kai $TSR = 13$, $\alpha = 8.82^\circ$. Atsižvelgiant į nesimetrinių profilių efektyvias kokybės reikšmes ir atitinkamus atakos kampus, galime daryti prielaidą, kad geros profilio charakteristikos „telpa“ į 20° atakos kampo intervalą, išsamesnė analizė pateikta 3.2.1. skyriuje. Bendru atveju maksimalus profilio atakos kampo plotis turėtų siekti ne daugiau 20° , tokiu būdu efektyvi minimali „ TSR “ reikšmė lygi 5.6.



40 pav. Atakos kampo diapazono priklausomybė nuo „ TSR “

Kiekvienoje projektuojamoje VVJ stengiamasi išlaikyti efektyvias „*TSR*“ vertes, tuo pačiu ir „neperlipti“ maksimalios vėjo galios vertės bei jėgainės efektyvumo limito – „*Betz's law*“, kuris aprašo maksimalų teorinį jėgainės efektyvumą, lygų 59.3 % visos teorinės vėjo galios, apibrėžtam plotui. Šis skaičius yra išvestas tiek matematiškai, tiek rastas eksperimentiškai. Maksimali nesutrikdyto srauto pratekėjimo pro jėgainės rotoriaus riba yra artima 60 %, šio skaičiaus neįmanoma viršyti, nes srautas tiesiog tekėtų aplinkui jėgainę ir negeneruotų papildomos energijos [3, 17].



41 pav. Parinktos ir teorinės „*TSR*“ reikšmės esant skirtingiems vėjo greičiams

Konkrečiu atveju pasirinkta naudoti atitinkamas „*TSR*“ vertes, kurios lemia mentės linijinį greitį bei atakos kampus, norint gauti pradinę galios kreivę, pateiktą 3.3.3. skyriuje. Šie parametrai yra projekcinio pobūdžio, todėl esant poreikiui, gali būti pakeisti. Tiksliai parinktos „*TSR*“ reikšmės ir jų sąryšis su mentės linijiniu greičiu ir „*Reynolds*“ skaičiumi, pateiktas 41 paveiksle ir 5 lentelėje. Galime matyti, kad linijinio greičio diapazonas siekia nuo 30 iki 92 m/s, tuo tarpu „*Re*“ reikšmės svyruoja nuo $3 \cdot 10^6$ iki $9.44 \cdot 10^6$.

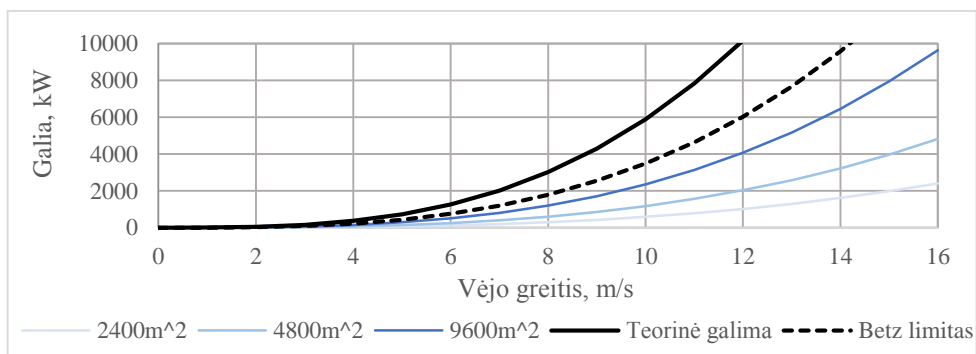
Lentelė 5. Vėjo greičio, mentės linijinio greičio, „*TSR*“ ir „*Reynolds*“ skaičiaus ryšis

Vėjo greitis, m/s	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
„ <i>TSR</i> “	6	7	8	8.88	9.11	9	8.36	7.66	7	6.5	6	5.63
Mentės linijinis greitis, m/s	30	42	56	71	82	90	92	91.9	91	91	90	90
„ <i>Reynolds</i> “ skaičius, $\cdot 10^6$	3.07	4.31	5.74	7.29	8.42	9.23	9.44	9.44	9.34	9.34	9.24	9.24

Jėgainės efektyvių greičių parinkimas yra tik pradinis žingsnis norint gauti atitinkamą ir realią galios kreivę. Tolimesnis jėgainės optimizavimas, siekiant gauti kuo didesnę galią, gali turėti pagrindą keisti šią kreivę (41 pav.), taip pat jeigu jėgainė „peržengia“ teorinę vėjo galios kreivę bei „*Betz*“ limitą.

3.1.4. Projektiniai jėgainės skaičiavimai

Pagrindiniai jėgainės projektuojami parametrai yra: rotoriaus spindulys, aukštis ir galios koeficientas „ C_P “. Šie parametrai yra laisvai pasirenkami, norint įvertinti pirminę jėgainės galią. Pradinės galios kreivės modeliavimo etape buvo pasirinkti rotoriaus plotai, kurie lygūs skersmens ir aukščio sandaugai: 2400 m^2 , 4800 m^2 , 9600 m^2 . Taip pat pradinis efektyvumas priskirtas – 40 %.



42 pav. Pradinis galios kreivės modeliavimas

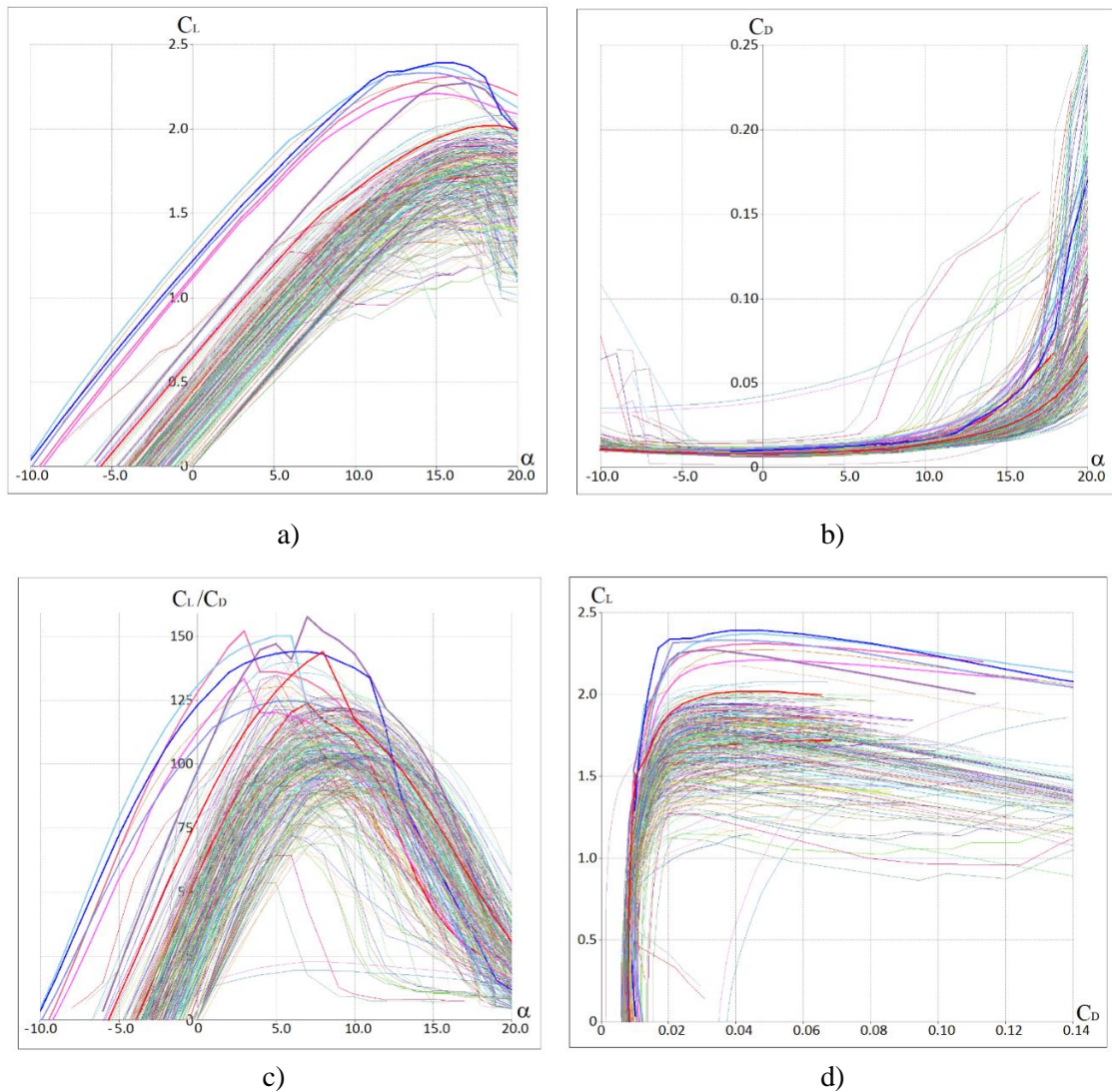
Galios kreivių pasiskirstymas pateiktas 42 paveiksle, tačiau reikia paminėti, kad nominali (nusistovėjusi) galios vertė nėra įtraukta. Ši savybė dažniausiai apibrėžiama pagal jėgainės leistinus atsparumo skaičiavimus bei maksimalius generatoriaus darbo režimus. Standartiškai nominali vertė pasiekama esant 10–12 m/s vėjo greičiui ir nusistovi iki leistinų vėjo ribų: 15–20 m/s. Stengiantis gauti 4 MW vertikalios ašies vėjo jėgainę, tolimesniems skaičiavimams pradiniai jėgainės parametrai parinkti tokie: spindulys – 60 m, mentės aukštis – 80 m/s, menčių skaičius – 3, vienos mentės atramų skaičius – 2, vidutinis vėjo greitis – 8 m/s.

