



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS
AVIACINĖS MECHANIKOS KATEDRA

Jolanta Sketrytė

VĖJO JĖGAINĖS SU HORIZONTALIA AŠIMI ANALIZĖ
WIND TURBINES WITH A HORIZONTAL AXIS ANALYSIS

Baigiamasis magistro darbas

Aviacijos mechanikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H42001
Aeronautikos inžinerija

Vilnius, 2012

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS
AVIACINĖS MECHANIKOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

Eduardas Lasauskas
(Vardas, pavardė)

(Data)

Jolanta Sketrytė

VĖJO JĖGAINĖS SU HORIZONTALIA AŠIMI ANALIZĖ
WIND TURBINES WITH A HORIZONTAL AXIS ANALYSIS

Baigiamasis magistro darbas

Aviacijos mechanikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H42001

Aeronautikos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2012

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ANTANO GUSTAIČIO AVIACIJOS INSTITUTAS
AVIACINĖS MECHANIKOS KATEDRA

Technologijos mokslo sritis
Mechanikos inžinerija mokslo kryptis
Mechanikos inžinerija studijų kryptis
Aeronautikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas
621H42001

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

Eduardas Lasauskas

(Vardas, pavardė)

(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

2010-10-20 Nr.

Vilnius

Studentui (ei) JOLANTAI SKETRYTEI

.....
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema:

**Vėjo jėgainės su horizontalia ašimi analizė
Wind turbines with a horizontal axis analysis**

patvirtinta 2010 m. lapkričio 15 d. dekanų potvarkiu Nr. AI

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2012 m. gegužės 31 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

1. Išanalizuoti literatūrą darbo tema.
2. Išnagrinėti horizontalios ašies vėjo jėgainės aerodinaminių charakteristikų skaičiavimų metodus.
3. Apskaičiuoti pasirinktos jėgainės charakteristikas ir jų priklausomybę nuo jėgainės parametrų.
4. Suformuluoti išvadas.

Vadovas

.....
(Parašas)

.....
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

.....
(Parašas)

.....
(Vardas, pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Antano Gustaičio aviacijos institutas
Aviacinės mechanikos katedra

ISBN ISSN
Egz. sk. 1
Data: 2012 05 21

Magistro baigiamasis darbas

Pavadinimas: **Vėjo jėgainės su horizontalia ašimi analizė**

Autorius **Jolanta Sketrytė**

Vadovas **Eduardas Lasauskas**

Kalba



lietuvių



užsienio

Baigiamajame darbe nagrinėjamos horizontaliosios ašies vėjo jėgainės mentės aerodinaminės charakteristikos, parametrų reikšmių kaita, priklausomai nuo jėgainės parametrų, nuo vėjo greičio. Išnagrinėti įvairūs vėjo jėgainės aerodinaminių charakteristikų skaičiavimo metodai. Jėgainės projektavimui, aerodinaminių charakteristikų analizei, pasirinkta *QBlade* programa, kuri paremta menčių elementų momentų teorija. Suprojektuota mentė, parinktas profilis, nustatyta geometrija. Ištirta, kaip suprojektuotos jėgainės parametrai kinta nuo skirtingo apsisukimų skaičiaus, kaip keičiasi sukuriamą galia, keičiant geometrinius parametrus. Pasirinkus jėgainės žingsninį reguliavimo tipą, nustatyta, koks mentės žingsnio kampas reikalingas esant skirtingam vėjo greičiui.

Prasminiai žodžiai: HAVJ projektavimas, mentės elementų momentų teorija, mentės profilis, vėjo energija, aerodinamika.

Vilnius Gediminas technical university
Antanas Gustaitis institute of aviation
The chair of aviation mechanic

ISBN ISSN
Egz. sk. 1
Data: 2012 05 21

Master's thesis

Title: **Wind turbines with a horizontal axis analysis**

Author **Jolanta Sketrytė**

Academic supervision **Eduardas Lasauskas**

Thesis language

☒ Foreign(English)

☐ Lithuanian

The final work analyzes the horizontal axis wind turbine blade aerodynamic characteristics, the parameter values change, depending on the turbine parameters, the wind speed. Examine the various wind turbine aerodynamic performance calculation methods. Turbine design, the aerodynamic characteristics of the analysis of selected QBlade program, which is based on blade element momentum theory. Designed blade, the selected profile, the geometry. In a study designed to change power settings on the different number of rpm, the changes in power created by changing the geometrical parameters. Selecting the type of power control step and set the blade pitch angle as needed to different wind speeds.

Key words: HAWT design, the blade element momentum theory blade profile, wind energy, aerodynamics.

Turinys

ILIUSTRACIJŲ SĄRAŠAS.....	8
LENTELIŲ SĄRAŠAS.....	10
SANTRUMPOS.....	11
ĮVADAS.....	12
1. BAIGIAMOJO DARBO SPRENDŽIAMOS PROBLEMOS APRAŠYMAS.....	13
1.1. Tyrimo objektas.....	13
1.2. Darbo tikslas ir uždaviniai.....	15
1.3. Temos naujumas ir aktualumas	16
1.4. Tyrimo metodai	16
2. PROBLEMOS ANALIZĖ.....	17
2.1 Mokslinės literatūros apžvalga nagrinėjama tema.....	17
2.2 Vėjo jėgainių aerodinamika.....	18
2.3 Horizontaliosios ašies vėjo jėgainės aerodinaminių charakteristikų skaičiavimo metodų analizė.....	20
2.4 Jėgainės analizei naudojamų programų aprašymas.....	30
3. TEORINIS PAGRINDIMAS.....	32
3.1 Profilio parinkimas projektuojant HAVJ mentę.....	32
3.2 Mentės projektavimas.....	39
3.3 360° Poliarė.....	42
3.4 Rotoriaus ir turbinos modeliavimas.....	44
4. EKSPERIMENTAS IR JO REZULTATŲ ĮVERTINIMAS, PALYGINAMOJI ANALIZĖ.....	54
4.1 Jėgainės galios priklausomybė nuo skirtingo apsisukimų greičio.....	54
4.2 Jėgainės reguliavimas keičiant mentės žingsnio kampą.....	55
4.3 Jėgainės charakteristikos naudojant NACA 5518, NACA 4421 ir NACA 23015 mentės profilius.....	57
4.4 Jėgainės charakteristikos keičiant mentės geometrinius parametrus.....	62
5. IŠVADOS.....	68
MOKSLINĖS LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	69
PRIEDAI.....	70

ILIUSTRACIJŲ SĄRAŠAS

1 pav. Dvi rotoriaus padėtys	13
2 pav. HAVJ dydžiai (Martin <i>et al.</i> 2008: 7-18).....	14
3 pav. Vėjo jėgainės naudingumo koeficiento priklausomybė nuo santykinio rotoriaus greičio (Petrauskas 2001: 74-78).....	15
4 pav. Keliamosios ir pasipriešinimo jėgų santykis (Martin <i>et al.</i> 2008: 8).....	18
5 pav. RISO A1- serijos profiliai.....	21
6 pav. Klasikinė momentų teorija. Idealaus oro srauto modelis (Martin <i>et al.</i> 2008: 28).....	22
7 pav. Propelerio mentės veikiančios jėgos ir greičiai. Mentės pjūvis (Martin <i>et al.</i> 2008: 36).....	26
8 pav. Duomenys ir duomenų judėjimas menčių elementų momentų teorijos modelyje.....	31
9 pav. NACA profilio geometrinė konstrukcija (J. L. Tangler <i>et al.</i> 1995: 1-12).....	33
10 pav. NACA šeimos profiliai.....	34
11 pav. NACA šeimos profilių geometriniai parametrai.....	34
12 pav. NACA profilių poliarė.....	35
13 pav. NACA profilių keliamosios jėgos kreivė.....	35
14 pav. Momento koeficiento priklausomybė nuo atakos kampo $C_M(\alpha)$	36
15 pav. Profilio NACA 5518 poliarė, kai $Re=1,0 \cdot 10^6$	37
16 pav. Profilio NACA 5518 keliamosios jėgos koeficiento priklausomybė nuo atakos kampo, kai $Re=1,0 \cdot 10^6$	37
17 pav. Profilio NACA 5518 momento koeficiento priklausomybė nuo atakos kampo, kai $Re=1,0 \cdot 10^6$	38
18 pav. NACA 5518 profilio charakteristikų suvestinė, kai $Re=1,0 \cdot 10^6$	39
19 pav. Mentės geometriniai parametrai.....	40
20 pav. Suprojektuota mentė.....	40
21 pav. Aerodinaminis efektyvumas priklausomai nuo menčių skaičiaus (Tangler <i>et al.</i> 1995: 2-5).....	42
22 pav. 360° Poliarė.....	42
23 pav. Keliamosios jėgos ir pasipriešinimo koeficientų priklausomybė nuo atakos kampo.....	44
24 pav. MEM parametrų nustatymas.....	45

25 pav. Mentės elementų sinusoidiniai tarpai.....	46
26 pav. Ašinio indukcinio koeficiento svyravimai esant lengvoms ir sunkioms apkrovoms (Maheri <i>et al.</i> 2008: 3–4).....	46
27 pav. Svyravimų slopinimas naudojant skirtingus slopinimo koeficientus (Maheri <i>et al.</i> 2008: 3–4).....	47
28 pav. Rotoriaus modeliavimas.....	50
29 pav. Turbinos nustatymas ir modeliavimas.....	51
30 pav. Galios priklausomybė nuo vėjo greičio esant skirtingam kintamų nuostolių koeficientui.....	52
31 pav. Jėgainės galios priklausomybė nuo vėjo greičio.....	53
32 pav. Jėgainės galios skaičiavimas <i>QBlade</i> programa keičiant apsisukimų greitį.....	55
33 pav. Vėjo jėgainės galios ir mentės žingsnio kampas priklausomai nuo vėjo greičio.....	56
34 pav. NACA 5518, NACA 4421 ir NACA 23015 profilių charakteristikos.....	58
35 pav. Mentės geometriniai parametrai, profilis – NACA 4421.....	59
36 pav. Mentės geometriniai parametrai, profilis – NACA 23015.....	60
37 pav. Galios koeficiento priklausomybė nuo mentės galo greičio	61
38 pav. Jėgainės galios priklausomybė nuo vėjo greičio su skirtingo profilio mentėmis.....	62
39 pav. Mentės geometriniai parametrai padidinus juos 10%.....	63
40 pav. Mentės geometriniai parametrai padidinus juos 20%.....	64
41 pav. Galios koeficiento priklausomybė nuo mentės galo greičio lyginant skirtingas mentes.....	65
42 pav. Jėgainės galios priklausomybė nuo vėjo greičio keičiant mentės geometrinius parametrus.....	66

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Jėgainių klasifikavimas pagal dydį (Martin <i>et al.</i> 2008: 7-18).....	14
2 lentelė. Keliamosios jėgos ir pasipriešinimo koeficientai esant skirtingam atakos kampui.....	43
3 lentelė. Mentės žingsnio kampas priklausomai nuo vėjo greičio.....	56
4 lentelė. Galios priklausomybė nuo vėjo greičio keičiant apsisukimų skaičių ir geometrinius parametrus.....	67

SANTRUMPOS

VJ – Vėjo jėgainė

VAVJ – vertikaliosios ašies vėjo jėgainė

HAVJ – horizontaliosios ašies vėjo jėgainė

MEM – mentės elementų momentų teorija

IVADAS

Pastarąjį dešimtmetį daugelis valstybių vėjo energiją pradėjo vertinti kaip nacionalinį savo šalies turtą, lygiai taip pat kaip naftos ar dujų išteklius. Tik skirtingai nei pastarieji – vėjo energijos resursai yra neišsenkantys. Panaudojus vėjo energiją – statant vėjo jėgaines, galima atsiriboti nuo elektros tinklų. Tai reiškia, sutaupyti pinigų, nes energetiniai resursai vis brangsta. Elektros energiją galima išgauti švarią, aplinką tausojančiu būdu. Vėjo energija – vienas perspektyviausių atsinaujinančios energijos šaltinių. Ji labai priklauso nuo geografinės padėties ir žemės dangos reljefo. Šiuolaikinės vėjo jėgainės – atsparios ir ilgaamžės mašinos. Jos labai našiai paverčia vėjo energiją elektra.

Lietuvos teritorijoje vidutinis vėjo greitis yra 3 – 4,5 m/s, todėl čia tikslinga statyti tik nedidelės galios, vadinamąsias, pavienio vartojimo vėjo jėgaines. Šios jėgainės dirba nepriklausomai nuo išorinio elektros tinklo, tačiau gali dirbti kartu su kitais elektros generatoriais, kaip sudėtinės integruotos sistemos dalys. Paprastai tokios sistemos, priklausomai nuo galingumo, aprūpina elektros energija sodybas, gyvenamuosius/ūkinius pastatus ar smulkias įmones. Tokios sistemos ypač naudingos vietovėse toli nutolusiose nuo elektros tinklų arba ten, kur trūksta galingumo, o pasididinti jo nėra galimybių arba tai labai brangu.

Šio baigiamojo darbo tema: „Vėjo jėgainės su horizontalia ašimi analizė“. Darbe analizuojamos horizontalios ašies vėjo jėgainės aerodinaminės savybės. Ši baigiamojo darbo tema aviacinės mechanikos studijose skamba kiek neįprastai, bet be aerodinaminių žinių, be inžinerinio mąstymo, tokios jėgainės neįmanoma suprojektuoti. Stebėtina, kad iš pirmo žvilgsnio vėjo jėgainės pasirodo kaip nesudėtingas įrenginys (palyginus su orlaiviu), bet jų menčių profiliai, reikiamas atsparumas, medžiagų parinkimas, kad jos būtų kuo lengvesnės, kuo mažesnis pasipriešinimas, kuo didesnė sukeliamą trauką – visa tai dideli reikalavimai, kurie keliami projektuojant, o po to ir gaminant vėjo jėgainės mentes. Gaminant jėgainę pirmiausia apskaičiuojamos aerodinaminės charakteristikos, išanalizuojami galimi skaičiavimo metodai, taip pat patikrinama aerodinaminių charakteristikų kaita priklausomai nuo jėgainės parametrų.

1. BAIGIAMOJO DARBO SPRENDŽIAMOS PROBLEMOS APRAŠYMAS

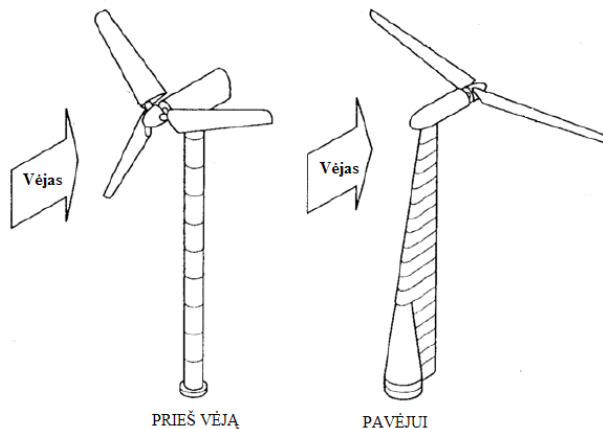
1.1 Tyrimo objektas

Baigiamojo darbo tyrimo objektas – vėjo jėgainė su horizontalia ašimi. Vėjo jėgainė – tai įrenginys, kuris verčia kinetinę vėjo energiją į elektros energiją. Vėjo jėgainės skirstomos į du tipus: horizontaliosios arba vertikaliosios ašies. Horizontaliosios ašies vėjo jėgainės užima didžiąją dalį rinkos. Jų efektyvumas didesnis už vertikaliosios ašies jėgaines. Jos pigesnės, didesnis naudingumas – pagamina daugiau elektros energijos. Daug kartų mažesnis turbinos svoris todėl jai nereikia didelio atviro lauko. Tačiau asmeniniai vartotojai vis dažniau renkasi vertikaliosios ašies vėjo jėgainės. Jos yra kur kas brangesnės už horizontalios ašies jėgaines, bet turi savo privalumų. Šios jėgainės pradeda veikti pučiant silpnam vėjui arba esant turbulencijai. Jos nekelia didelio triukšmo, joms nesvarbi vėjo kryptis ir greitis, pučiant stipriam vėjui nėra būtinybės išjungti įrangos. Ją galima eksploatuoti šalia gyvenamųjų namų arba tiesiog ant jų.

Vertikaliosios ašies vėjo jėgainės skirstomos į kelis tipus: *Savonius* ir *Darrieus* tipo. *Savonius* tipo jėgainės nereikia iškelti aukštai, jos konstrukcija gana paprasta ir kainuoja daug mažiau, nei horizontaliosios ašies. *Darrieus* tipo turbina susideda iš keleto aerodinaminių paviršių dažniausiai (bet ne visada) sumontuotų ant sukimosi ašies ar rėminės konstrukcijos. Šio tipo jėgainės yra didesnio naudingumo, nei propelerinės, bet dėl kintančio vėjo greičio mentes patiria nuovargį.

Horizontaliosios ašies vėjo jėgainė – mašina, kuri paverčia vėjo energiją į elektrą. Tuo ir skiriasi vėjo jėgainė nuo malūno, kuris vėjo energiją verčia į mechaninę energiją. Šio tipo jėgainių naudingumo koeficientas yra gerokai didesnis už VAVJ koeficientą. HAVJ klasifikuojamos pagal:

- rotorius padėti, rotorius sukasi prieš vėją arba pavėjui (1 pav. prieš vėją – trijų menčių rotorius, pavėjui – dviejų menčių rotorius)



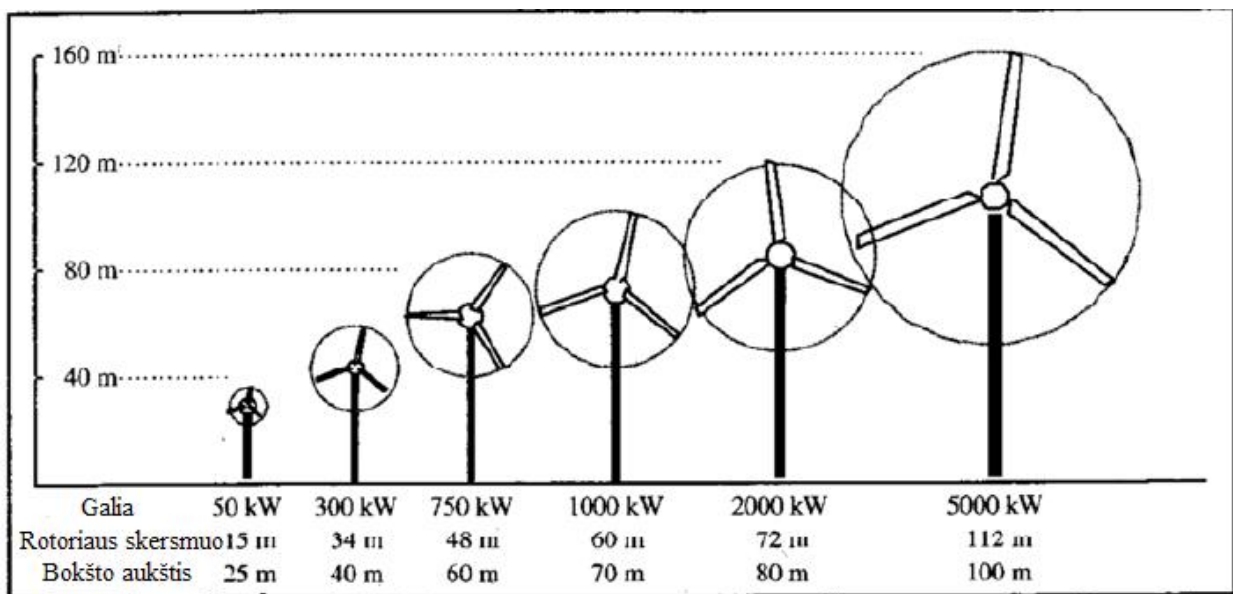
1 pav. Dvi rotorius padėtys

- menčių žingsnį: pastovus, kintamas ar fiksuotas. Reguluojamas atakos kampas reikalingas, kad jėgainė optimaliai išnaudotų skirtingą vėjo greitį;
- menčių skaičių, kuo mažiau menčių – tuo daugiau aps/min ir atvirkščiai, kuo daugiau menčių – tuo mažiau aps/min tačiau didesnis sukimo momentas prie to paties rotoriaus diametro;
- rotoriaus kontrolę;
- jėgainės dydį. Jėgainės skirstomos į mažas, vidutines ir dideles, kokie tokių jėgainių rotoriaus skersmenys ir galia, nurodyta jėgainių klasifikavimo pagal dydį lentelėje (1. lentelė).

1 lentelė. Jėgainių klasifikavimas pagal dydį (Martin *et al.* 2008: 7-18)

Dydis	Rotoriaus skersmuo	Galia
Maža	Mažesnis nei 12 m	Mažiau nei 40 kW
Vidutinė	Nuo 12 m iki 45 m	Nuo 40 kW iki 999 kW
Didelė	45 m ir daugiau	1 MW ir daugiau

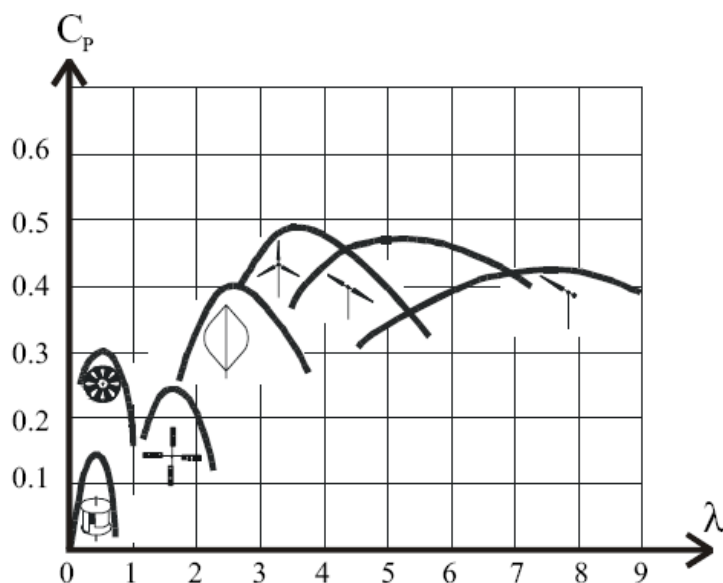
Norint geriau suvokti jėgainės galios, rotoriaus skersmens ir bokšto aukščio santykį, patariama naudotis šiuos parametrus apibūdinančia schema (2 pav.).



2 pav. HAVJ dydžiai (Martin *et al.* 2008: 7-18)

Pagrindinės horizontaliosios ašies vėjo jėgainių dalys yra vėjaratis, greičių dėžė, generatorius, gaubtas ir bokštas.

Didžiausias teorinis rotoriaus pasiekiamas naudingumo koeficientas, kuris apskaičiuojamas kaip veleno mechaninės energijos ir oro srauto kinetinės energijos santykis, gali būti 59% (Betzo riba). 3 pav. matyti, kad rotorius, kuriuose vyrauja kėlimo jėga, naudingumo koeficientas yra didesnis. Santykinis rotoriaus greitis skaičiuojamas kaip rotoriaus mentės galo linijinio greičio santykis su vėjo greičiu. Kiekvieno tipo rotorius turi savąjį optimalų santykinį greitį, kuriam esant jo naudingumo koeficientas didžiausias.



3 pav. Vėjo jėgainės naudingumo koeficiento priklausomybė nuo santykinio rotoriaus greičio.

(Petrauskas 2001: 74-78)

Baigiamajam darbui pasirinkta horizontaliosios ašies vėjo jėgainių analizė, tokio tipo jėgainės plačiai paplitusios, gamyba pigesnė nei VAVJ, jas galima pritaikyti asmeniniam vartojimui. Nuo šių metų pradžios vėjo jėgainės iki 10 m aukščio ir iki 10 kW galingumo įtrauktos į nesudėtingų statinių I grupę. Tokioms jėgainėms įsirengti nereikia statybos leidimo ir kitų sudėtingų derinimo procedūrų. Kiekvienas norintis sutaupyti, siekiantis elektros energiją gauti neteršdamas aplinkos, gali tokią jėgainę pasistatyti savo kieme.

1.2 Darbo tikslas ir uždaviniai

Magistro baigiamojo darbo tikslas – išanalizuoti horizontaliosios ašies vėjo jėgainę. Išnagrinėti aerodinamines charakteristikas, parametrų reikšmių kaitą, priklausomai nuo jėgainės galios, nuo vėjo greičio. Išnagrinėti įvairius aerodinaminių charakteristikų skaičiavimo metodus.

Uždaviniai:

- Išanalizuoti mokslinę literatūrą darbo tema.
- Išnagrinėti horizontaliosios ašies vėjo jėgainės aerodinaminių charakteristikų skaičiavimų metodus.
- Apskaičiuoti pasirinktos jėgainės charakteristikas ir jų priklausomybę nuo jėgainės parametrų.
- Suformuluoti išvadas.

1.3 Temos naujumas ir aktualumas

Baigiamojo darbo tema: „Vėjo jėgainės su horizontalia ašimi analizė“ labai aktuali Lietuvoje. Lietuvoje vėjo jėgainės pagamina tik apie 1 proc. suvartojamos elektros energijos. Siekiama, kad bus pagaminama apie 7 proc. Pavieniai vartotojai pastaruoju metu vis dažniau renkasi nedidelės galios vėjo jėgainės. Jiems svarbu, kad jėgainė būtų kuo pigesnė ir naudingesnė. HAVJ pagrindiniai privalumai būtent tokie. Horizontaliosios ašies vėjo jėgainės greitaieigiškesnės, mažesnio svorio, vieno įdiegto kilovato kaina paprastai yra mažesnė negu vertikaliosios ašies jėgainių.

Žmonės, mėgstantys konstruoti, lengvai gali tokią jėgainę susikonstruoti namuose. Apskaičiavus reikiamus parametrus (aerodinaminius, stiprumo, pasirinkus tinkamą menčių skaičių ir t. t.) galima pradėti gamybą.

1.4 Tyrimo metodai

Rašant baigiamąjį darbą taikomi šie darbo metodai: *analitinis metodas*, kuriuo remiantis atlikta vėjo jėgainių, aerodinaminių skaičiavimų šaltinių, literatūros bei įvairių straipsnių analizė. *Lyginamasis metodas* taikomas analizuojant skirtingų aerodinaminių skaičiavimų metodus. *Tiriamasis metodas*, skaičiuojant pasirinktos jėgainės charakteristikas, priklausomai nuo jėgainės parametrų.

2 PROBLEMOS ANALIZĖ

2.1 Mokslinės literatūros apžvalga

Atliekant užduotį naudota įvairi literatūra, moksliniai šaltiniai ir publikacijos, interviu, paskaitų medžiaga ir internetiniai ištekliai, visa tai leidžia detaliau įsigilinti į nagrinėjamą temą.

Markevičiaus ir Katino straipsnis (2003: 22-27) padėjo aiškiai išsakyti atsinaujinančių energijos išteklių plėtotę ir darnios energetikos raidos epizodus Lietuvoje. Straipsnyje nurodyti vėjo energetikos privalumai ir trūkumai, pateikti įvairių tipų elektrinių energetiniai atsipirkimo rodikliai, vėjo energetikos perspektyvos Lietuvoje. Šiame straipsnyje daugiau ekonominių rodiklių, o štai Petrauskas, rašydamas apie modernių vėjo jėgainių savybes (2001: 74-78), pateikė nemažai informacijos apie technines jėgainių charakteristikas. Viena iš jų, tai naudingumo koeficiento priklausomybė nuo santykinio rotoriaus sukimosi greičio. Vėjo jėgainių klasifikacija, jų palyginimas aprašyti Gulbino straipsnyje (2009: 214-219). Taip pat čia pateikiama daug informacijos apie vėjaračius, skirtus nedidelės galios vertikaliosios ašies vėjo jėgainėms. Šis autorius parašė nemažai straipsnių apie vėjo jėgaines.

Nemažai informacijos apie jėgainių galios reguliavimą yra straipsnyje „Vėjo jėgainių galios reguliavimas“ (Gulbinas 2007: 81-94), čia analitiniais tyrimais nustatyta mentės traukos jėgos priklausomybė nuo jos pastatymo kampo.

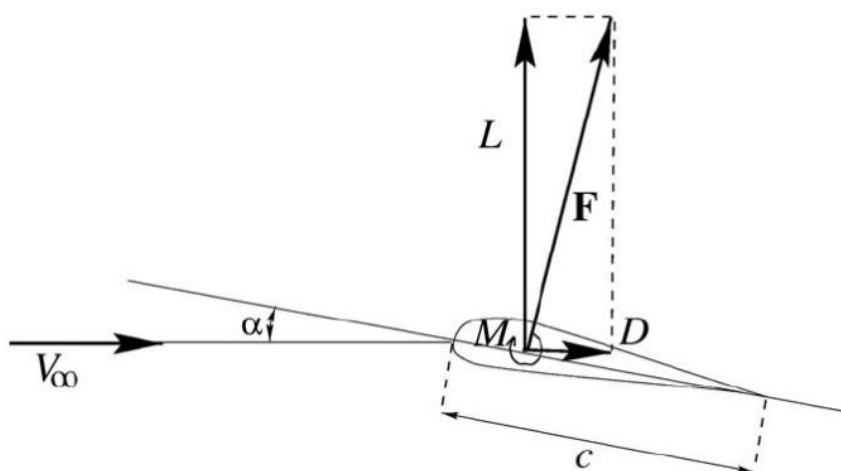
Apie aerodinamines charakteristikas, svarbiausius parametrus, aerodinaminio paviršiaus profilį visa informacija pateikta Roskamo knygoje (1997: 51-94). Čia aprašyta profilio geometrija, veikiančios jėgos ir momentai, profilio projektavimas, visa metodinė medžiaga reikalinga apskaičiuoti svarbiausias pasirinktos vėjo jėgainės charakteristikas. Būtent apie vėjo jėgainėse naudojamų menčių profilių aerodinamines charakteristikas parašyta knygoje „Aerodynamics of Wind Turbines“ (Martin *et al.* 2008: 7-18). Čia tik trumpai aptarti keliamosios jėgos ir pasipriešinimo koeficientai, kaip pavyzdys pateikta pasirinkto profilio poliarė.

Norint apskaičiuoti pasirinkto aerodinaminio paviršiaus profilio aerodinamines charakteristikas labai patogu naudotis XFOIL programa. Analizės atlikimas su čia programa aprašytas Septintosios Pasaulinės Vėjo Energijos Konferencijos straipsnyje (F. Saeed 2008). Projektuojant vėjo jėgaines tikimasi gauti kuo didesnę išėjimo galią. Žinome, kad tai labiausiai priklauso nuo mentės. Lenkijos Silesiano universiteto mechanikos inžinieriai žurnalo straipsnyje aprašė dvi svarbiausias mentės charakteristikas, tai mentės profilis, bei medžiaga, iš ko ji pagaminta. Nuo šių charakteristikų priklauso

apie dvidešimt procentų visos jėgainės kainos. Straipsnyje rašoma apie optimalų profilio, bei medžiagos parinkimą (Jureczko *et al.* 2005: 463–471). Aerodinaminių mentės parametrų skaičiavimų metodai, jų privalumai bei trūkumai, aprašyti Kulunko straipsnyje (2009: 13–15). Šis autorius skaičiavimams pasirinko kombinuotą menčių elementų momentų teoriją.

2.2 Vėjo jėgainių aerodinamika

Yra pagrindinės dvi jėgos ir vienas momentas kurie veikia profilį, tai keliamoji jėga, pasipriešinimo jėga ir žingsnio momentas. Baigiamajame darbe bus nagrinėjamos šios charakteristikos.



4 pav. Keliamosios ir pasipriešinimo jėgų santykis (Martin *et al.* 2008: 8)

Profilį veikiančių jėgų atstojamoji, statmena laisvojo srauto kryptčiai, vadinama *keliamąja jėga*. Analizuojant aerodinamines jėgas patogiu naudoti bedimensius dydžius. Sparno keliamosios jėgos koeficientas C_L gaunamas keliamąją jėgą L dalinant iš dinaminio slėgio ($\rho V^2/2$) ir sparno ploto S :

$$C_L = \frac{L}{\frac{\rho V^2}{2} S} \quad (1)$$

Sparno momento koeficientas gaunamas momentą M dalinant iš dinaminio slėgio ($\rho V^2/2$), sparno ploto S ir sparno stygos c :

$$C_M = \frac{M}{\frac{\rho V^2}{2} S_C} \quad (2)$$

Profilį veikiančių slėgio ir trinties jėgų atstojamoji, lygiagreti su laisvojo srauto kryptimi, vadinama *profilio pasipriešinimo jėga*.