3.2. Aerodinaminiai tyrimai

3.2.1. Profilių aerodinaminė analizė

Vieni pagrindinių profilio parametrų aerodinamikoje yra „ C_L “, „ C_D “ bei jo savybių pasiskirstymas skirtinguose atakos kampuose. Šiai analizei atlikti buvo naudojama programa „Xflr-5“. Atsižvelgiant į daugumą literatūros šaltinių, analizei naudojamus profilius, pasižymėjusius vėjo jėgainėse ir aviacijos srityje, būtų galima išskirti į šias klases: „AH93“, „Drela-AG“, „Wortmann-FX“, „NACA“ 4 ir 5 skaitmenų simetriniai ir nesimetriniai, „Selig-S“, „SG“, „DU, LS“, „USNPS“. Iš viso tirtų profilių skaičius siekia – 159. Atsižvelgdami į mentės linijinius greičius, „Reynolds“ skaičiaus diapazonas analizei priskirtas $1-15 \cdot 10^6$, šiurkštumo sąlyga $N_{crit} = 4$, priverstinio srauto atitrūkimo sąlyga $X_{tr} = 0.1$. Atakos kampo diapazonas nuo -10° iki $+20^\circ$, skaičiavimo tikslumo žingsnis 0.25° [3, 17, 32, 43].

Šiam tyrimui buvo pasitelkta programos „*Multi-Bach analysis*“ funkcija, kurios dėka buvo sugeneruota automatiška visų profilių ir visų skaičiavimo ribų analizė, kurios bendras skaičiavimo laikas siekė iki valandos. Analizės metu gautos kritinės „ C_L “ reikšmės svyruoja nuo 1.2 iki 2.4, tuo tarpu „ C_D “ 0.02 iki 0.05. Taip pat galime išvelgti, kad žemose „ Re “ reikšmėse, kai kurios profilių vertės divergavo – matomi staigūs „karpyti“ pokyčiai. Profilių kokybės priklausomybė nuo atakos kampo ir profilių poliarės grafikai pateikti 43 pav. c) ir d) dalyse. Matomas žymus kokybės skirtumas, siekiantis nuo 100 iki 150 bei atakos kampo plotis nuo 30° iki 15° .

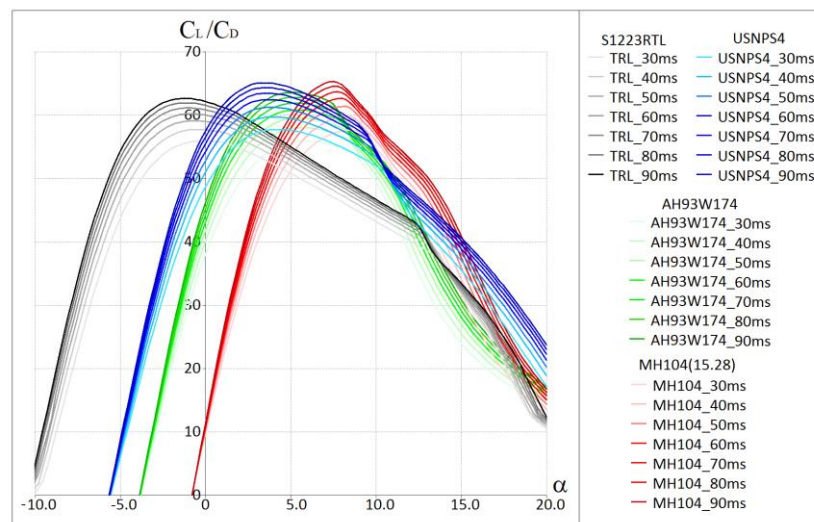


43 pav. Profilių keliamosios jėgos koeficientų priklausomybė nuo atakos kampo (a), pasipriešinimo koeficientų (b), aerodinaminės kokybės priklausomybė nuo atakos kampo (c) ir profilių poliarė (d)

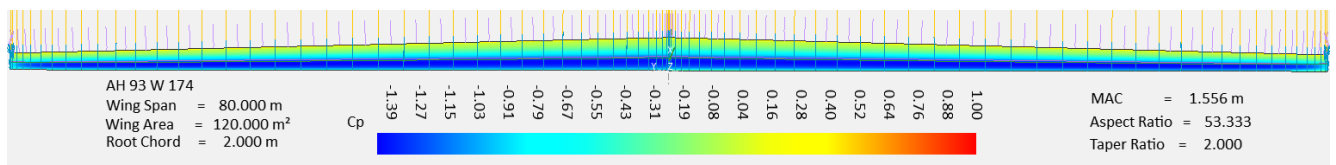
Atliekant analizę reikėjo stebėti svarbiausias profilių savybes: kuo didesnę „ C_L/C_D “ santykį ir platų atakos kampo diapazoną. Geromis savybėmis pasižymėjusius profilius būtų galima išskirti šiuos: „*S1223RTL*“, „*USNPS4*“, „*AH 93W174*“ ir „*MH104_15.28*“ (43 pav. pažymėtus mėlyna, violetine, žydra ir raudona spalvomis atitinkamai).

3.2.2. Mentės aerodinaminė analizė

Trimačio sparno koeficientų radimui buvo pasirinkta naudoti „Xflr-5“ programą. Analizės metu buvo tiriami 3.2.1. skyriuje išskirti 4 profiliai. Skaičiavimo metodas parinktas „LLT“ tipo. Tinklelio dydis 1600 elementų. Mentės matmenys: 80 m mostas, šaknies stygos ilgis – 2 m, galinės – 1 m, vidutinė geometrinė styga – 1.5 m, proilgis – 53.3, jėgainės spindulys – 60 m, rotoriaus plotas – 9600 m². Srauto greičio diapazonas nuo 30 iki 90 m/s, atsižvelgiant į 3.1.3 skyrių.



a)



b)

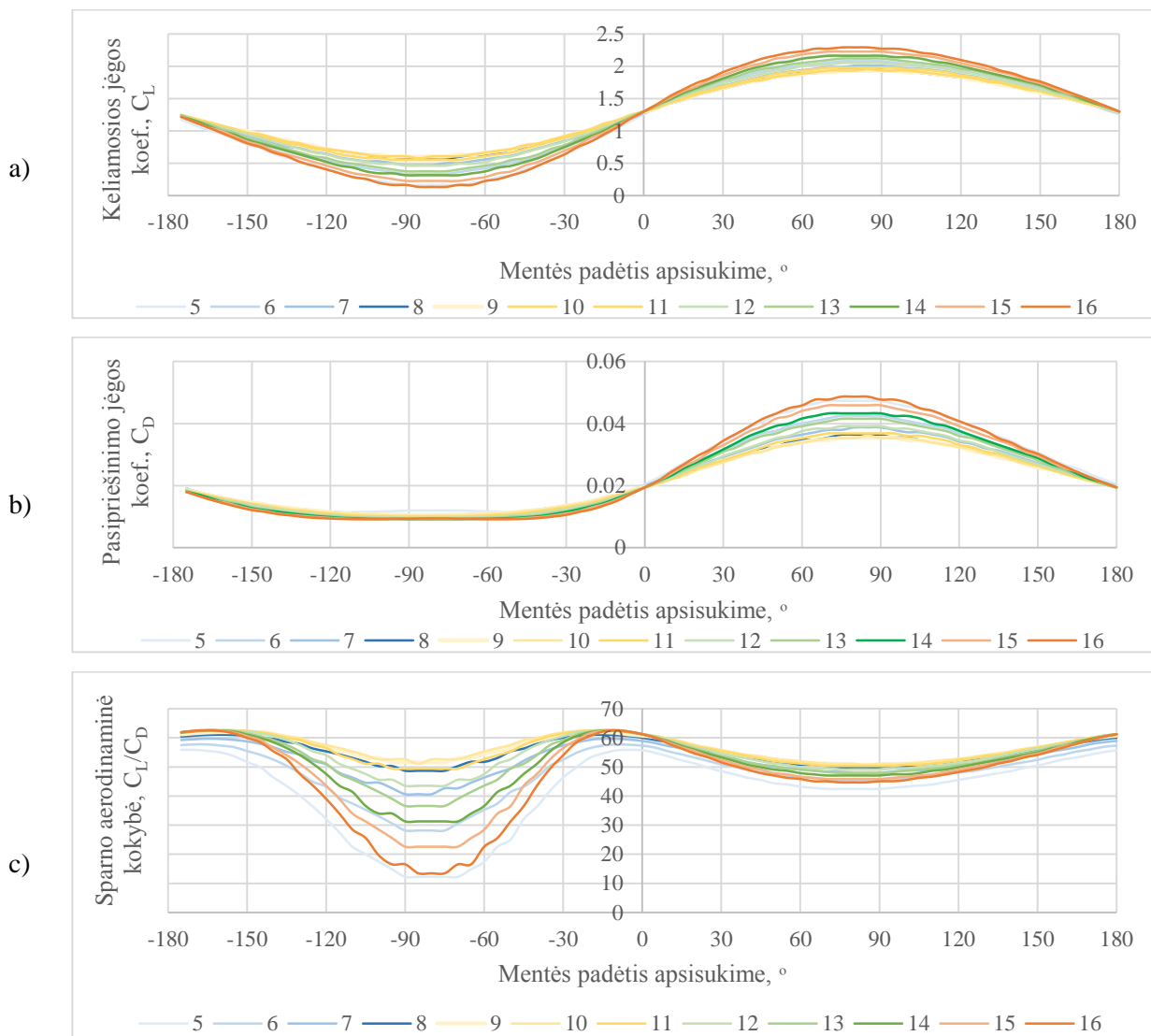
44 pav. Trimačio sparno kokybės priklausomybė nuo atakos kampo, palyginant skirtingus profilius (a), skaičiavimo rezultatų eskizas su geometriniais parametrais ir slėgio pasiskirstymu (b)