Sparno keliamosios jėgos koeficientas C_D gaunamas pasipriešinimo jėgą D dalinant iš dinaminio slėgio ($\rho V^2/2$) ir sparno ploto S :

$$C_D = \frac{D}{\frac{\rho V^2}{2} S} \quad (3)$$

Profilio pasipriešinimą galima nustatyti keliais būdais. Nustatant profilio pasipriešinimą tiesioginiu būdu, reikia integruoti slėgio ir trinties jėgas profilio paviršiuje ir projektuoti į laisvojo srauto kryptį. Profilio pasipriešinimo koeficientą galima gauti ir netiesiogiai, nustatant srauto judesio kiekio aerodinaminio pėdsako nuostolius. Šis netiesioginis metodas ir taikomas programoje *XFOIL*.

Mentės galo greičio santykis

Mentės galo greičio santykis, tai mentės galo greičio ir vėjo greičio santykis. Šis parametras svarbus vėjo jėgainių projektavime.

$$\lambda = \omega R / v_0 \quad (4)$$

ω – tai rotoriaus kampinis greitis; R – rotoriaus spindulys; v_0 – vėjo greitis.

Didesnis mentės galo greičio santykis visada duoda didesnę vėjo jėgainės efektyvumą, bet tai dažniausiai sukelia ir didesnę triukšmo lygį. Mažų greičių vėjo jėgainių mentės galo greičio santykis nuo 1 iki 4, o didelio greičio jėgainėse naudojami dydžiai nuo 5 iki 9.

Projektuojant didelių greičių vėjo jėgaines tinkamiausias mentės galo greičio santykis yra 7 (Burton *et al.* 2001: 207), tai leidžia pasiekti kuo didesnę galios koeficientą. Mentės galo greičio santykio ir apsisukimų greičio priklausomybė pateikta formulėje 5:

$$\lambda = \frac{2\pi n r}{60 V_0} \quad (5)$$

n – tai rotoriaus apsisukimų greitis; r – rotoriaus spindulys; v_0 – vėjo greitis.

Dėl šios priklausomybės to paties mentės galo greičio santykio jėgainės apsisukimų greitis bus mažesnis kuo mentės ilgis didesnis. Kuo mentės ilgis didesnis, tuo jos struktūra sudėtingesnė, tai kainuoja daug daugiau, taip pat didesnės jėgainės sukelia didesnę triukšmą.

2.3 Horizontaliosios ašies vėjo jėgainės aerodinaminių charakteristikų skaičiavimo metodų analizė

Projektuojant vėjo jėgaines naudojami įvairūs aerodinaminių charakteristikų skaičiavimo metodai. Anksčiau vėjo jėgainių aerodinaminiams parametrų skaičiuoti buvo remiamasi lėktuvo arba malūnsparnio rotoriaus parametrų skaičiavimo teorija. Vis dėlto, vėjo jėgainėms reikalinga kitokia, nei malūnsparniui, teorija. Vėjo jėgainės mentys suksis ne tokiais dideliais greičiais, jų rotoriaus diametras labai didelis, reikalingi menčių „stabdžiai“ kurie stabdytų įrenginį prie didelių greičių. Paprasčiausia teorija kuri aprašo menčių charakteristikas vadinama momentų teorija. Jos trūkumas – nėra pakankamai detali, neleidžia tiksliai įvertinti mentės geometrijos. Viena iš teorijų, kuri naudojama menčių projektavimui, tai menčių elementų teorija. Ši teorija detaliai aprašo mentės profilio geometriją ir kitas aerodinamines charakteristikas, tačiau neįvertina mentės sukeltos traukos. Daug universalesnė yra kombinuota menčių elementų ir momentų teorija. Naudojantis sukuriu metodu galima įvertinti sukurių įtaką mentei, tai šis metodas pranašesnis už MEM teoriją, bet norint analizuoti sukurių metodu reikalinga aukšta projektuotojo kvalifikacija.

Menčių projektavimui ir egzistuojančių menčių charakteristikų analizei, aerodinaminių charakteristikų nustatymui, bei projektuojamo rotoriaus reikiamų kreivių sudarymui dažniausiai ir naudojama menčių elementų momentų teorija. Baigiamajame darbe taip pat naudojamas šis metodas.

HAVJ galia priklauso nuo sąveikos tarp rotoriaus ir vėjo. Pagrindiniai vėjo jėgainių parametrai yra išėjimo galia ir apkrova. Jas sukuria aerodinaminės jėgos, kurios priklauso nuo vėjo. Menčių elementų teorija kombinuoja du metodus vėjo jėgainių aerodinaminių charakteristikų analizei atlikti. Tai yra momentų teorija ir mentės elementų teorija, kuri duoda formules aerodinaminiam jėgainės projektavimui ir rotoriaus galios nustatymui. Momentų teorija numato momentų pusiausvyrą oro sraute pereinančiame per turbiną, o mentės elementų teorija nustato jėgas, kurias sukuria profilio keliamosios ir pasipriešinimo jėgos. Kombinuojant šias teorijas gauname formules, pagal kurias skaičiuojame aerodinamines charakteristikas. HAVJ profiliai dažniausiai būna NACA serijos. Bet šie profiliai

rekonstruojami taip, kad atitiktų VJ keliamus reikalavimus: Reynoldso skaičiaus intervalas tarp 500000 ir 2 milijonų, moderniausias mentės paviršius iš aukštos kokybės profilio struktūra, ypač prie mentės pagrindinio galo, kur profilis pats storiausias. Dabar kuriama nemažai naujų vėjo jėgainėms skirtų profilių. Keletas pavyzdžių pateikta 5 paveikslėlyje.



5 pav. RISO A1- serijos profiliai

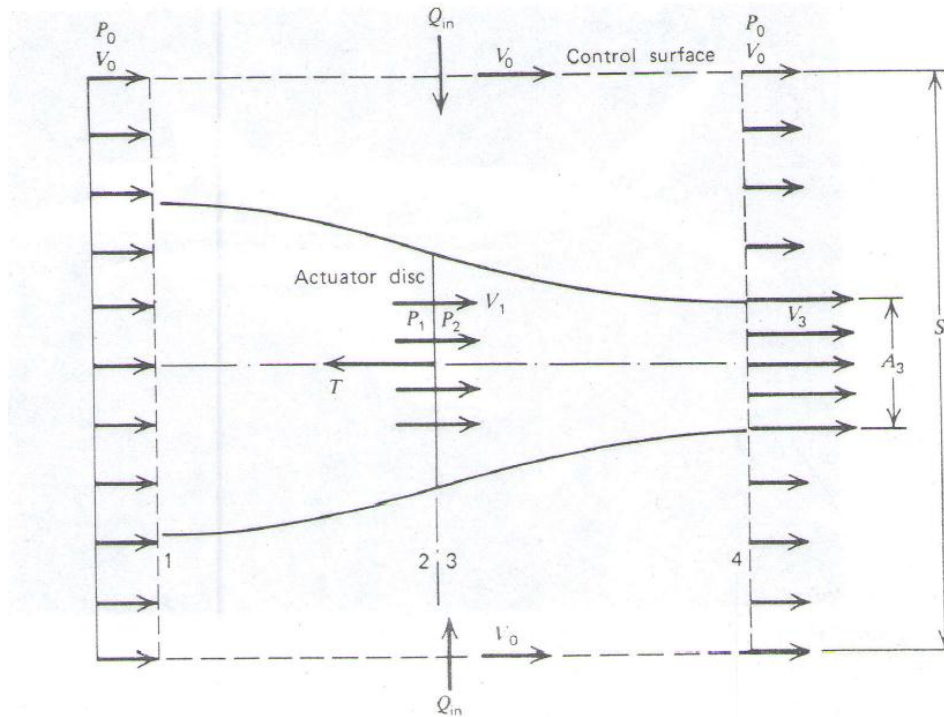
Pirmiausia galime pradėti nuo idealaus vėjo jėgainės rotoriaus analizės. Čia aprašomos pagrindinės rotoriaus charakteristikos bei oro srautas apie turbiną. Taip pat nustatomos teorinės aerodinaminių charakteristikų ribos.

Momento teorija

Klasikinė momento teorija aprašo pagrindines propelerio charakteristikas. Kaip 6 iliustracijoje pavaizduota, pro propelerio diską pratekėjęs oro srautas žymiai susiaurėja, o statinis slėgis didėja netolygiai. Taigi šiam modeliui būdingos prielaidos:

1. Greitis einantis per diską yra pastovus.
2. Slėgis einantis per diską yra tolygus.
3. Už propelerio pratekėjusiam oro srautui propelerio sūkiai neturi įtakos.
4. Srautas tekantis per propelerį gali būti atskirtas nuo likusios srauto dalies aiškiai apibrėžtu srovės vamzdeliu.
5. Oro srautas yra nespūdas.

1 skerspjuvis – oro srautas yra toli prieš propelerį, tuo metu, kai skerspjuvyje 4 yra pavaizduotas susiaurėjęs oro srautas perėjęs per propelerį, kuris yra atskirtas nuo likusios srauto dalies. Skerspjuviai 2 yra prieš propelerį, o 3 - už propelerio. Skerspjuviuose 1 ir 4, visos tėkmės kryptys yra lygiagrečios, tad statinis slėgis yra pastovus ir vienodas laisvojo oro srauto statiniam slėgiui p_0 .



6 pav. Klasikinė momentų teorija. Idealaus oro srauto modelis (Martin *et al.* 2008: 28)

Kaip parodyta paveikslėlyje laikykimė, kad tiek įtekanti, tiek ištekanti srovė yra nenutrūkstanti bei cilindrinio kontrolės paviršiaus formos. Šio paviršiaus skersinio pjūvio plotas - S . ΔQ - tai srautas pratekėjęs per skerspjūvį 4 minus srautas pratekėjęs per skerspjūvį 1. Jis apskaičiuojamas taip:

$$\Delta Q = A_3 V_3 + (S - A_3) V_0 - S V_0$$

Arba:

$$\Delta Q = A_3 (V_3 - V_0) \quad (6)$$

Tarkime kad $V_3 \neq V_0$, tai reiškia, kad srautas ΔQ turi tekėti abiejose kontrolės paviršiaus pusėse, ta pačia kryptimi. Šio srauto greitis V_0 nukreiptas priešinga kryptim sukuriama traukai.

Taikydami momento teoriją cilindrinės kontrolės paviršiui ir nepaisydami išorinių slėgių skirtumų gauname:

$$T = \rho [A_3 V_3^2 + (S - A_3) V_0^2] - \rho S V_0^2 - \rho \Delta Q V_0$$

6 formulę sulyginus su ankstesniąja gauname:

$$T = \rho A_3 V_3 (V_3 - V_0) \quad (7)$$

A_3 yra skersinio pjūvio plotas. Jis yra per propelerį pratekėjusio oro srauto vamzdelio gale. Taigi, $\rho A_3 V_3$ yra srauto pratekėjusio per propelerį masė.

Trauka (T) taip pat lygi slėgių skirtumo už ir prieš diską bei disko ploto A sandaugai.

$$T = A(p_2 - p_1) \quad (8)$$

p_1 ir p_2 gali būti randami pritaikant Bernulio lygtį. Nėra formulės, kuri būtų pritaikyta apskaičiuoti slėgiui einančiam per propelerį, kadangi srautas propeleryje sukuria energiją.

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho V^2 = p_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 \quad (9)$$

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho V_3^2 = p_1 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 \quad (10)$$

Atėmus 9 formulę iš 10 ir nepaisant, kad greitis yra besitęsiantis per propelerį gauname:

$$p_2 - p_1 = \frac{1}{2} \rho (V_3^2 - V_0^2) \quad (11)$$

Susijungiant formulių 9, 10, ir 11 gautus rezultatus, kai $A_3 V_3 = A V_1$ gauname:

$$V_1 = \frac{(V_3 + V_0)}{2} \quad (12)$$

Greitis per propelerį lygus greičių prieš ir už propelerio vidurkiui.

Dabar parašykime:

$$V_3 = V_0 + 2\omega \quad (13)$$

ω yra propelerio sukeltas greitis. Vadinasi:

$$V_1 = V_0 + \omega$$

Taigi:

$$T = 2\rho A(V_0 + \omega)\omega \quad (14)$$

Tai lengva atsiminti, kai $\rho A(V_0 + \omega)$ yra srauto pratekėjusio per propelerį masė ir 2ω yra bendras srauto greičio padidėjimas. Taikant energijos teoremą šiai sistemai gauname galią (P), kuri pridedama prie srauto,

$$P = \frac{1}{2}\rho A(V + \omega)\left[(V_0 + 2\omega)^2 - V^2\right]$$

Arba

$$P = 2\rho A\omega(V_0 + \omega)^2 \quad (15)$$

Iš 14 formulės gauname:

$$P = T(V_0 + \omega) \quad (16)$$

Šie svarbūs rezultatai nurodo, kad galia reikalinga propeleriui, lygi sukuriama traukai ir greičio V_0 sandaugai. Tai gali būti suskirstoma į dvi dalis. Pirma dalis – naudingoji galia.

$$P_{naud} = TV_0 \quad (17)$$

Antroji dalis – indukcinė galia:

$$P_i = T\omega \quad (18)$$

Panaudojus 14 formulę gauname:

$$\omega = \frac{1}{2}\left[-V_0 + \sqrt{V_0^2 + \left(\frac{2T}{\rho A}\right)}\right] \quad (19)$$

Statiniu atveju, kai V lygu nuliui:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{T}{2\rho A}} \quad (20)$$

ir

$$P_{i0} = \frac{T^{3/2}}{\sqrt{2\rho A}} \quad (21)$$

Traukos T vertė apibūdina viršutinę ribą, kuri praktiškai nėra pasiekama, kadangi momento teorija nepaiso propelerio menčių profilio pasipriešinimo. Taip pat yra ir papildomi nuostoliai, kurie susidaro menčių galuose. Kadangi slėgių skirtumo menčių galuose nėra, tai už propelerio susidaro spiralės formos besidriekiantys sūkuriai. Esant idealiam efektyvumui η_i gali būti apibrėžtas kaip naudingos galios ir bendros galios santykis. η_i apskaičiuojamas pagal 16 formulę:

$$\eta_i = \frac{TV}{T(V + \omega)}$$

Arba

$$\eta_i = \frac{1}{1 + (\omega/V)} \quad (22)$$

Propelerio trauka, paskirstyta disko plote, vadinama *disko apkrova*. Kadangi ši apkrova artėja prie nulio, tai idealus efektyvumas artėja prie vieneto. Pasinaudojus momentų teorija apskaičiuotas naudingumo koeficientas kaip ir statinė trauka yra daug didesni nei galima pasiekti.

Nors momento teorija kaip ir numatyta trauka nėra labai tikslios, tačiau ji naudojama indukcinio greičio skaičiavimui. Įdomu ir lengva atsiminti šiuos ryšius: galiausiai suvokiame, kad propelerio dinaminis slėgis lygus oro srauto dinaminio slėgio ir disko apkrovos sumai.

Menčių elementų teorija

Tolimesnė analizė - žingsnio kampo β radimas. Kampas β nubrėžiamas nuo sukimosi plokštumos iki nulinės (profilio centrinės) ašies.

Ankstyvojoje literatūroje propeleriai buvo suvokiami kaip "orsraigis" (airscrews). Jei propeleris "sraigas" suktųsi be slydimo, tai sraigas pasislinktų per pilną apsisukimą, kas ir vadinama žingsniu. Žiūrėti 6 iliustraciją.

$$p = 2\pi r \tan \beta \quad (23)$$

Propeleriai gali būti skirstomi pagal jų žingsnį, diametrą ir perdavimo skaičių. Taigi:

$$\frac{p}{D} = \pi x \tan \beta$$

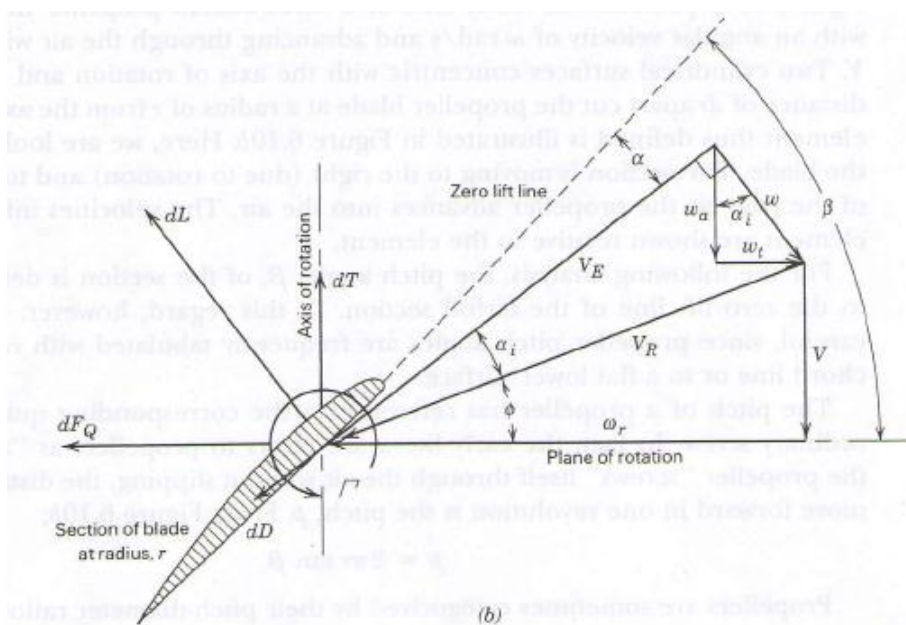
kur $x = r/R$.

Pastovaus žingsnio propeleris yra toks, kurio žingsnis nekinta. Tokiam propeleriui taikoma formulė:

$$\beta = \tan^{-1} \frac{p/D}{\pi x} \quad (24)$$

Mentės viršūnėje, x artėja prie 1, taigi:

$$\beta(x=1) = \tan^{-1} \frac{p/D}{\pi}$$



7 pav. Propelerio mentės veikiančios jėgos bei greičiai. Mentės pjūvis Klasikinė momentų teorija.

Idealaus oro srauto modelis (Martin *et al.* 2008: 36)

Pastovaus, fiksuoto bei kintamo žingsnio terminai yra dažnai painiojami. "Pastovus žingsnis" - griežtai apibrėžiamas sudarant propelerio geometriją. "Fiksuotu" arba "Kintamu" žingsniu laikoma, kai

galima pakeisti mentės išstatymo kampą. "Fiksuotas žingsnis" - kai mentės išstatymo kampas pakeičiamas prieš sukimąsi, o "Kintamas žingsnis" - kuomet išstatymo kampą galima keisti sukimosi metu. Kai kurie propeleriai yra įrengti su reguliatoriais, kad palaikytų pastovius apsisukimus per minutę (rpm). Tai padaroma, didinant menčių žingsnio kampus, kadangi propelerio aps/min didėja dėl didėjančios galios arba atvirkščiai. Tokį propelerį pavadina "pastovaus greičio" propeleriu.

Kalbant apie 7 iliustraciją, vienos mentės elemento nauda traukai T ir sukimo momentui Q, bus:

$$dT = dL \cos(\phi + \alpha_i) - dD \sin(\phi + \alpha_i) \quad (25a)$$

$$dQ = r[dL \sin(\phi + \alpha_i) + dD \cos(\phi + \alpha_i)] \quad (25b)$$

dL ir dD yra keliamosios ir pasipriešinimo jėgų diferencialai. Panašu į baigtinę sparno teoriją, α_i yra atakos kampas atsirandantis dėl greičio ω . dL ir dD gali būti apskaičiuojami:

$$dL = \frac{1}{2} \rho V_E^2 c C_l dr \quad (26a)$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho V_E^2 c C_d dr \quad (26b)$$

Styga c yra funkcija nuo spindulio r. Kreipiančioji C_d priklauso nuo kreipiančiosios C_l . Tai taip pat gali priklausyti nuo Reynoldso ir Macho skaičių. C_l randamas:

$$C_l = \alpha(\beta - \phi - \alpha_i) \quad (27)$$

Reikalinga α_i , kuri yra ω funkcija, kad gautume menčių apkrovą. Bet ω priklauso nuo menčių apkrovos.

Menčių elementų momentų teorija

Jei mes manome, kad α_i ir pasipriešinimo bei keliamosios jėgos santykis per mažas, kai $V_E \approx V_R$, tai pasinaudojus formule 25 (menčių skaičiui B) randame:

$$dT = \frac{B\rho}{2} V_R^2 c \alpha(\beta - \phi - \alpha_i) \cos \phi dr$$

Pritaikius momentų principus diferenciniams žiedams ir priimant, jog $\omega \approx V_R \alpha_i$ mes galime rasti dT :

$$dT = \rho(2\pi r dr)(V + V_R \alpha_i \cos \phi) 2V_R \alpha_i \cos \phi$$

Sulyginus šias dvi išraiškas gauname α_i kvadratą:

$$\alpha_i^2 + \alpha_i \left(\frac{\lambda}{x} + \frac{\sigma a V_R}{8x^2 V_T} \right) - \frac{\sigma a V_R}{8x^2 V_T} (\beta - \phi) = 0$$

Kur

$$\lambda = \frac{V}{\omega R} \quad V_R = V_T \sqrt{x^2 + \lambda^2}$$

$$\sigma = \frac{Bc}{\pi R} \quad \phi = \tan^{-1} \frac{\lambda}{x}$$

$$V_T = \omega R \quad x = \frac{r}{R}$$

Indukcinis atakos kampas apskaičiuojamas:

$$\alpha_i = \frac{1}{2} \left\{ - \left(\frac{\lambda}{x} + \frac{\sigma a V_R}{8x^2 V_T} \right) + \left[\left(\frac{\lambda}{x} + \frac{\sigma a V_R}{8x^2 V_T} \right)^2 + \frac{\sigma a V_R}{2x^2 V_T} (\beta - \phi) \right]^{1/2} \right\} \quad (28)$$

Duotoji geometrija, į priekį nukreiptas greitis ir sukimosi greitis panaudojamas 28 formulėje, kad galėtume apskaičiuoti α_i . Formulės 25a ir 25b gali būti siejamos, pasinaudojus 26 ir 27 formulėmis, tam, kad apskaičiuotume trauką ir sukimo momentą.

Propelerio trauka ir jėga paprastai būna išreiškiamos per koeficientus. Traukos ir jėgos koeficientus galime aprašyti įvairiais būdais, priklausomai nuo to, kokie yra turimi greičiai ir plotai. Atliekant propelerio tyrimą beveik visada gauname traukos koeficientą C_T ir jėgos koeficientą C_P , kuriuos apskaičiuojame:

$$C_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (29a)$$

$$C_P = \frac{P}{\rho n^3 D^5} \quad (29b)$$

čia n - sukimosi greitis (aps/s), D - propelerio skersmuo. Trauka, jėga, ρ ir D turi būti pastovūs dydžiai. Galime teigti, kad nD yra greičio charakteristika, o D^2 yra ploto charakteristika. Iš 7 iliustracijos matome srauto atstojamosios kampą ϕ . Jis yra V ir ωr santykis.

$$\phi = \tan^{-1} \frac{V}{\omega r}$$

tai gali būti užrašoma ir taip:

$$\phi = \tan^{-1} \frac{J}{\pi x} \quad (30)$$

Propelerio poslinkis J randamas:

$$J = \frac{V}{nD} \quad (31)$$

Taigi C_T ir C_P yra apskaičiuojamos kaip J išvestinės:

$$C_T = \frac{\pi}{8} \int_{x_h}^1 (J^2 + \pi^2 x^2) \sigma [C_l \cos(\phi + \alpha_i) - C_d \sin(\phi + \alpha_i)] dx \quad (32a)$$

kai $P = \omega Q$:

$$C_P = \frac{\pi}{8} \int_{x_h}^1 \pi x (J^2 + \pi^2 x^2) \sigma [C_l \sin(\phi + \alpha_i) + C_d \cos(\phi + \alpha_i)] dx \quad (32b)$$

x_h - mentės pradžios centras. x_h yra sutartinis centras, tačiau jis nedaro įtakos C_T ir C_P vertėms.

Pasikartojant, duota D , V , ρ , ir n . Taip pat c ir β , kurie pateikti kaip x funkcija. x ir α_i yra apskaičiuojami pagal 23 formulę. Paskui apskaičiuojami C_l ir C_d ir galiausiai randami dC_T/dx ir dC_P/dx . C_T ir C_P gauname sprenddami integralą nuo x_h iki 1.

Žinant J ir apskaičiavus C_T ir C_P reikšmes galime rasti propelerio efektyvumą. Naudinga galia rasta iš TV ir P yra žinoma kaip tiekimo galia. Taigi:

$$\eta = \frac{TV}{P} \quad (33)$$

Šiuo atveju C_T , C_p ir J panaudojami:

$$\eta = \frac{C_T J}{C_p} \quad (34)$$

Apie bendrą menčių elementų momento teoriją daugiausia sužinome iš literatūros. Tačiau dabar patogiau naudotis kompiuterinėmis programomis.

2.4 Jėgainės analizei naudojamų programų aprašymas

Jėgainės mentės profilio projektavimui bei analizei tinkamiausia *XFOIL* programa. Su šia programa galima nustatyti mentę veikiančias apkrovas, keliamosios jėgos ir pasipriešinimo jėgos koeficientus, maksimalų keliamos jėgos koeficientą. Norint gauti optimalias aerodinamines charakteristikas, programoje galima redaguoti profilio plotį, išlinkimą, spindulį, kitaip tariant, keičiant geometrinius profilio parametrus ieškoma tinkamo varianto. *XFOIL* programoje gaunama pasipriešinimo jėgos poliarė priklausanti nuo Reynolds'o ar Macho skaičiaus. Programoje suprojektavus norimą profilį galima pateikti visus geometrinius parametrus, įvairias aerodinaminių parametrų priklausomybes.

Pasirinkus norimą mentės profilį galima projektuoti visą vėjo jėgainę. Tam labai tinka programa *QBlade*. Baigiamajame darbe analizuojamos keletas jėgainių su skirtingų profilių mentėmis, kaip keisis aerodinaminės charakteristikos, priklausomai nuo profilio, mentės geometrinių parametrų, nuo skirtingo vėjo greičio.

***QBlade* Programinės įrangos projektas**

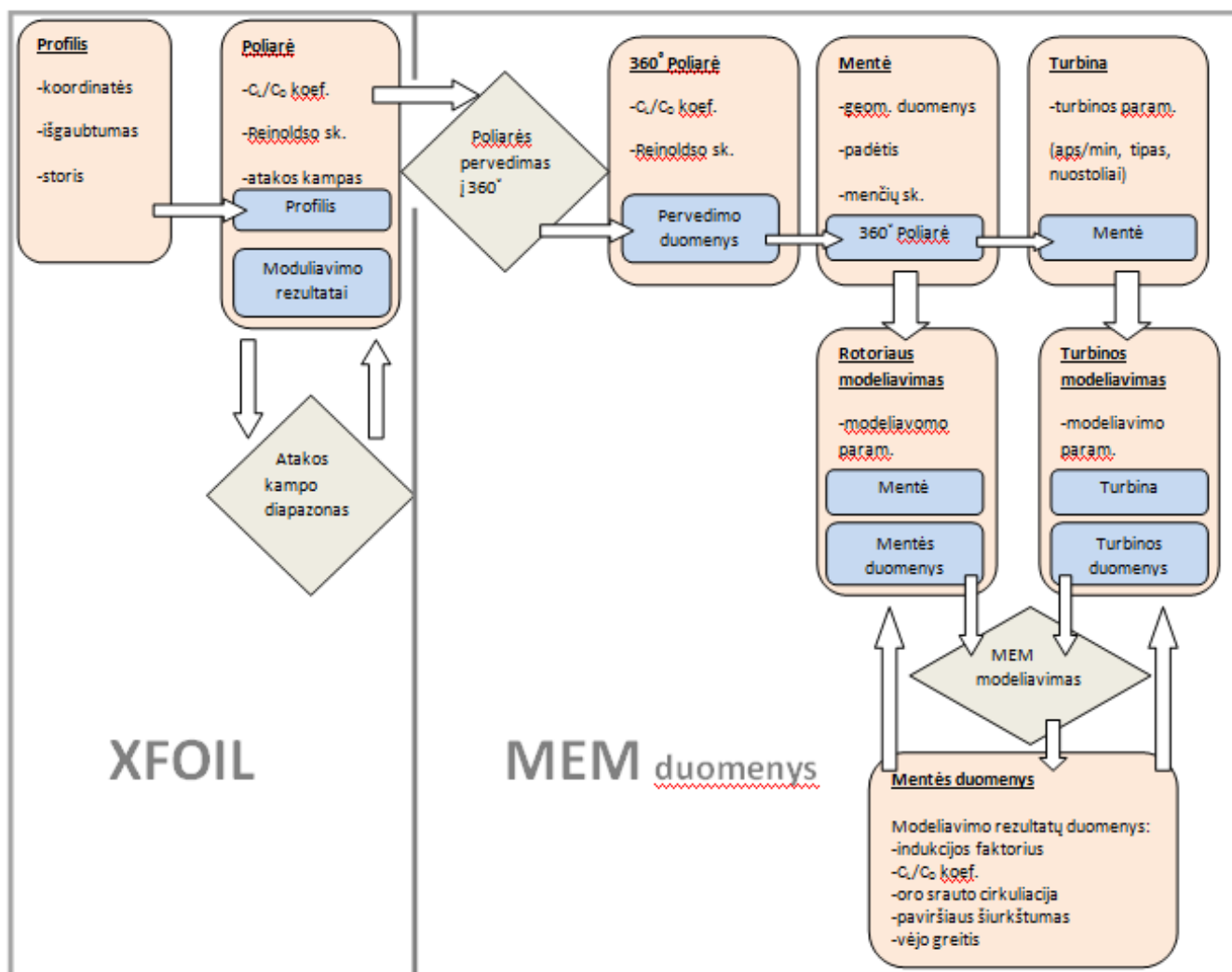
Šio projekto tikslas - programinė įranga, su kuria galėtų atlikti jėgainės skaičiavimus, kad joje būtų integruota *XFOIL* programa, taip pat profilio projektavimo bei analizės įrankiai. Vienas programinės įrangos paketas, su kuriuo būtų atliekamas vėjo jėgainių menčių projektavimas ir aerodinaminiai skaičiavimai. *XFOIL* programos integravimas leidžia kurti ir analizuoti aerodinaminius profilius, gauti poliares ir iškart jas perkelti į vėjo jėgainės rotoriaus modeliavimą. Tai išsprendžia daugelį problemų, kai vienos programos gautų duomenų negalima panaudoti atliekant tolimesnius skaičiavimus su kita

programa. *QBlade* programa paremta menčių elementų momentų teorija, ji labai tinkama mokymo tikslams, nes projektuojant bei analizuojant vėjo jėgainės rotorijų matomas ryšys, priklausomybė nuo profilio, mentės susukimo kampo, mentės pločio, kaip keičiasi galios kreivė nuo šių parametų.

Mentės elementų momentų teorijos programinė įranga atlieka šias funkcijas:

- Mentės projektavimas ir optimizavimas panaudojant *XFOIL* programa sukurtus profilius. 3D atvaizdavimas.
- Turbinos nustatymai (rotoriaus mentės, turbinos kontrolė, generatoriaus tipas, nuostoliai).
- Turbinos naudingumo koeficiento skaičiavimas priklausomai nuo vėjo greičio.
- Rankinis visų modeliavimo parametų parinkimas.
- Galimybė perkelti visus duomenis į kitas programas.

QBlade programos funkcijų struktūrinė schema:



3. TEORINIS PAGRINDIMAS

Šiame skyriuje pateikiamas menčių elementų momentų teorijos pritaikymas projektuojant HAVJ rotorius, bei analizuojant rotoriaus aerodinamines charakteristikas. Pateikti pagrindiniai etapai projektuojant vėjo jėgainę naudojant *QBlade* programą. Pradedant įvairių profilių aerodinaminių charakteristikų analize, mentės projektavimu, baigiant vėjo jėgainės modeliavimu, jos parametrų analize priklausomai nuo skirtingo vėjo greičio ir jėgainės charakteristikų.

3.1 Profilio parinkimas projektuojant HAVJ mentę

HAVJ mentė, kuri sukuria mechaninę energiją, turi būti tam tikro profilio. Mentės plotis ir ilgis turi būti optimalūs, kad būtų galima pasiekti kuo didesnę rotoriaus galią, išlaikant stiprumo ir aerodinaminius reikalavimus. Reikšmingiausias faktorius, kuris daro didžiausią įtaką aerodinaminiui paviršiui tai srauto klampumas, kurį charakterizuoja Reynolds'o skaičius:

$$Re = \frac{v_s L}{\nu} \quad (35)$$

v_s - tai skysčio greitis, ($m \cdot s^{-1}$);

L - charakteringas sistemos ilgis, (m);

ν - skysčio kinematinės klampos koeficientas: $\nu = \mu / \rho$, ($m^2 \cdot s^{-1}$).