Kiekvieno profilio aerodinaminės kokybės grafikai pateikti 44 paveiksle, a). „S1223RTL“ profilio „ C_L/C_D “ maksimali reikšmė lygi 63, kokybės kampas lygus -2° , kritinis $\alpha = 13^\circ$, diapazono plotis esant 40 kokybei = 20° . „USNPS4“ profilio „ C_L/C_D “ maksimali reikšmė – 65, kokybės kampas lygus $+3^\circ$, kritinis $\alpha = 9^\circ$, „ α “ diapazono plotis esant 40 kokybei = 17° . „AH 93W174“ profilio „ C_L/C_D “ maksimali reikšmė – 64, kokybės kampas lygus $+5^\circ$, kritinis $\alpha = 8^\circ$, „ α “ diapazono plotis esant 40 kokybei = 14° . „MH104_15.28“ profilio „ C_L/C_D “ maksimali reikšmė – 66, kokybės kampas lygus $+7^\circ$, kritinis $\alpha = 7.5^\circ$, „ α “ diapazono plotis esant 40 kokybei = 12° .

Kuris profilis turi geriausias savybes įvairiose vėjo greičio reikšmėse, kol kas spręsti yra sunku. Visi analizės gauti rezultatai, pateikiami parametrų išraiška: „ C_L “, „ C_D “, „ α “, „ X_{CoP} “ bus pritaikomi ir analizuojami tolimesniuose skyriuose. Gerai optimizuotas sparnas pagal skirtingą profilį bus laikomas tas, su kuriuo skaičiavimuose gausis didžiausios reikšmės galios kreivė.

3.2.3. Jėgainės aerodinaminiai parametrai

Jėgainės aerodinaminiai parametrai nuo mentės skiriasi tuo, kad mentė besisukanti apie centrinę ašį patiria skirtingas aptekancio srauto dedamąsias. Todėl atitinkamai skiriasi ir mentės aerodinaminės charakteristikos. Tyrime atlikti visų 3.2.2. skyriuje minėtų profilių skaičiavimai. Palyginamieji ir optimizuoti pagal „ β “ aerodinaminės kokybės grafikai pateikti ketvirtame priede [Priedas 4]. Toliau pateiktame 45 paveiksle a), b), c) dalyse vaizduojami „S1223RTL“ profilio, vienos mentės parametrai, viso apsisukimo metu, 5–16 m/s vėjo greičiams ir $\beta = 1^\circ$. Galime matyti, kad „ C_L “ reikšmė esant 16 m/s vėjui atitinkamai kinta nuo 0.13 iki 2.28, „ C_D “ – nuo 0.0093 iki 0.048 priklausomai nuo padėties.

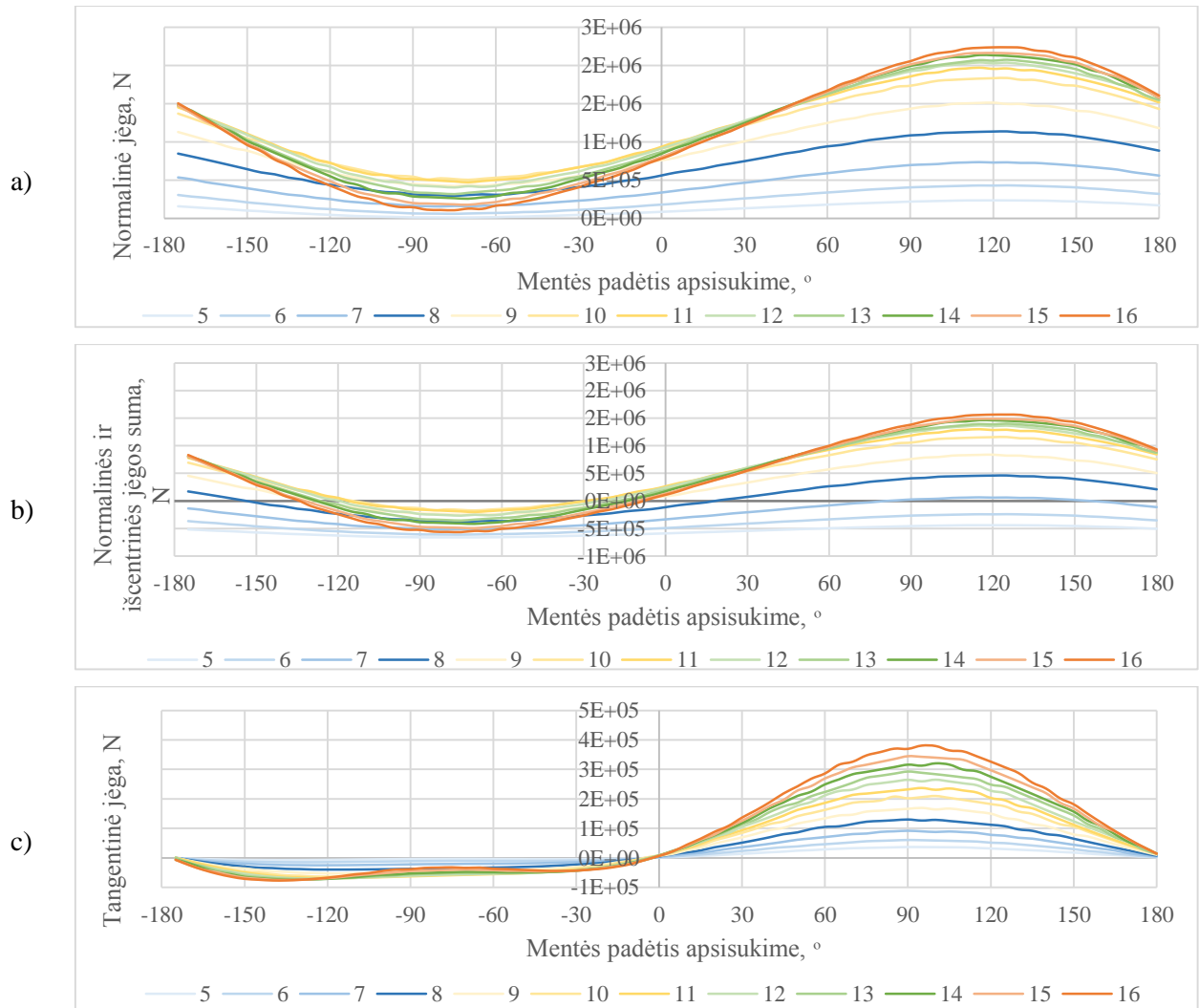


45 pav. Mentės keliamosios jėgos koeficiento reikšmės apsisukime (a), pasipriešinimo koeficientas (b), sparno aerodinaminė kokybė (c), vėjo srauto diapazone 5–16 m/s

Esant dažniausiai pasitaikančiam vėjo greičiui jūroje 8–10 m/s (2.2 skyrius), „TSR“ reikšmės optimizuotos taip, kad mentės aerodinaminė kokybė būtų didžiausia. „ C_L/C_D “ reikšmė šiuose greičiuose svyruoja nuo 58 iki 69, esant 16 m/s – nuo 14 iki 47.

3.3. Jėgainės apkrovų skaičiavimai

Vėjo jėgainės mentėje veikiančios apkrovos apskaičiuojamos pagal „ C_L “, „ C_D “ reikšmes, pradžioje randant keliamąją ir pasipriešinimo jėgas, toliau normalinę „ F_N “, nukreiptą į sukimosi ašį, ir tangentinę „ F_T “, statmeną sukimosi ašiai. Šių jėgų išsidėstymas vienos mentės apsisukime, naudojant profilį „ $SI223RTL$ “ ir pastatymo kampą $\beta = 1^\circ$, pateiktas 46 paveiksle.



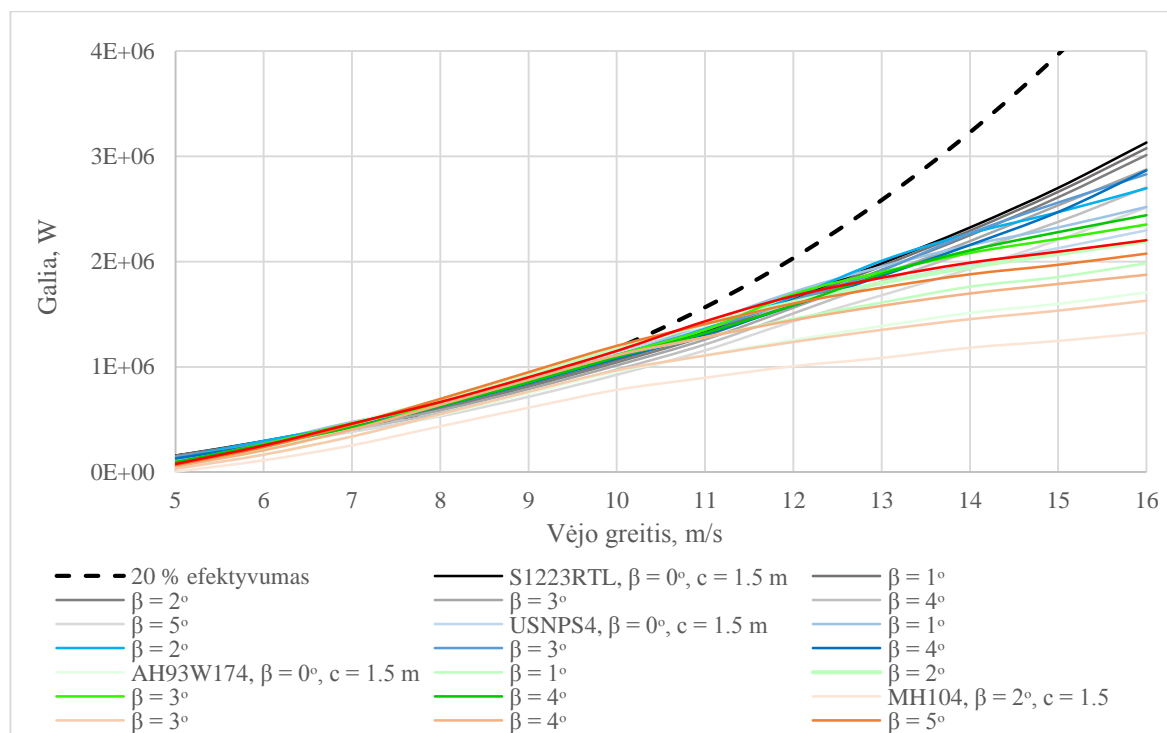
46 pav. Sparno sukiamų „ F_N “ jėgų reikšmės apsisukime (a), „ F_N “ ir „ F_{isc} “ jėgų suma (b) ir „ F_T “ jėgos (c) reikšmės, vėjo srauto diapazone 5–16 m/s

Žinant minėtas jėgas galima apskaičiuoti sparną veikiančias apkrovas, paskirstyti atramų išdėstymą, reikiamas medžiagas ir jų kiekį. Taip pat svarbu paminėti, kad nesimetrinio profilio išgaubtumas nukreiptas į centrą, todėl normalinė ir išcentrinė jėga atsisveria sumažindama mentės apkrovas (46 pav. b), priėmus mentės masę – 7 tonas. Tangentinės jėgos reikšmės svyruoja nuo -78 iki +381 kN, esant didžiausiam tiriamajam vėjo srauto greičiui – 16 m/s. Kokio dydžio įtempiai veiks mentėje šiame darbe nėra aptariama, tačiau lyginant galios grafikus su esama 4 MW galios jėgaine (3.4 skyrius), galime daryti prielaidą, kad apkrovos yra realios [3, 17].

3.4. Galios kreivės modeliavimas

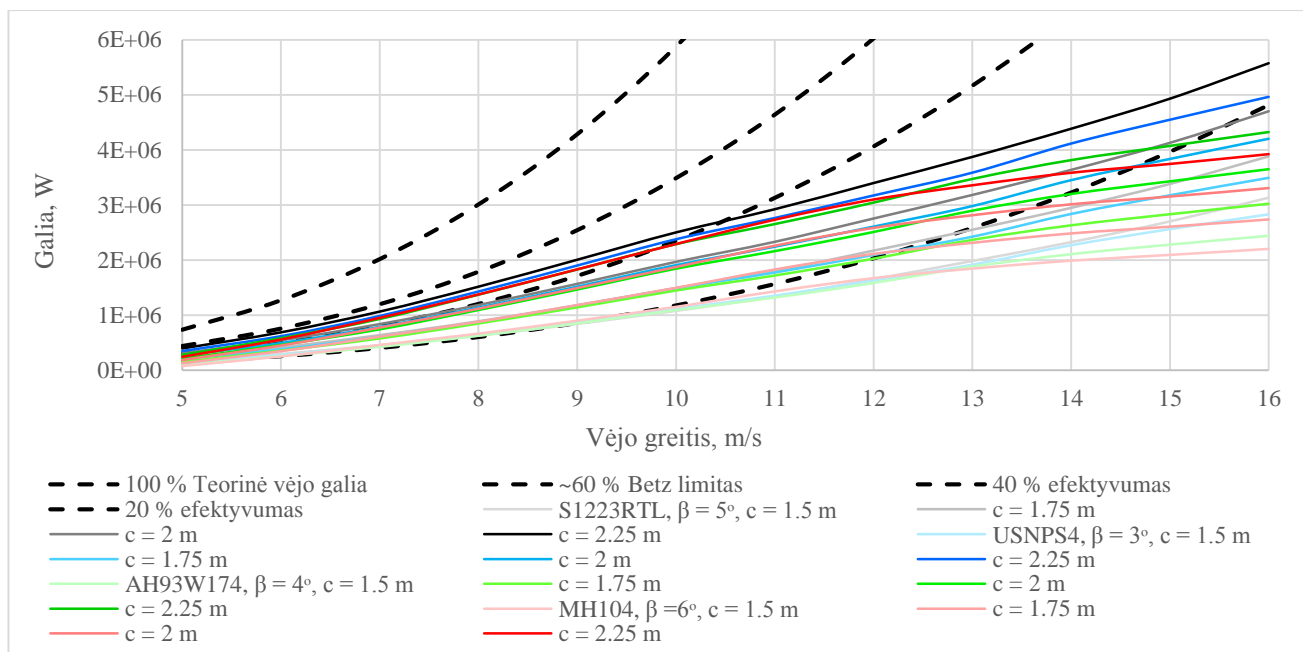
Galios kreivės skaičiavimas remiasi visais trečio skyriaus etapais. Galutinė kreivė apskaičiuojama pagal 27 ir 28 formules, įtraukiant tangentes jėgos „ F_T “ reikšmes kiekvienoje mentės apsisukimo padėtyje. Kreivės modeliavimas atliktas keičiant mentės pastatymo kampą „ β “ ir stygos ilgį „ c “.

Pirmuoju tyrimu atliktas galios kreivės modeliavimas pagal mentės pastatymo kampą. Tiriamų profilių rezultatai pateikti 47 paveiksle, kur esant 5° kampui, maksimali galia siekia 2.5 MW, o esant 0° kampui – 3.1 MW. Šis mentės kampo parinkimas padidino nominalią jėgainės galią 19.5 %.