Vėjo jėgainėse profilio plotis svyruoja tarp 0,3 m ir 2m pločio (tokio profilio mentės statomos jėgainėse, kurių galia skaičiuojama megavatais). Mentės galo greitis gali būti 45÷90 m/s. Reynolds'o skaičius nuo pusės milijono iki 10 milijonų. Svarbūs profilio parametrai – keliamosios jėgos ir pasipriešinimo koeficientai, juos lengvai galima apskaičiuoti programa *Xfoil*, svarbu pasirinkti tinkamą Reynolds'o skaičių.

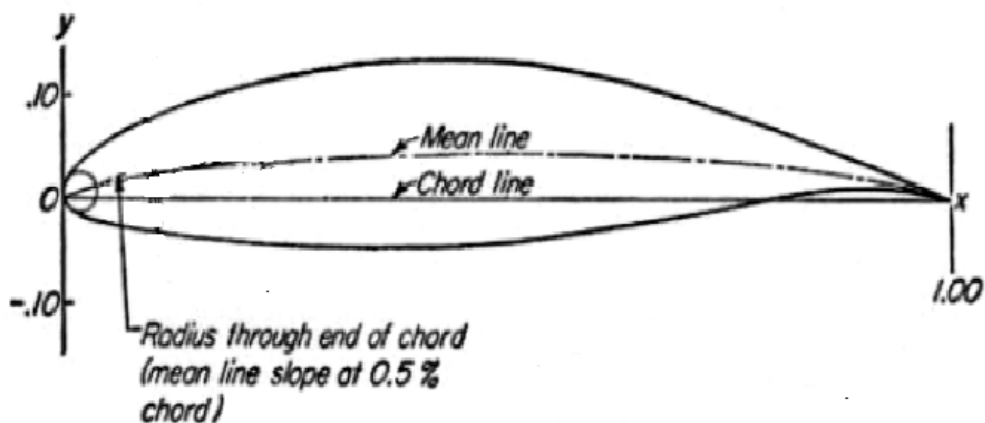
Renkantis mentės profilį būtina laikytis įvairių reikalavimų, pirmiausia jis turi atitikti aerodinaminius bei stiprumo reikalavimus, būti tinkamos struktūros, bei kietumo, būtų nesudėtinga pagaminti ir prižiūrėti.

Paprasčiausias reikalavimas mentei: kuo didesnė keliamoji jėga ir mažesnis pasipriešinimas. HAVJ menčių profiliai projektuojami siekiant gauti kuo mažesnę pasipriešinimo ir keliamosios jėgos

koeficientų santykį. HAVJ mentėse dažnai naudojami NACA šeimos profiliai: NACA44XX; NACA230XX; NACA63-2XX.

Menčių projektavimas naudojant NACA šeimos profilius

HAVJ mentėse dažnai naudojami šie NACA šeimos profiliai: NACA44XX; NACA LS(1); NACA63XXX. Šių profilių efektyvumas labai priklauso nuo priekinės briaunos paviršiaus šiurkštumo. NACA profiliai iš 4 skaitmenų serijos buvo sukurti naudojant analitines lygtis, kurios nusako profilio geometrinės centrinės linijos išlinkimą, taip pat profilio storį. 6 skaitmenų serijos profiliai yra labiau teoriniai, sudėtinga įvesti norimus pakeitimus. (J. L. Tangler *et al.* 1995: 1-12).



9 pav. NACA profilio geometrinė konstrukcija (J. L. Tangler *et al.* 1995: 1-12)

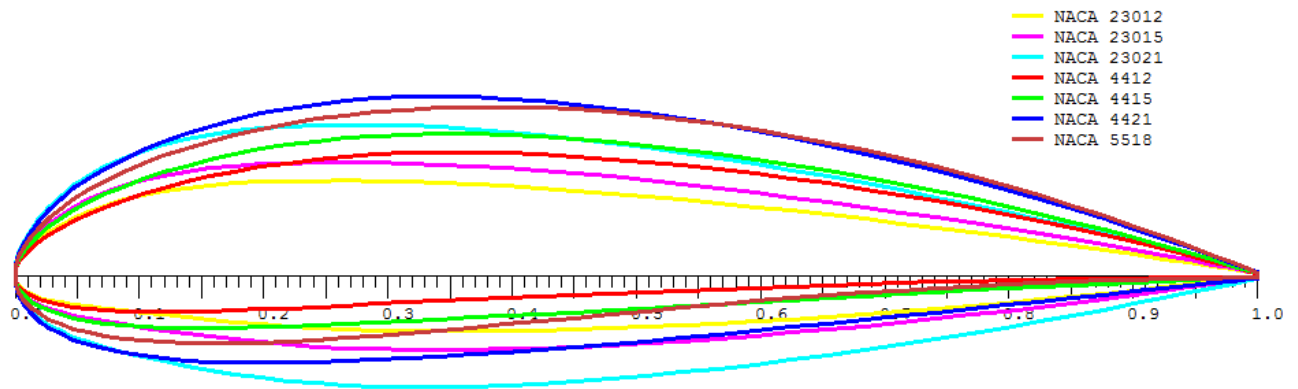
Profiliai vėjo jėgainėms buvo pradėti kurti dar 1984 metais Nacionalinėje Atsinaujinančios Energijos Laboratorijoje (National Renewable Energy Laboratory (NREL)). Nuo to laiko sukurtos devynios profilių šeimos skirtos įvairaus dydžio vėjo jėgainių rotorių mentėms. Pagrindinis reikalavimas keliamas profilams- kuo didesnis keliamosios jėgos koeficientas, kuris labai susijęs su šiurkštumo efektu.

Pirmiausia pasirinkamas mentės profilis. Programa *QBlade* apskaičiuojamos ir pateikiamos pagrindinės profilių savybės. Jas apibūdina profilio charakteristikos:

- poliarė – keliamosios jėgos koeficiento ir pasipriešinimo koeficiento tarpusavio priklausomybė $C_D(C_L)$;
- keliamosios jėgos koeficiento priklausomybė nuo atakos kampo $C_L(\alpha)$;

- momento koeficiento priklausomybė nuo atakos kampo $C_M(\alpha)$, laminarinio pasienio sluoksnio virsmo į turbulencinį vietos priklausomybė nuo keliamosios jėgos koeficiento viršutiniame ir apatiniame paviršiuje.

NACA 23012; NACA 23015; NACA 23021; NACA 4412; NACA 4415; NACA 4421 ir NACA 5518 profiliai *QBlade* programoje:



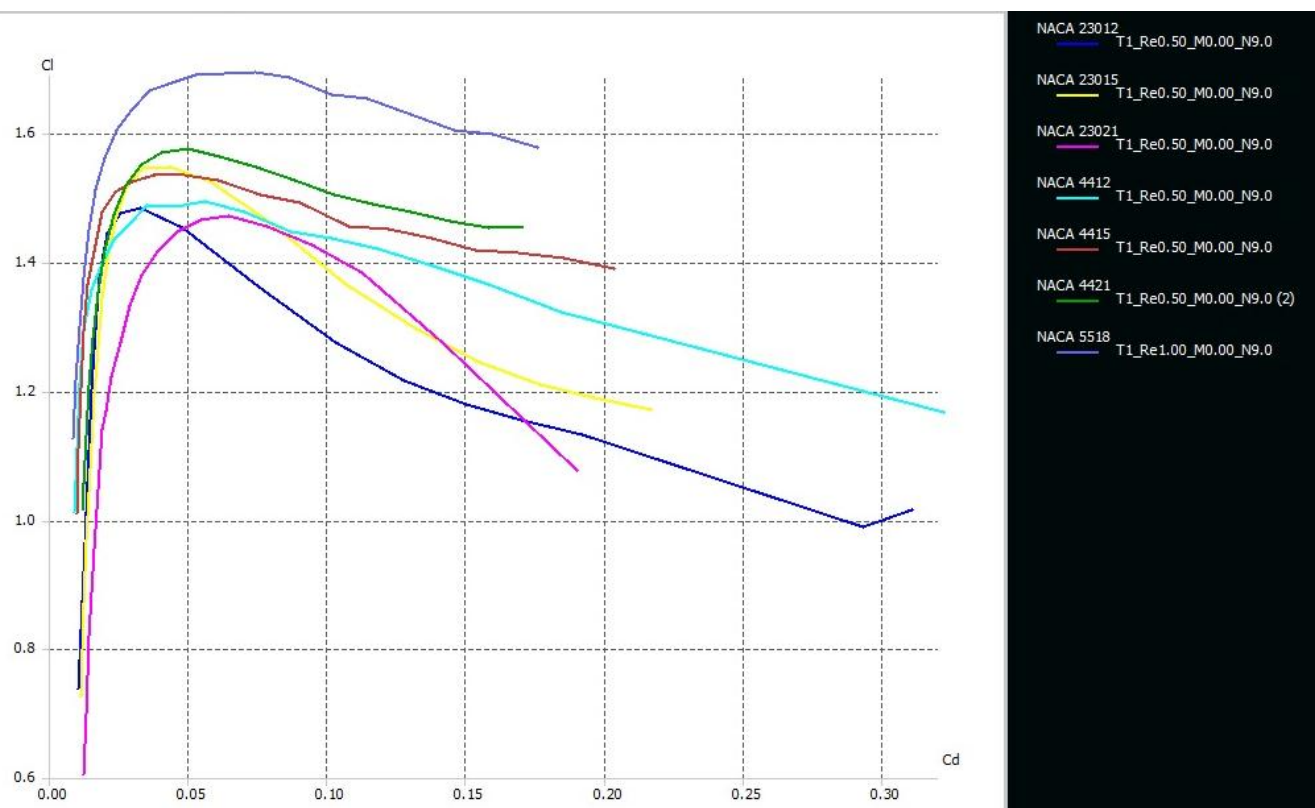
10 pav. NACA šeimos profiliai

	Name	Thickness (%)	at (%)	Camber (%)	at (%)	Points
1	Spline foil	9.03	31.20	0.00	47.50	60
2	NACA 23012	12.00	29.10	1.84	15.60	99
3	NACA 23015	15.00	29.10	1.84	15.60	99
4	NACA 23021	21.00	29.10	1.84	15.60	99
5	NACA 4412	12.00	29.10	4.00	39.50	99
6	NACA 4415	15.00	29.10	4.00	39.50	99
7	NACA 4421	21.00	29.10	4.00	39.50	99
8	NACA 5518	18.00	29.10	5.00	50.70	99

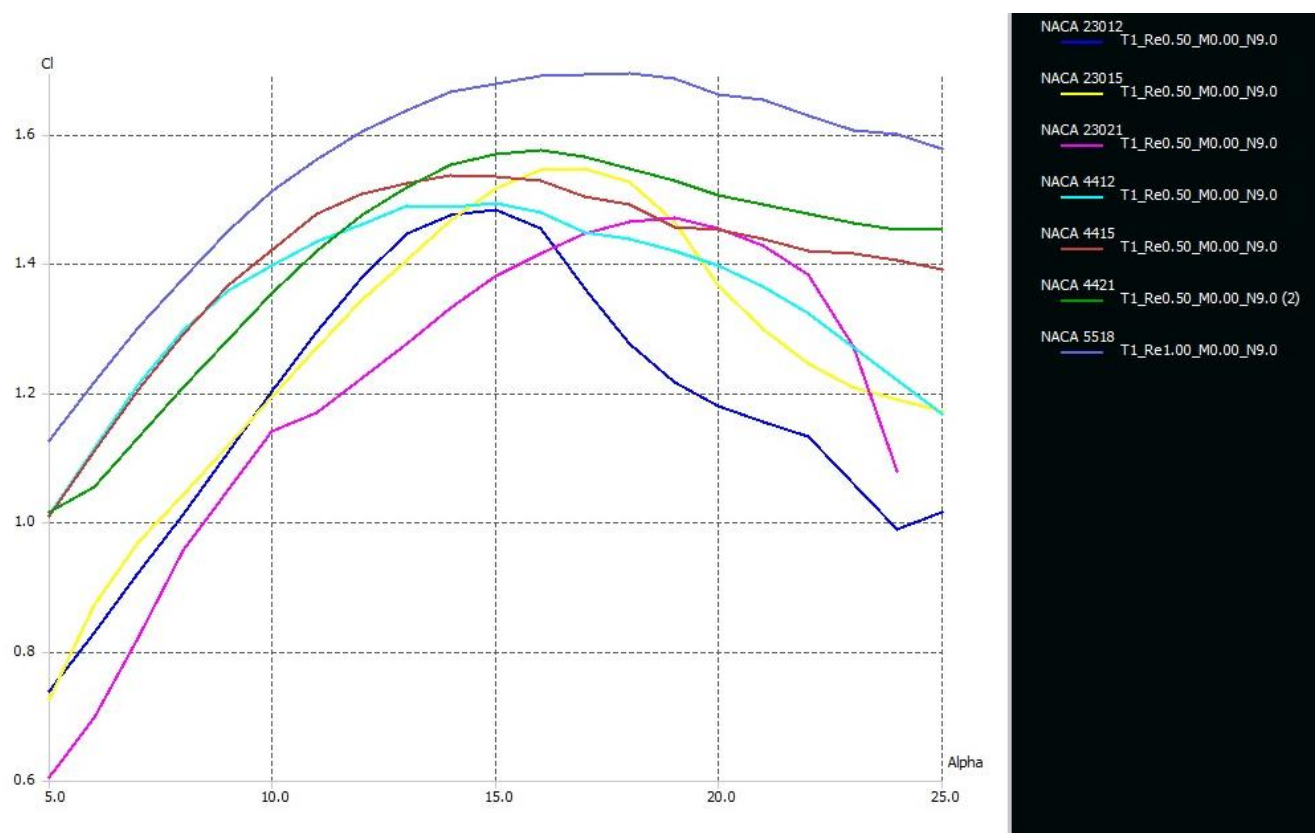
11 pav. NACA šeimos profilių geometriniai parametrai

Pasirinkus įvairius profilius išnagrinėjamos jų aerodinaminės charakteristikos, nustatius kurio profilio duomenys optimaliausi jis naudojamas tolimesniame mentės projektavime.

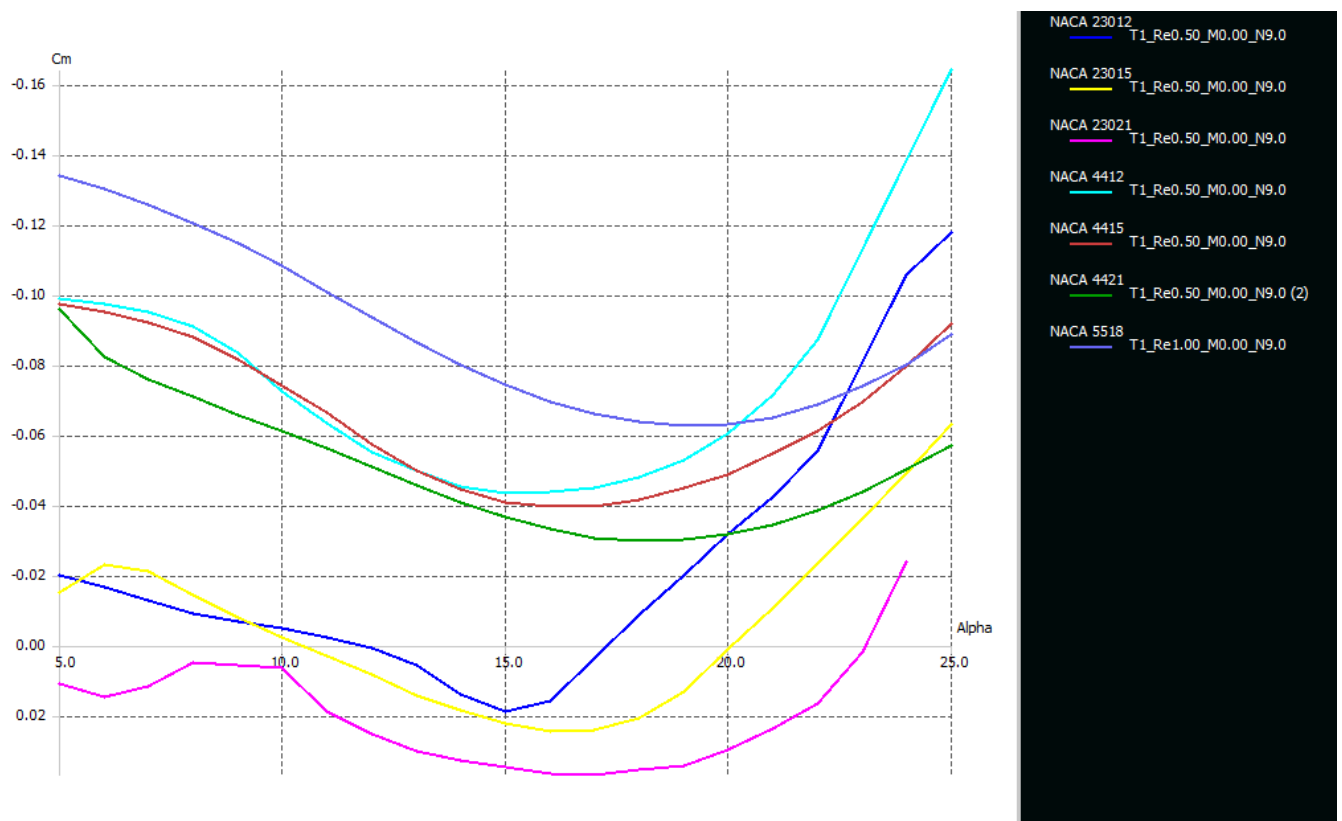
Šių NACA profilių poliarė apskaičiuota su programa *QBlade*, kai Reinoldso skaičius $Re = 1 \cdot 10^6$ atakos kampas nuo 5° iki 25° .



12 pav. NACA profilių poliarė



13 pav. NACA profilių keliamosios jėgos kreivė

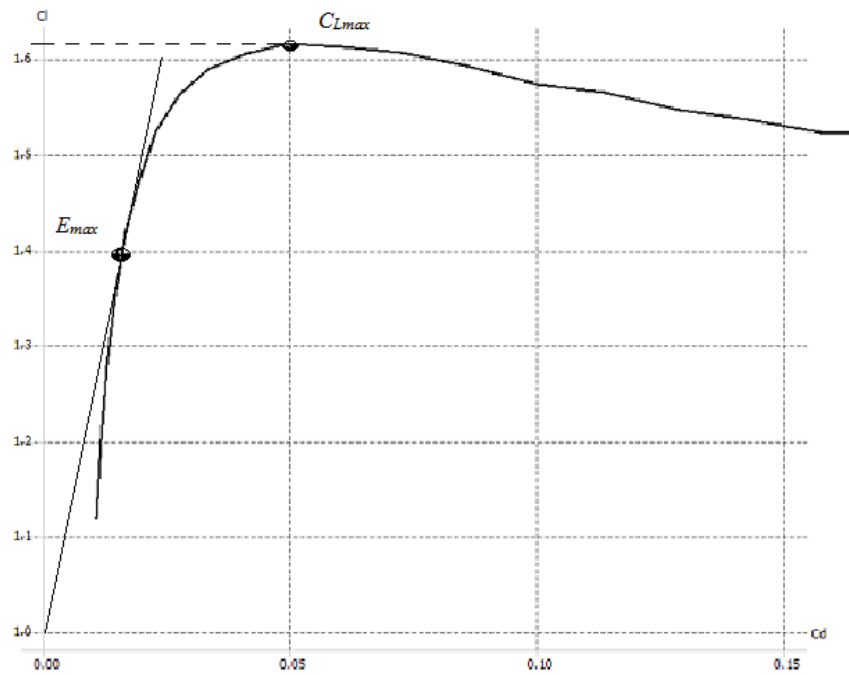


14 pav. Momento koeficiento priklausomybė nuo atakos kampo $C_M(\alpha)$

Išnagrinėjus kelių NACA šeimos profilių aerodinamines charakteristikas projektuojamai mentei pasirinktas NACA5518 profilis, nes jis atitinka pagrindinį keliamą reikalavimą – jo keliamosios jėgos koeficientas didžiausias.

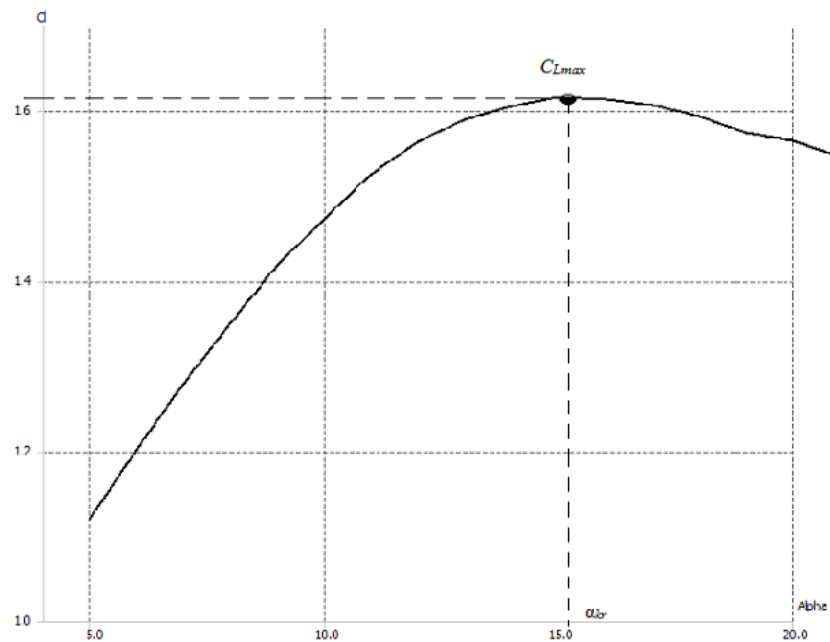
Profilio poliarė $C_D(C_L)$

Paveikslėlyje 15 parodyta profilio NACA 5518 poliarė, apskaičiuota su programa *QBlade*, kai Reynolds'o skaičius $Re = 1 \cdot 10^6$. Vertikaliajoje ašyje atidėtas keliamosios jėgos koeficientas C_L . Horizontalioje ašyje atidėtas pasipriešinimo koeficientas C_D . Iš grafiko galime nustatyti *maksimalios keliamosios jėgos koeficientą* $C_{Lmax} = 1,62$. Jeigu poliarėi nubrėžtumę liestinę, tai susikirtimo taškas rodytų *maksimalios aerodinaminės kokybės* atvejį.



15 pav. Profilio NACA 5518 poliarė, kai $Re = 1,0 \cdot 10^6$

Keliamosios jėgos koeficiento priklausomybė nuo atakos kampo $C_L(\alpha)$

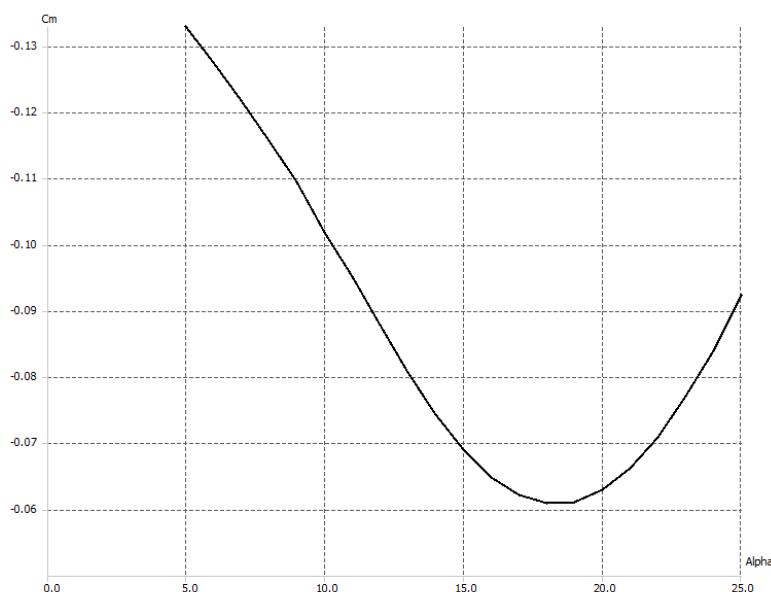


16 pav. Profilio NACA 5518 keliamosios jėgos koeficiento priklausomybė nuo atakos kampo, kai $Re = 1,0 \cdot 10^6$

Paveikslėlyje 16 parodyta profilio NACA 5518 keliamosios jėgos kreivė. Vertikaliajoje ašyje atidėtas keliamosios jėgos koeficientas C_L . Horizontalioje ašyje atidėtas atakos kampas laipsniais.

Iš grafiko kaip ir iš profilio poliarės galima nustatyti maksimalios keliamosios jėgos koeficientą. Atakos kampas, kuriam esant keliamoji jėga yra maksimali, vadinamas kritiniu atakos kampu ir žymimas α_{kr} . ($\alpha_{kr}=16^\circ$).

Momento koeficiento priklausomybė nuo atakos kampo $C_M(\alpha)$

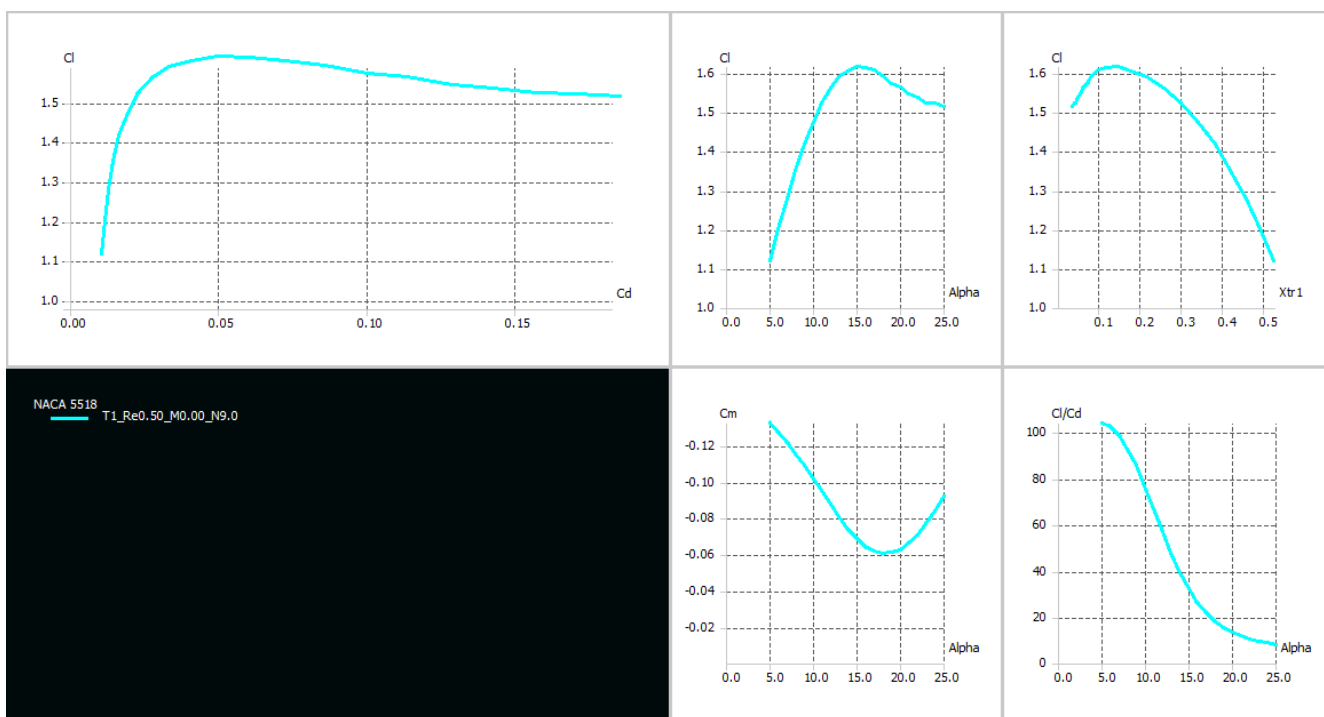


17 pav. Profilio NACA 5518 momento koeficiento priklausomybė nuo atakos kampo, kai $Re=1,0 \cdot 10^6$

Horizontalioje ašyje atidėtas atakos kampas laipsniais. Vertikaliajoje ašyje atidėtas momento koeficientas C_M . Momento koeficientas matuojamas stygos ketvirčio taško atžvilgiu. Momento koeficientas yra teigiamas, jeigu jis veikia atakos kampo didinimo kryptimi. Įprastinių profilių momento koeficientas yra neigiamas, todėl grafikuose neigiamos momento koeficiento reikšmės atidėtos į viršų.

Profilio charakteristikų suvestinė

QBlade programoje galima nagrinėti profilių aerodinamines charakteristikas priklausomai nuo atakos kampo reikšmių intervalo, pasirenkant keletą profilių rasti tinkamiausią profilį, kuris bus naudojamas mentės geometrijos kūrimui.



18 pav. NACA 5518 profilo charakteristikų suvestinė, kai $Re = 1,0 \cdot 10^6$

3.2 Mentės projektavimas

Mentės projektavimas panaudojus pasirinktą profilį, tai mentės formos nustatymas: parenkama profilio vidurinės linijos padėtis, mentės susukimo kampas, kad mentės galo apsisukimai ir rotoriaus galios koeficientas būtų maksimalūs. Galios koeficientas C_p priklauso nuo vėjo kampo (φ), mentės galo apsisukimo greičio (λ_r), sklendimo santykio (C_D/C_L), mentės galo nuostolių (F).

Programoje *QBlade* apskaičiavus NACA5518 profilio charakteristikas, nustatyta mentės geometrija.

Mentė suskirstyta į atskiras dalis, atskirus elementus, kurie turi savo profilį, tam tikrą susukimo kampą, išgaubtumą, storį (19 pav.). Suprojektuotos mentės ilgis 9,4 m, stygos ilgis storiausioje mentės vietoje 1,04 m.

Suprojektavus mentę parenkamas turbinos menčių skaičius.

BEM

3D View Control

X Y Z Iso Reset

Blade Data

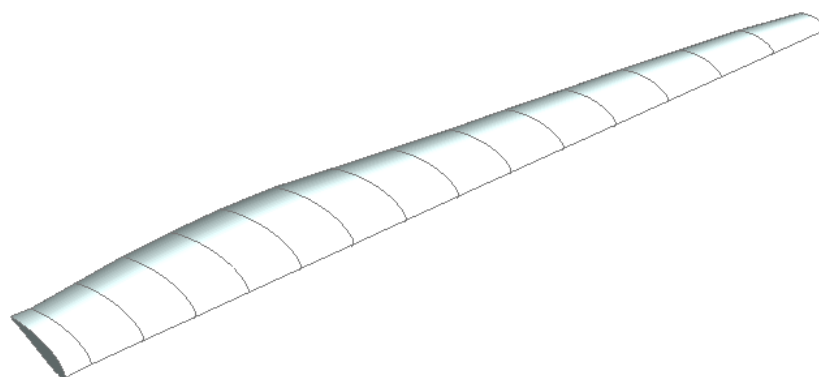
New Blade

Rotor has 3 blades and 892.00 mm Hub Radius

	Pos (mm)	Chord (mm)	Offset (mm)	Twist	Foil	Polar
1	892	758	0	22,26	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
2	1180	802	0	14,51	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
3	1769	888	0	11,1	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
4	2359	962	0	9,66	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
5	2949	1012	0	7,92	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
6	3539	1040	0	6,47	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
7	4129	1028	0	5,45	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
8	4718	956	0	4,69	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
9	5308	882	0	4,12	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
10	5898	809	0	3,66	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
11	6488	750	0	3,3	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
12	7077	682	0	3	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
13	7667	619	0	2,75	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
14	8257	535	0	2,538	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
15	8847	458	0	2,35	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
16	9437	333	0	2,19	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar

Edit Blade New Blade

19 pav. Mentės geometriniai parametrai



20 pav. Suprojektuota mentė

Menčių skaičiaus parinkimas

Renkantis jėgainės menčių skaičių atsižvelgiama į keletą faktorių: mentės galo greičio santykis, galios koeficientas, taip pat didelis dėmesys skiriamas svoriui, kainai, ilgaamžiškumui, sukeliama triukšmui. Vėjo jėgainių pramonėje trijų menčių jėgainės daug populiarnesnės už dvimentes, nes trimentės geriau subalansuotos, didesnis aerodinaminis efektyvumas, sukiamos mažesnės vibracijos ir triukšmas. Nors naudojant mažesnę menčių skaičių gerokai sumažinama jėgainės kaina ir svoris.