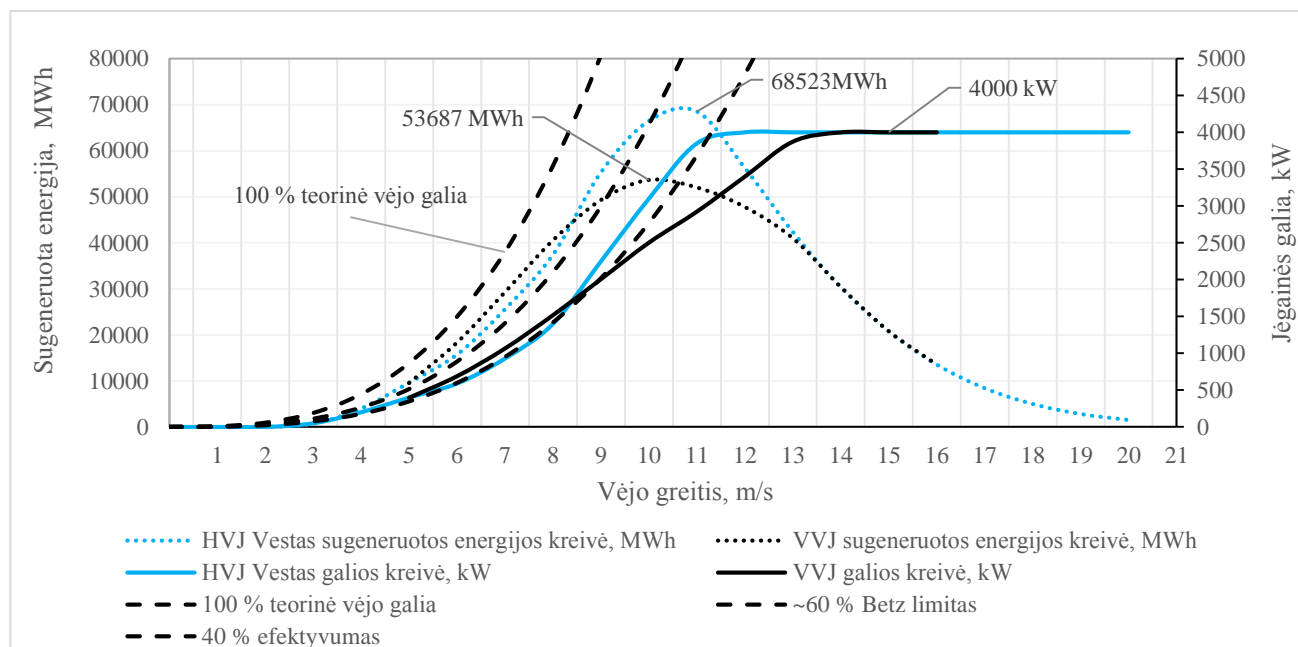
47 pav. VVJ galios kreivės priklausomybė nuo mentės pastatymo kampo, vėjo srauto diapazone 5–16 m/s

Kitas galios kreivės modeliavimas rėmėsi mentės stygos ilgio didinimu nuo 1.5 m iki 2.25 m, 0.25 m žingsniu (48 pav.). Tyrimė taip pat įvertinama, kad pakeitus stygos ilgį keičiasi proilgio reikšmės nuo 53 iki 36, lemiančios blogesnes aerodinamines charakteristikas. Tačiau didėjant stygai, „*Reynolds*“ skaičius (esant 90 m/s), didėja nuo $9.2 \cdot 10^6$ iki $13.8 \cdot 10^6$ ir lemia geresnes aerodinamines charakteristikas. Visumoje, aerodinaminė sparno kokybė lyginant „S1223RTL“ profilio mentės 53 ir 36 proilgi, didinant stygą, sumažėja 15.7 %. Tuo tarpu galios prieaugis padidėja 45 % – esant 1.5 m stygai, jėgainės maksimali galia siekia 3.1 MW (48 pav. šviesiai pilka kreivė), o 2.25 m – 5.6 MW (juoda kreivė). Šio profilio galios kreivės 4 MW nominali galia pasiekama esant 13 m/s vėjo greičiui, kai efektyvumas lygus 30 %. Tuo tarpu esant optimaliam 8–10 m/s vėjo greičiui, jėgainės efektyvumas siekia 39 %.



48 pav. VVJ galios kreivės priklausomybė nuo mentės stygos ilgio, vėjo srauto diapazone 5–16 m/s

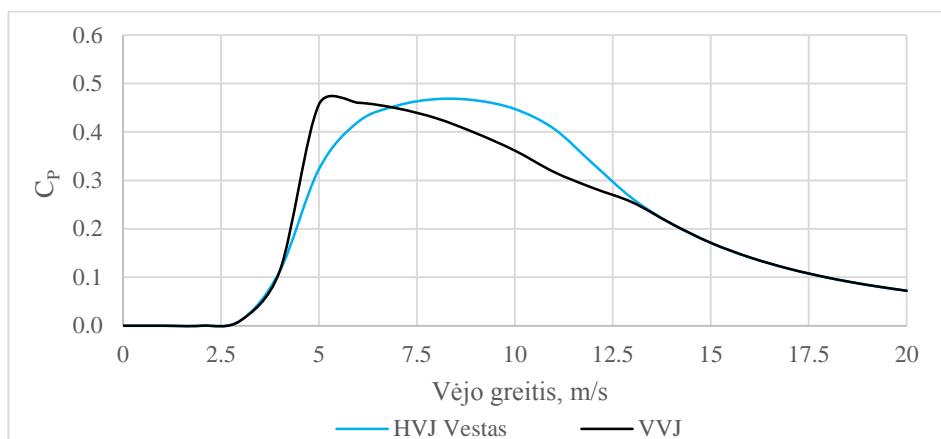
Horizontalios ašies „Vestas“ jėgainės ir suskaičiuotosios VVJ galios ir sugeneruotos energijos kreivių palyginimai, remiantis „Weibull“ 104 km atstumo skirstiniais (2.2. skyrius), pateikti 49 paveiksle. Nominali galia abiejų jėgainių – 4 MW. Pateiktas grafikas – kombinuotasis. Kairioji vertikali ašis ir punktyrinės linijos vaizduoja sugeneruotą energiją per 30 metų, MWh. Dešinioji – jėgainės galią.



49 pav. VVJ ir HVJ galios kreivių, ir sugeneruotos energijos palyginimas, vėjo srauto diapazone 0–20 m/s

„Vestas“ jėgainės [42] sugeneruotos energijos kiekis per 30 metų, 104 km atstumu į jūrą, siekia 471 GWh, tuo tarpu apskaičiuotosios VVJ – 425 GWh. Sukauptos energijos skirtumas lygus 9.8 %.

Remiantis jėgainių ir teorinės vėjo galios kreivių santykiu, buvo apskaičiuojamos galios koeficiento „ C_P “ reikšmės ir nubrėžiamos VVJ ir HVJ jėgainių efektyvumo kreivės. Šis grafikas vaizduoja, kokiame vėjo greičio diapazone jėgainė generuoja elektrą efektyviausiai. Matome, kad VVJ maksimali „ C_P “ vertė – 0.46 pasiekama esant 5–6 m/s vėjo greičiui, HVJ – $C_P = 0.47$, esant 8–9 m/s greičiui.



50 pav. VVJ ir HVJ galios koeficiento „ C_P “ kreivės, vėjo diapazone 0–20 m/s

Atsižvelgiant į tyrime atliktus skaičiavimus, galime daryti išvadas, kad HVJ jėgainės yra efektyvesnės prie didesnių vėjo greičių, o VVJ – prie mažesnių. Lyginant 4 MW „Vestas“ jėgainę su šiame projekte apskaičiuota VVJ, sugeneruojamos energijos kiekis skiriasi 9.8 %. Įvertinus efektyvumą, VVJ pritaikymas jūroje tampa pranašesnis tik tuomet, jeigu jų gamybos, įrengimo ir eksploatacijos kaštai yra bent 9.8 % mažesni negu HVJ. Negilių vandenų (iki 50 m) vėjo jėgainių parkų vystymui labiau tinka HVJ. Tačiau, atsižvelgiant į pritaikomumą plūduri technologijai giliuose vandenyse (nuo 50 m), pranašesnės ir daugiau teigiamų savybių turi vertikalios ašies vėjo jėgainės.

IŠVADOS

1. Atlikta vėjo stiprumo analizė prie kranto ir 104 km atstumu į jūrą, Lietuvos Respublikos jūrinėje teritorijoje. Vidutinis vėjo greitis atitinkamai lygus 6.681 m/s ir 7.979 m/s.
2. Įvertinti jėgainės efektyvumą mažinantys veiksniai: sparno šiurkštumo parametrai „*Xtr*“ ir „*Ncrit*“, dėl kurių aerodinaminės kokybės skaičiavimai skiriasi 8.3 %. Esant 30° C aplinkos temperatūros skirtumui, aerodinaminė kokybė skiriasi 1.89 %. Bokšto aerodinaminis šešėlis apytikriai sudaro 1.5 % galios nuostolių, mentės atramų – 3 %.
3. Sudaryta tiksli skaičiavimo schema, leidžianti modeliuoti įvairaus mastelio vertikalų vėjo jėgainių galios kreives, keičiant aerodinaminius profilius, mentės pastatymo kampą, jėgainės matmenis ir sukimosi greičius.
4. Atlikta 159 profilių aerodinaminė analizė. Mentės skaičiavimuose parinkti ir palyginti 4 geriausiomis savybėmis pasižymėję profiliai: „*S1223RTL*“, „*USNPS4*“, „*AH 93W174*“ ir „*MH104_15.28*“. Apskaičiuoti jėgainės aerodinaminiai parametrai bei apkrovos veikiančios mentėje, 5–16 m/s vėjo greičio diapazone.
5. Jėgainės optimizavimo metu, keičiant mentės pastatymo kampą, gautas galios prieaugis siekia 19.5 %. Keičiant mentės stygos ilgį, galios prieaugis – 45 %. Vidutinis jėgainės efektyvumas siekia 34 %, esant 8–13 m/s vėjo greičio intervalui.
6. 4 MW galios, horizontalios ašies vėjo jėgainės „*Vestas*“, sugeneruotos energijos kiekis jūroje per 30 metų laikotarpį siekia 471 GWh. Apskaičiuotosios 4 MW vertikalios ašies vėjo jėgainės – 425 GWh. Sukauptos energijos skirtumas lygus 9.8 %. Įvertinus efektyvumą, vertikalų jėgainių pritaikymas jūroje tampa pranašesnis tik tuomet, jeigu jų gamybos, įrengimo ir eksploatacijos kaštai yra bent 9.8 % mažesni negu horizontalių vėjo jėgainių.

INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

1. R. F. Hirsha, C. F. Jonesb. History's contributions to energy research and policy. *Energy Research & Social Science* 1, 2014. 106–111 p.
2. M. Gismondi. Historicizing transitions: The value of historical theory to energy transition research. *Energy Research & Social Science* 38, 2018. 193–198 p.
3. A. Schaffarczyk. *Understanding Wind Power Technology, Theory, Deployment and Optimization*. West Sussex „John Wiley & Sons“, 2014. 484 p.
4. European Commission. EU Reference Scenario 2016, Energy, transport and GHG emission Trends to 2050, Main results. Prieiga internete:
https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/20160712_Summary_Ref_scenario_MAIN_RESULTS%20%282%29-web.pdf [žiūrėta 2018-05-15].
5. EurObserv'ER. Wind energy barometer, 2017. Prieiga internete:
<https://www.eurobserv-er.org/wind-energy-barometer-2017/> [žiūrėta 2018-05-15].
6. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. Computing America's Offshore Wind Energy Potential, 2016. Prieiga internete:
<https://www.energy.gov/eere/articles/computing-america-s-offshore-wind-energy-potential> [žiūrėta 2018-05-15].
7. Simon Evans. Analysis: UK auction reveals offshore wind cheaper than new gas. Carbonbrief, 2017. Prieiga internete:
<https://www.carbonbrief.org/analysis-uk-auction-offshore-wind-cheaper-than-new-gas> [žiūrėta 2018-05-15].
8. Vėjo ir saulės jėgainių aukcionų kainų palyginimas. Prieiga internete:
<https://www.offshorewind.biz/2018/04/27/orsted-goes-high-and-low-in-german-offshore-wind-auction/> [žiūrėta 2018-05-15];
<https://www.offshorewind.biz/2017/06/06/offshore-wind-powerhouses-call-for-4gw-a-year-tempo-post-2020/> [žiūrėta 2018-05-15];
<https://www.offshorewind.biz/2016/11/09/vattenfall-wins-kriegers-flak-tender-with-eur-49-9-per-mwh-bid/> [žiūrėta 2018-05-15];
<https://windeurope.org/newsroom/news/turkish-wind-power-ready-to-take-off/> [žiūrėta 2018-05-15];
<https://windeurope.org/newsroom/press-releases/latest-german-onshore-auction-results-come-in-at-57euros-per-mwh/> [žiūrėta 2018-05-15];
<https://www.pv-magazine.com/2018/02/20/germanys-auction-for-large-scale-solar-bids-below-e0-04-kwh-for-the-first-time/> [žiūrėta 2018-05-15].

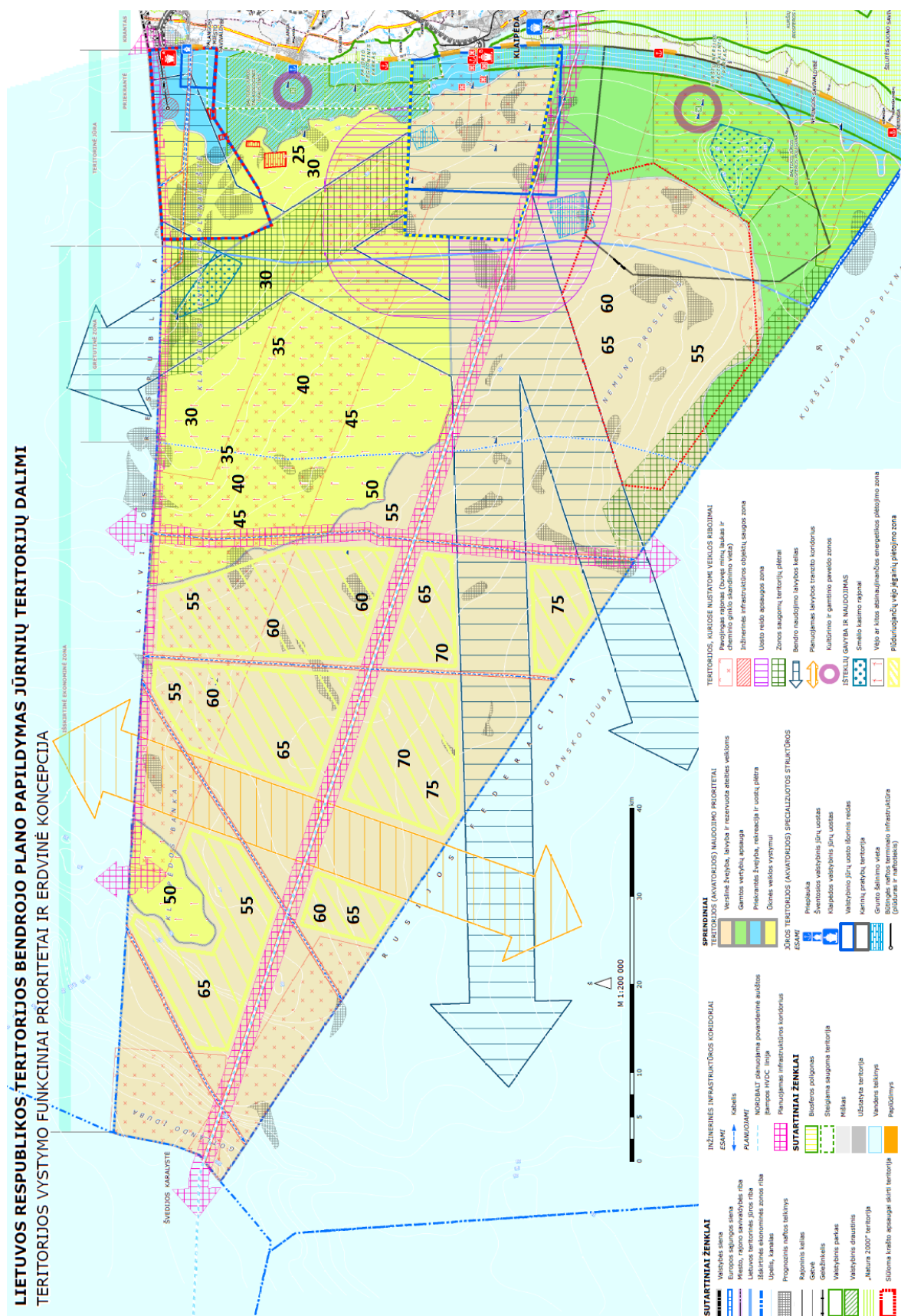
9. M. Marčiukaitis. Perspektyvinių VE plėtrai teritorijų ir prijungimo prie elektros tinklų Lietuvoje galimybių studija, Galutinė ataskaita. Atsinaujinančių išteklių ir efektyvios energetikos laboratorija, Lietuvos energetikos institutas. 2017, 82 p.
10. Įmonių „4energia“, „Renega“, „Eurakas“ ir „Vydmantai wind park“ palyginimas. Prieiga internete: <https://www.4energia.ee/lt> [žiūrėta 2018-05-15];
<http://www.renega.lt/lt/> [žiūrėta 2018-05-15];
<http://www.le.lt/lt/apie-mus/9#grupes-imones> [žiūrėta 2018-05-15];
<https://vwp.lt/apie-mus/> [žiūrėta 2018-05-15].
11. Lietuvos elektros energijos ir šilumos energetinis suvartojimas. Prieiga internete: <http://www.lsta.lt/lt/pages/apie-silumos-uki/silumos-suvartojimo-analize> [žiūrėta 2018-05-15];
<https://enmin.lrv.lt/lt/naujienos/elektros-vartojimas-lietuvoje-didziausias-per-ketvirti-amziaus> [žiūrėta 2018-05-15].
12. Įregistruotų automobilių skaičius Lietuvoje, statistika. Prieiga internete: <https://www.regitra.lt/lt/atviri-duomenys/> [žiūrėta 2018-05-15].
13. X. Sun, D. Huang, G. Wu. The current state of offshore wind energy technology development. Energy 41, 2012. 298–312 p.
14. B. Geyer, R. Weissea, P. Bisling. Climatology of North Sea wind energy derived from a model hindcast for 1958–2012. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, V147, 2015. 18–29 p.
15. M. Marčiukaitis, R. Marčiukaitienė, A. Tumosa. Vėjo greičio kitimo dėsningumų Lietuvos pajūrio regione tyrimas. Kaunas, Lietuvos energetikos institutas, 2009. 8 p.
16. Jūrinių tyrimų konsorciumas. Lietuvos Baltijos jūros aplinkos apsaugos valdymo stiprinimo dokumentų parengimas, III tarpinė ataskaita, Klaipėda, 2012. 497 p.
17. Erich Hau. Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics, 2nd edition. Springer, Germany, 2006. 792 p.
18. Stasys Kytra. Atsinaujinantys energijos šaltiniai. Kaunas, „Technologija“, 2006. 301 p.
19. Kabinos konstrukcija. Prieiga internete: <http://www.whirlopedia.com/index.php/wind-turbine-design/> [žiūrėta 2018-05-15].
20. Mentės konstrukcija. Prieiga internete: <https://www.windpowerengineering.com/mechanical/blades/building-a-better-turbine-blade/> [žiūrėta 2018-05-15].
21. S. Engstrom. T. Lyrner. Tall towers for large wind turbines. Stockholm, Elforsk, 60 p.
22. Bokšto konstrukcija. Prieiga internete: <http://www.hitachi.com/products/power/wind-turbine/feature/blade/> [žiūrėta 2018-05-15].
23. M. Casini. Small Vertical Axis Wind Turbines for Energy Efficiency of Buildings. Clean Energy Technologies V4, 2016. 10 p. Paveikslo 11 prieiga internete:

- <https://www.pinterest.com/pin/447826756681015758/> [žiūrėta 2018-05-15].
24. A. Myhr, C. Bjerksetter. Levelised cost of energy for offshore floating wind turbines in a life cycle perspective. Norway, University of Life Sciences, 2014. 15 p.
 25. Lentelėje pateiktų įmonių ir projektų duomenys. Prieiga internete:
<http://www.nenuphar-wind.com/en/22-the-twinfloat.html> [žiūrėta 2018-05-15];
<https://seatwirl.com/products/seatwirl-s2/> [žiūrėta 2018-05-15];
<https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/assets.eti.co.uk/legacyUploads/2014/03/PelaStar-LCOE-Paper-21-Jan-2014.pdf> [žiūrėta 2018-05-15];
<https://www.4coffshore.com/windfarms/floatgen-project-france-fr59.html> [žiūrėta 2018-05-15];
<https://www.equinor.com/en/what-we-do/hywind-where-the-wind-takes-us/our-ambitions-for-hywind.html> [žiūrėta 2018-05-15];
<https://www.osti.gov/servlets/purl/1339449> [žiūrėta 2018-05-15].
 26. Vertikalias vėjo jėgainės gaminanti įmonė. Prieiga internete:
<http://www.anew-institute.com/wind-turbine-efficiency.html> [žiūrėta 2018-05-15].
 27. A. R. Jha. Wind Turbine Technology. Taylor & Francis Group, London, 2011. 286 p.
 28. C. Galinos, T. J. Larsen. Vertical axis wind turbine design load cases investigation and comparison with horizontal axis wind turbine. Energy Procedia, 2016. 10 p.
 29. L. C. Pagnini, M. Burlando. Experimental power curve of small-size wind turbines in turbulent urban environment. Applied Energy 154, 2015. 112–121 p.
 30. E. Lasauskas. Skrydžio principai. Vilnius „Technika“, 2008. 182 p.
 31. P. Akulavičius, A. Skurdenis. Aerodinamika ir skrydžių dinamika. Vilnius „Rosma“, 2000. 256p.
 32. Martin O. L. Hansen. Aerodynamics of Wind Turbines, 3rd edition. Routledge, New York, 2015. 189 p.
 33. P. Tchakoua, R. Wamkeue. A New Approach for Modeling Darrieus-Type Vertical Axis Wind Turbine Rotors Using Electrical Equivalent Circuit Analogy: Basis of Theoretical Formulations and Model Development. Energies 8, 2015. 10684–10717 p.
 34. A. Rezaeiha, I. Kalkman, B. Blocken. Effect of pitch angle on power performance and aerodynamics of a vertical axis wind turbine. Applied Energy 197, 2017. 132–150 p.
 35. T. Mai Phat. Fatigue Analysis for the 4 MW Vertical Axis Wind Turbine: Projet Eole. Intersol Eighty-Five, Volume 4, 1986. 2057–2061 p.
 36. M. Mauri, I. Bayati, M. Belloli. Design and realisation of a high-performance active pitchcontrolled H-Darrieus VAWT for urban installations. Politecnico di Milano, Milano, Italy, 2012. 6 p.
 37. M. Ghasemian, N. Ashrafi, A. Sedaghat. A review on computational fluid dynamic simulation techniques for Darrieus vertical axis wind turbines. Energy Conversion and Management 149, 2017. 87–100 p.

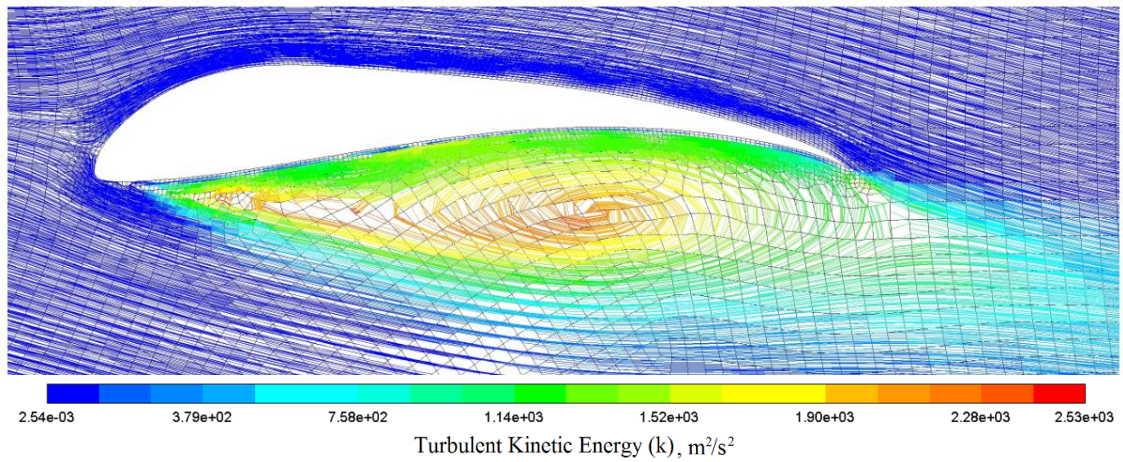
38. Richard Von Mises. Theory of flight. Dover publications, New York, 1959. 672 p.
39. Statistinių vėjo parametrų duomenų bazė. Prieiga internete:
<https://waterdata.dhigroup.com/metocean-on-demand/#/main> [žiūrėta 2018-05-15]
40. M. Lydia, S. SureshKumar. A Comprehensive Review on Wind Turbine Power Curve modeling techniques. Renewable and Sustainable Energy Reviews 30, 2014. 452–460 p
41. R. Pandit, D. Infield. Using Gaussian Process Theory for Wind Turbine Power Curve Analysis with Emphasis on the Confidence Intervals. University of Strathclyde, Glasgow, 2017. 7 p.
42. 4 MW galios „Vestas“ jėgainės parametrai ir kaina. Prieiga internete:
<http://nozebra.ipapercms.dk/Vestas/Communication/Productbrochure/4MWbrochure/4MWProductBrochure/> [žiūrėta 2018-05-15];
<https://www.windpowermonthly.com/article/1228426/unmasking-turbine-prices> [žiūrėta 2018-05-15];
http://www.windustry.org/how_much_do_wind_turbines_cost [žiūrėta 2018-05-15].
43. R. Kemp. Airfoil Optimization for vertical axis wind turbines. Master thesis, TU Delft, Netherlands, 2015. 93 p.
44. A. Zanon, A Vortex panel method for vawt in dynamic stall, Ph.D. thesis, University of Udine, 2011.
45. Z. Wu, Y.Cao, S. Nie. Effects of rain on vertical axis wind turbine performance. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics 170, 2017. 128–140 p.
46. A. Rezaeihaa, I. Kalkmanb. Effect of the shaft on the aerodynamic performance of urban vertical axis wind turbines. Energy Conversion and Management 149, 2017. 616–630 p.