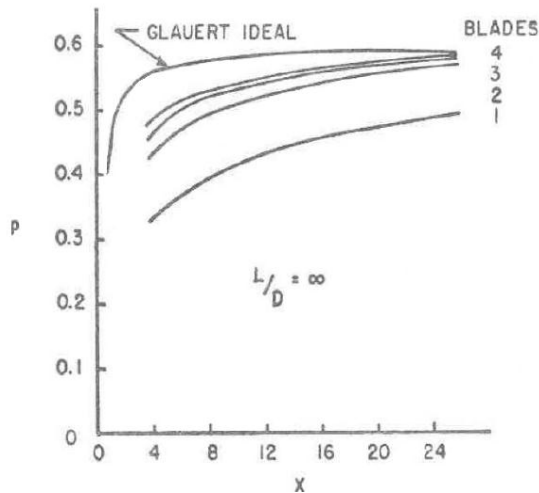
Paveikslėlyje 21 parodytas jėgainės efektyvumas priklausomai nuo menčių skaičiaus. Didėjant menčių skaičiui efektyvumas didėja, bet tuo pačiu didėja nestabilumas, išbalansavimas, tai neleidžia toliau didinti efektyvumo. Vėjo greitis taip pat lemia menčių konfigūraciją.

Trijų ir dviejų menčių vėjo jėgainės

Kaip jau minėjau, šiuo metu populiariausios trijų menčių VJ, nes jos atsparesnės apkrovoms, taip pat kelia mažesnę triukšmą. Norint išspęsti šią problemą dviejų menčių VJ būtina didinti mentės stygą, dėl ko didėja stygos ir storio santykis, nors reikalavimuose apibrėžta, kad jis būtų kuo mažesnis. Didelis dėmesys skiriamas aerodinaminiam paviršiaus plotui, kuris sukuria specifinį vėjo stabdymo efektą. Didinant mentės storį, ilgėja styga, tai sutvirtina mentę be papildomų konstrukcinių medžiagų. Ilga tvirta mentė dėl savo apsisukimų turėtų leisti gauti didesnes reikšmes.

Dviejų menčių jėgainių privalumai – mažesnė kaina ir svoris. Dvimentę jėgainę paprasčiau sumontuojama, ją galima surinkti ant žemės, o paskui su stiebu pastatyti į darbinę padėtį, o trimentės surinkinėjamus aukštai, tik jau ant pastatyto stiebo. Sunku suprojektuoti nesimetrinę dviejų menčių VJ, paprasčiau trimentę simetrinę jėgainę. Taip pat dvimentės jėgainės stebulei reikalingas balastas pusiausvyrai palaikyti.

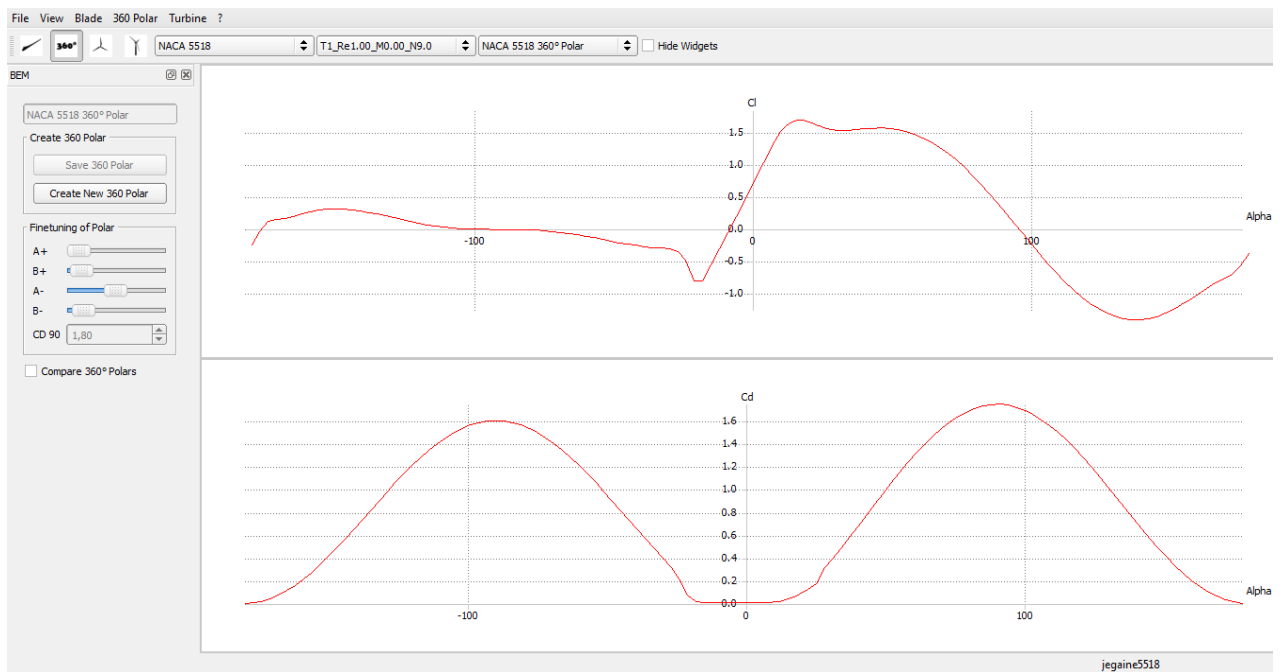
Dėl daugelio privalumų projektuojamai VJ menčių skaičių parinktas – 3.



21 pav. Aerodinaminis efektyvumas priklausomai nuo menčių skaičiaus (Tangler *et al.* 1995: 2-5)

3.3 360° Poliarė

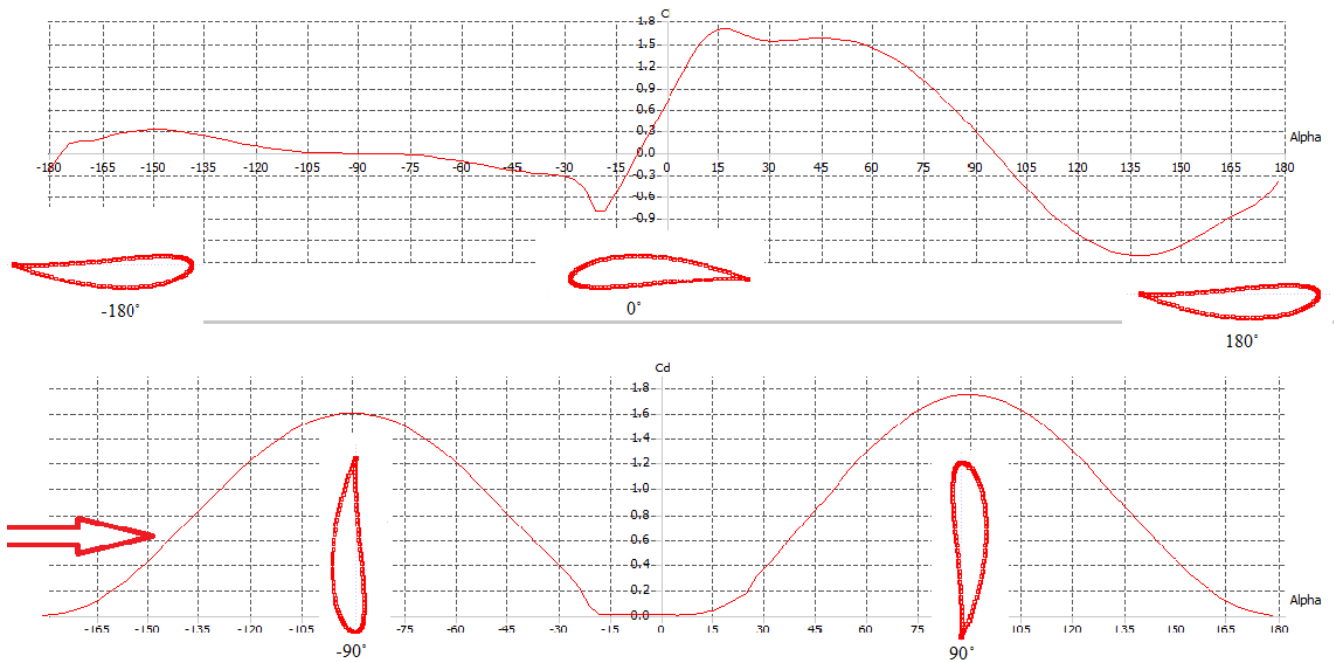
Poliarės, kurios yra *XFOIL* programos analizės rezultatas, arba į *Qblade* importuoti profilių duomenys gali būti paversti į pilną 360° poliarę. Kuriant šią poliarę įvedamas $CD_{90,2D}$ koeficiento dydis- 1,82. Du taškai C_{L1} ir C_{L2} gali būti keičiami naudojant slankiklius A+ (taškui C_{L1}) ir B+ (taškui C_{L2}). Slankikliai A- ir B- keičia atitinkamų taškų neigiamą funkcijos f ekstrapoliaciją. Ekstrapoliacija apibūdina mentės šakninės dalies efekto metodą, mentės galo efektą ir atakos kampo intervalo padidinimą iki 100°, aerodinaminių charakteristikų pritaikymą VJ mentėms.



22 pav. 360° Poliarė

2 lentelė. Keliamosios jėgos ir pasipriešinimo koeficientai esant skirtingam atakos kampui

$\alpha (^{\circ})$	C_l	C_d
-180	-0,242	0,006
-165	0,198	0,116
-150	0,316	0,413
-135	0,237	0,814
-120	0,094	1,209
-105	0,008	1,496
-90	-0,005	1,600
-75	-0,028	1,494
-60	-0,075	1,205
-45	-0,262	0,803
-30	-0,369	0,387
-15	-0,363	0,059
0	0,706	0,012
15	1,702	0,047
30	1,542	0,391
45	1,575	0,866
60	1,425	1,316
75	0,958	1,635
90	0,246	1,743
105	-0,527	1,610
120	-1,146	1,277
135	-1,399	0,835
150	-1,243	0,406
165	-0,832	0,104
180	-0,376	0,008



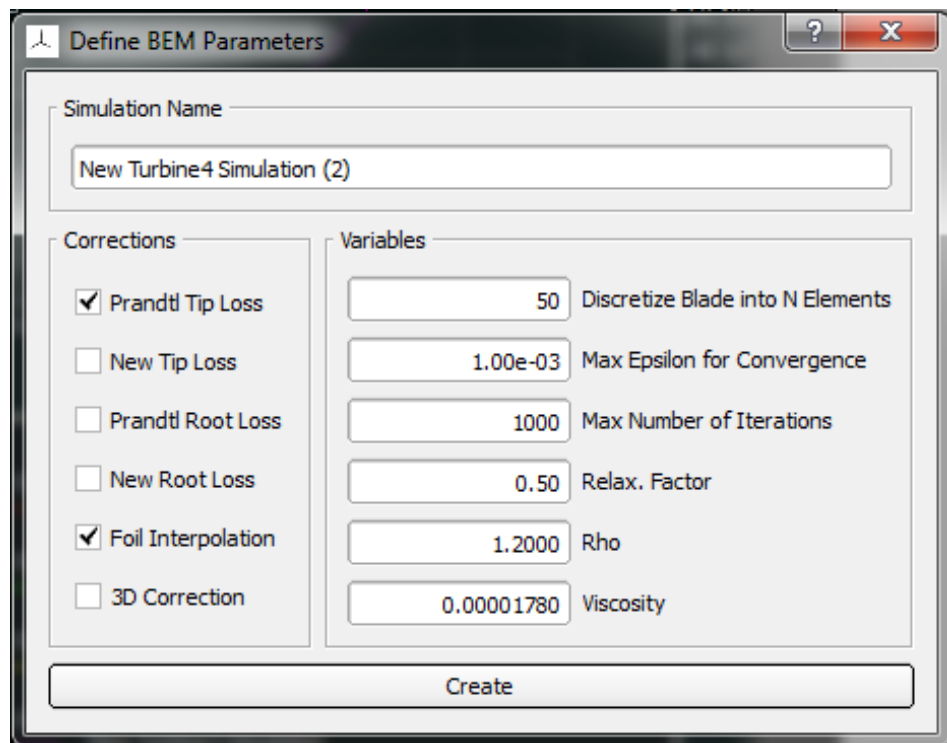
23 pav. Keliamosios jėgos ir pasipriešinimo koeficientų priklausomybė nuo atakos kampo

3.4 Rotoriaus ir turbinos modeliavimas

Modeliavimo parametrai

Prenkant menčių elementų momentų teorijos skaičiavimo parametrus turi būti įvedami šie dydžiai:

- 1) Mentės elementų skaičius;
- 2) Maksimali konvergencijos epsilon;
- 3) Maksimalus iteracijų skaičius;
- 4) Slopavimo koeficientas;
- 5) Tankis;
- 6) Klampumas.

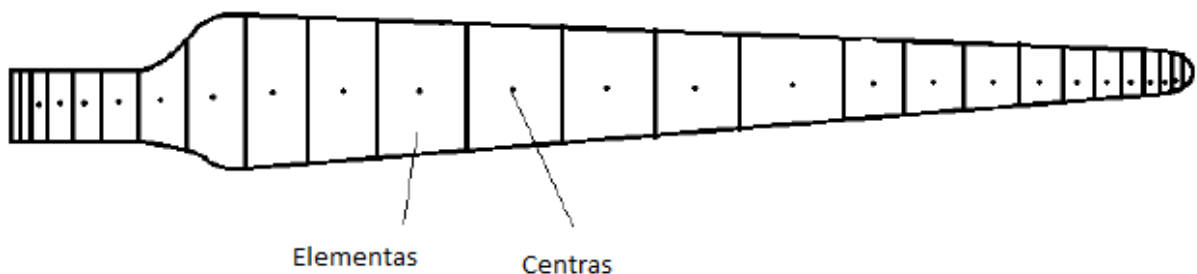


24 pav. MEM parametrų nustatymas

1) Mentės elementų skaičius

Mentės elementų skaičius tai į kiek elementų padalinta mentė. Šis skaičius nepriklauso nuo to kiek mentė turi dalių. MEM algoritmas taikomas kiekvienam elementui. Įvesties duomenys, tokie kaip styga ar susukimo kampas, įkeliami tarp mentės elementų skerspjūvių ir apskaičiuojamas elemento centras. Elementai platinami naudojant sinusoidinius tarpus. Tai leidžia suskirstyti mentę į daugiau elementų ties mentės galu ir šaknine dalimi, ten kur didžiausi nuolydžiai. Naudojant sinusoidinius tarpus sumažinamas elementų skaičius, taip sutrumpėja skaičiavimo laikas.

Visi MEM skaičiavimai atliekami elemento centre, naudojant elemento dydžių vidurkį.



25 pav. Mentės elementų sinusoidiniai tarpai

2) Epsilon

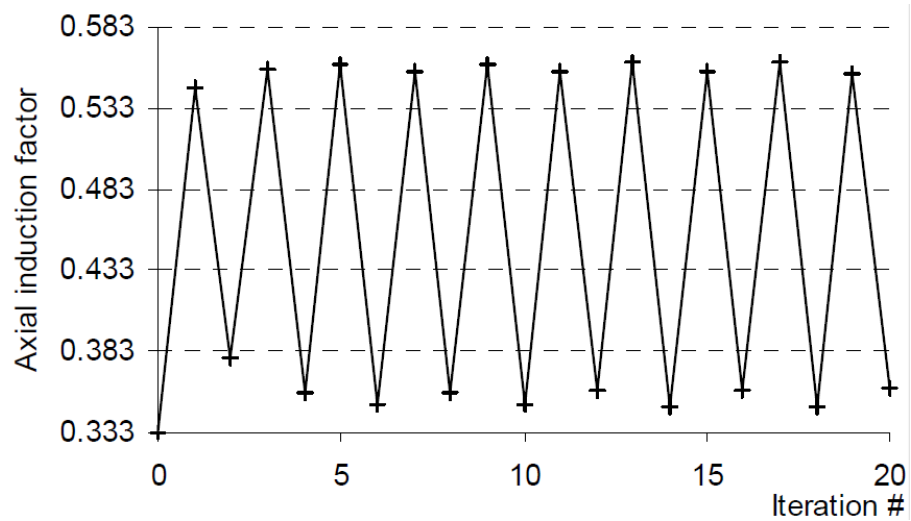
Epsilon (ϵ) dydis nustatomas kai konverguojamos iteracijos. Atlikus jautrumo analizę rekomenduojama epsilon reikšmė - 10^{-5} .