PRIEDAI

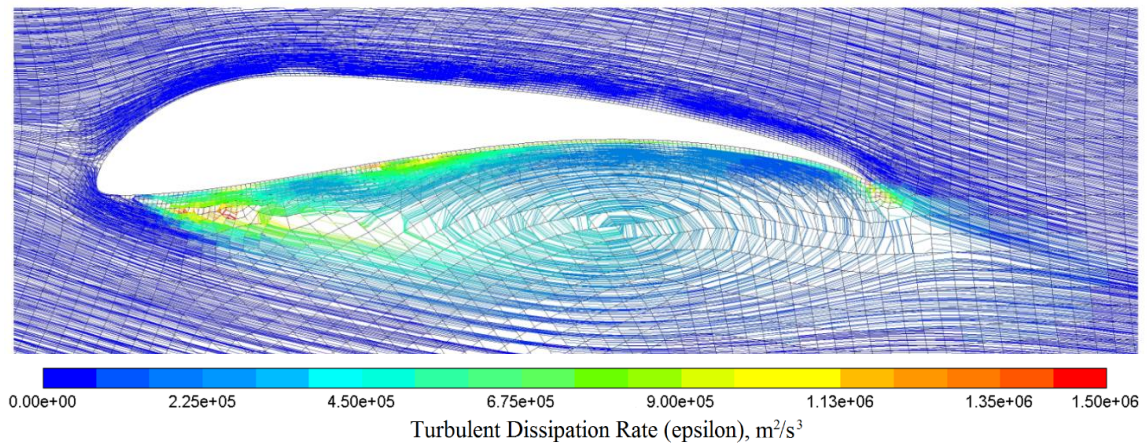
1. Lietuvos Respublikos jūrinė teritorija su potencialiu plotu plūduriuojančioms vėjo jėgainėms vystyti (geltonas brūkšniuotas plotas).



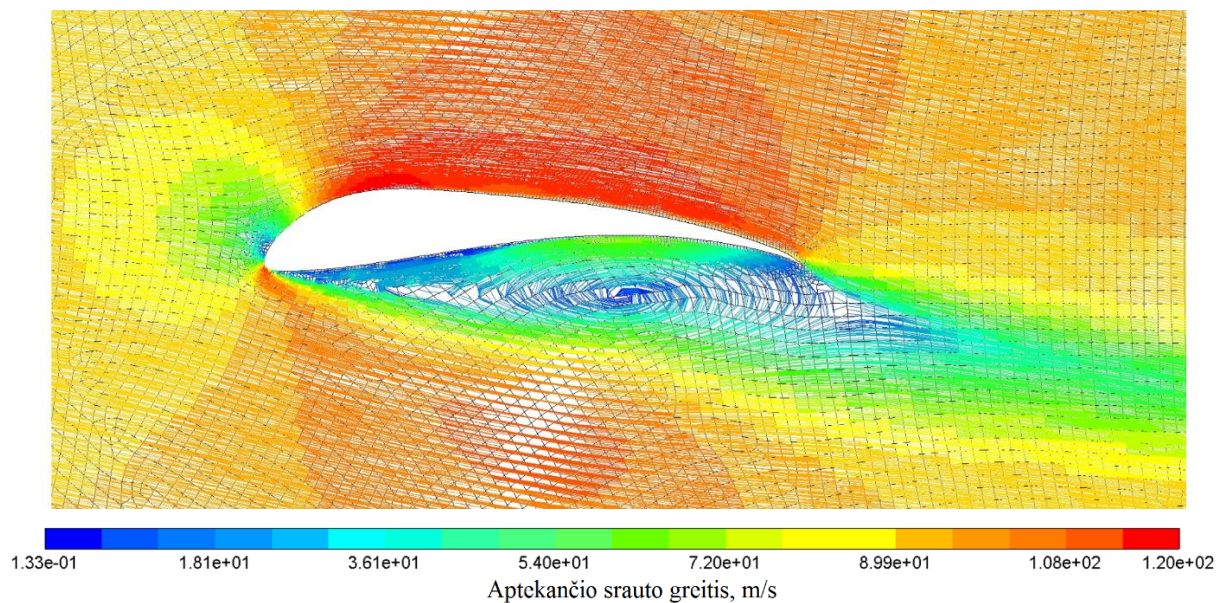
2. „Ansys Fluent“ programos rezultatai: turbulentiškumo kinetinė energija „ k “ (a), turbulentiškumo sklaidos koeficientas „ ϵ “ (b), srauto greitis aplink profilį (c). Skaičiavimai pateikiami, esant atakos kampui -8° , „ $Reynolds$ “ skaičiui – $5.6 \cdot 10^6$, stygos ilgiui – 1 m.



a)

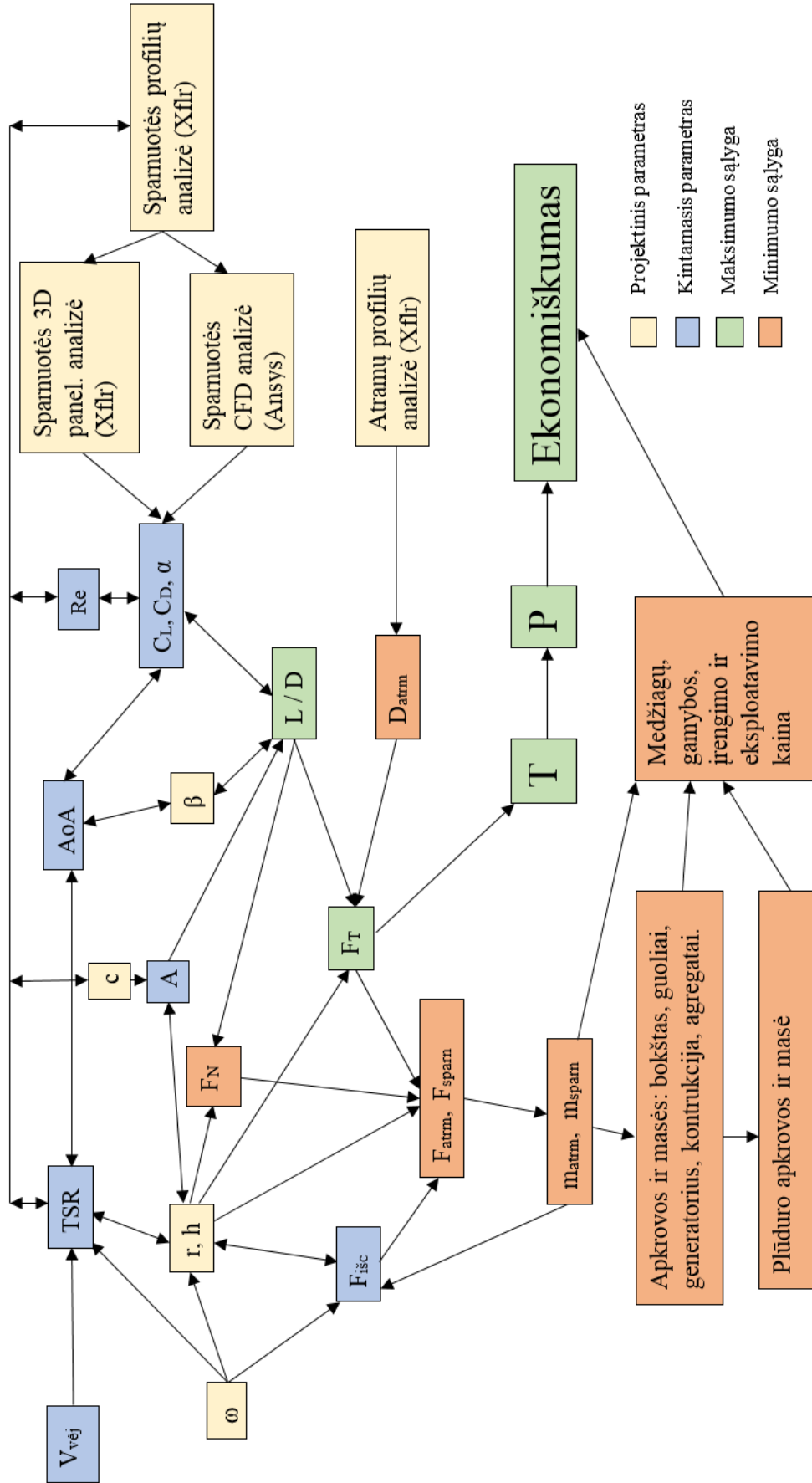


b)



c)

3. Analizės, projektavimo ir jėgų skaičiavimo schema



- 1) $V_{vėj}$ – vėjo greičio dydis [m/s];
- 2) TSR – sparnuotės linijinio ir vėjo greičio santykis dydis;
- 3) AoA , Re – atakos kampas [°] ir Reynolds'o skaičius;
- 4) ω , r , h , c – kampinis greitis [rad/s], spindulys, aukštis, styga [m];
- 4) C_L , C_D – keliamosios ir pasipriešinimo jėgos koef.;
- 5) L , D – keliamoji ir pasipriešinimo jėgos [N];
- 6) F_N , F_T , F_{isc} – normalinė, tangentinė ir išcentrinės jėgos [N];
- 7) F_{atrm} , F_{spam} – atramų ir sparnuotės suminės jėgos [N];
- 8) m_{atrm} , m_{spam} – masės [kg];
- 9) T – sukimo momentas [Nm];
- 10) P – galia [W].

4. Skirtingų profilių pritaikymas mentėje. Aerodinaminės kokybės reikšmės apsisukime, vėjo greičio diapazonas: 5–16 m/s.