3) Maksimalus iteracijų skaičius

Maksimalus iteracijų skaičius nustatomas tam, kad algoritmas nebūtų begalinis.

4) Slopinimo koeficientas

Iteracijų ciklo pagrindinė problema MEM skaičiavime yra ašinio indukcinio koeficiento svyravimas. Svyravimų priežastis – tai periodiniai jėgainės apkrovos būsenos perjungimai tarp lengvos ir sunkios apkrovos. Tai gali turėti įtakos skaičiavimų kokybei ir tikslumui. Norint įvertinti svyravimus *Maheri* (2006: 2–3) siūlo įvesti slopinimo koeficientą ω_{relax} .

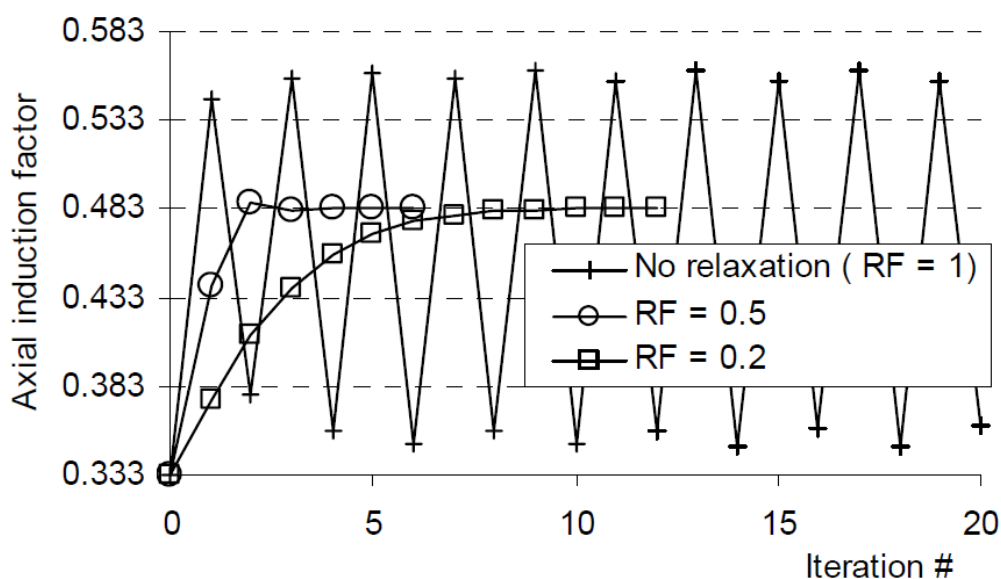


26 pav. Ašinio indukcinio koeficiento svyravimai esant lengvoms ir sunkioms apkrovoms (*Maheri et al.* 2008: 3–4)

Skaičiuojant ašinį indukcinį koeficientą a_{k+1} , įvertinamas slopinimo koeficientas ω_{relax} :

$$a_{k+1} = \omega_{relax} a_{k+1} + (1 - \omega_{relax}) a_k; \quad (36)$$

$$0 < \omega_{relax} < 1$$



27 pav. Svyravimų slopinimas naudojant skirtingus slopinimo koeficientus
(Maheri *et al.* 2008: 3–4)

5) Tankis

Oro tankis supantis vėjo jėgainę naudojamas galios skaičiavimo formulėje:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V_0^3 C_p \quad (37)$$

Tankis skaičiavimuose naudojamas tik tada kai modeliuojama jėgainė. Rotoriaus modeliavime visi kintamieji yra bedimensiniai ir priklauso tik nuo mentės galo greičio santykio.

6) Klampumas

Dinaminis klampumas naudojamas vietinio Reynolds'o skaičiaus formulėje:

$$\text{Re}(r) = \frac{V_{rel}(r) c(r) \rho}{\mu} \quad (38)$$

Modeliavimo rezultatai

Modeliavimo rezultatai remiantis menčių elementų momentų teorijos skaičiavimais gali būti dviejų tipų. Rotorių arba turbiną charakterizuoja bendros kintamųjų arba rotoriaus kintamųjų reikšmės. C_p yra bendras kintamasis. Modeliuojant kiekvienas mentės galo greičio ar vėjo greičio padidėjimas duoda

vieną C_p reikšmę. C_p nuo λ kreivė parodo tik rotorius charakteristikas, bet nieko apie rotorų supančią aplinką. Bendrieji kintamieji apskaičiuojami įvertinant tik pastovius kintamuosius. Kiekvienas taškas C_p kreivėje apibūdina MEM skaičiavimus priklausomai nuo vieno mentės galo greičio ar tam tikro vėjo greičio.

Trauka apskaičiuojama pridėdant normalias apkrovas, kurios veikia mentės elementus. Vietiniai kintamieji arba mentės kintamieji suteikia informaciją apie mentės būklę.

Rotoriaus modeliavimo kintamieji

Visi rotoriaus modeliavimo kintamieji yra bedimensiniai dydžiai. Bendri kintamieji naudojami rotoriaus modeliavime yra:

- Galios koeficientas C_p
- Traukos koeficientas C_T
- Mentės galo greičio santykis λ
- Galios koeficientas priklausomai nuo Mentės galo greičio santykio $K_p = C_p / \lambda^3$

Pastovūs kintamieji naudojami rotoriaus modeliavime:

- Ašinis indukcinis koeficientas a
- Radialinis indukcinis koeficientas a'
- Pastovus mentės galo greičio santykis λ_{loc}
- Normalinės jėgos komponentas C_n
- Tangentinės jėgos komponentas C_t
- Įeinančio srauto kampas φ
- Susukimo kampas θ
- Styga c
- Keliamosios jėgos koeficientas C_L
- Pasipriešinimo jėgos koeficientas C_D
- Iteracijų skaičius n

Turbinos modeliavimo kintamieji

Modeliuojant turbiną visi bendrieji kintamieji iš rotoriaus modeliavimo skaičiuojami pakartotinai:

- Galia P [W]
- Trauka T [N]
- Vėjo greitis V_0 [m/s]

- Kampinis dažnis Ω [aps/min]
- Žingsnio kampas β
- Šaknies lenkimo momentas M [Nm]
- Galios koeficientas įvertinus nuostolius $C_{P,loss}$

Modeliuojant turbiną taip pat pakartotinai skaičiuojami ir mentės kintamieji:

- Pastovus *Reynoldso* skaičius $Re_{loc} = \frac{V_{relcp}}{\mu}$
- *Re* pokytis modeliuojant poliarę $Re_{loc} - Re_{polar}$
- Kritinis šiurkštumas $k_{critical} \approx 100 \frac{\mu}{V_{rel}} [mm]$
- *Macho* skaičius Ma

Rotoriaus modeliavimas

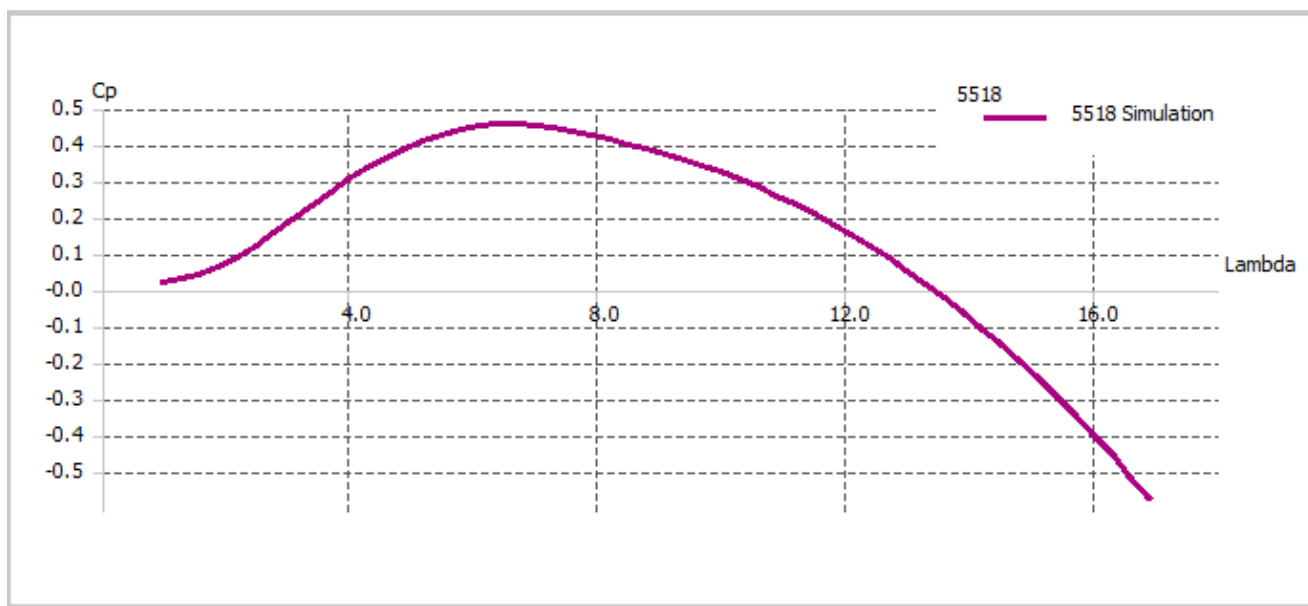
Modeliuojant rotorių galima pasirinkti skirtingą mentės galo greičio santykį. *QBlade* programoje rotoriaus modeliavimas atliekamas tik tada, kai suprojektuojama mentė. Rotoriaus modeliavimo modelyje galima pakoreguoti MEM algoritmą ir parinkti modeliavimo parametrus. Modeliavimo metu pasirinktas mentės galo greičio santykio intervalas nuo 1 iki 17. Rotoriaus modeliavimas visada bedimensinis. Laisvo srauto greitis yra pastovus, o rotoriaus spindulys apskaičiuotas ir normalizuotas.

Parenkamos menčių elementų momentų teorijos skaičiavimo parametrų reikšmės:

- Mentės elementų skaičius: 50
- Maksimali konvergencijos epsilon: 0,0001
- Maksimalus iteracijų skaičius: 100
- Slopavimo koeficientas: 0,2
- Tankis: 1,2
- Klampumas: 0,00001780

Kiekvienas taškas C_p kreivėje apibūdina MEM skaičiavimus priklausomai nuo vienos mentės galo greičio reikšmės. Didžiausia keliamosios jėgos koeficiento reikšmė $C_p = 0.45$, kai mentės galo greičio santykis 6.4. Šitas santykis parodo tai, kad jėgainės apsisukimų greitis turi būti apskaičiuotas pagal vėjo greitį taip, kad jo reikšmė būtų apie 6.4, nes dar didinant sūkių jėgainės galingumas nebedidės, o tik

kris, jei jėgainės apsisukimų greitis mažesnis, tai ji dirbs ne visu pajėgumu. Apsisukimų skaičius priklauso nuo mentės ilgio, vėjo greičio ir santykinio jėgainės apsisukimų skaičiaus (formulė 5).



28 pav. Rotoriaus modeliavimas

Turbinos nustatymas ir modeliavimas

Šiame turbinos nustatymo ir modeliavimo modulyje aprašoma vėjo jėgainė. Kuriant jėgainę parenkamas jėgainės tipas, parametrai.

Turbinos tipas parenkamas pagal:

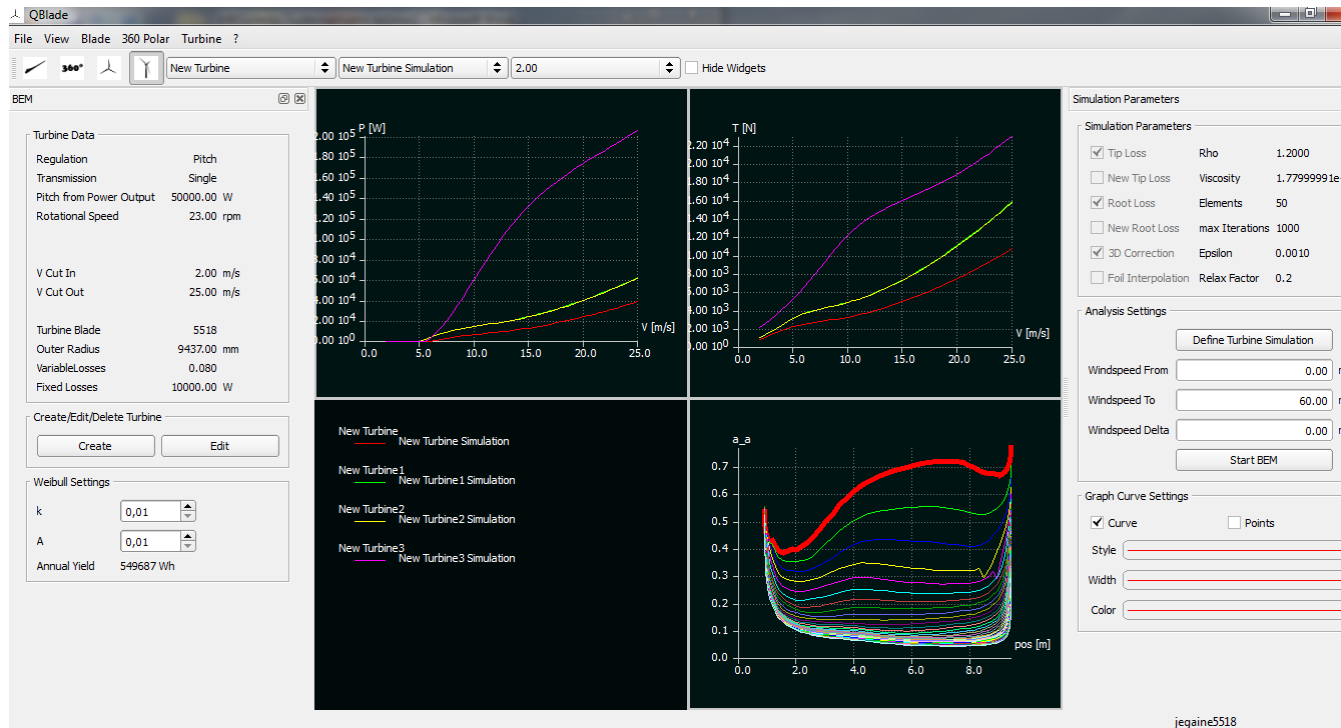
- Reguliavimą: žingsninis arba srauto atitrūkimo.
- Perdavimas: vienos pakopos, dviejų pakopų arba kintamas.

Jeigu turbinos mentės žingsnis reguliuojamas, turi būti parenkama išėjimo galia. Padidėjus vėjo greičiui turbina palaiko reikiamą išėjimo galią ir jei reikia keičiamas menčių žingsnis, taip mažinama galia. Srauto atitrūkimu reguliuojama VJ neturi žingsninės kontrolės, išėjimo galia ribojama tik tada, kai srautas atitrūksta nuo mentės.

Pasirenkant vieno greičio perdavimą nustatomas tik vienas sukimosi greitis, kuriuo dirba jėgainė nepriklausomai nuo vėjo greičio kitimo intervalo. Pasirinkus VJ jėgainę su dviejų pakopų perdavimu, nustatomi du sukimosi greičiai, bei vėjo greitis. Kintamo perdavimo jėgainės turi maksimalų ir minimalų sukimosi greičius. Nustatomas mentės galo greičio santykis λ_0 , atliekant modeliavimą šis santykis apskaičiuojamas kiekvienam duotam sukimosi greičiui.

Jėgainės parametrai kurie apibūdina jėgainę:

- Rotoriaus mentė
- Įjungimo vėjo greitis
- Išjungimo vėjo greitis
- Pastovūs nuostoliai
- Kintami nuostoliai



29 pav. Turbinos nustatymas ir modeliavimas

Projektuojant jėgainę pirmiausia reikia turėti rotoriaus nustatymus, visus mentės geometrinius parametrus. Nustatyti vėjo greitį kada jėgainė pradeda dirbti ir kokį vėjo greitį pasiekus jėgainė stabdoma. Galios nuostoliai nepriklauso nuo aerodinaminių charakteristikų, jie priklauso nuo generatoriaus ir pavarų dėžės efektyvumo, nuo pastovių ir kintamų nuostolių dydžio. Šie nuostoliai naudojami išėjimo galios skaičiavimo formulėje:

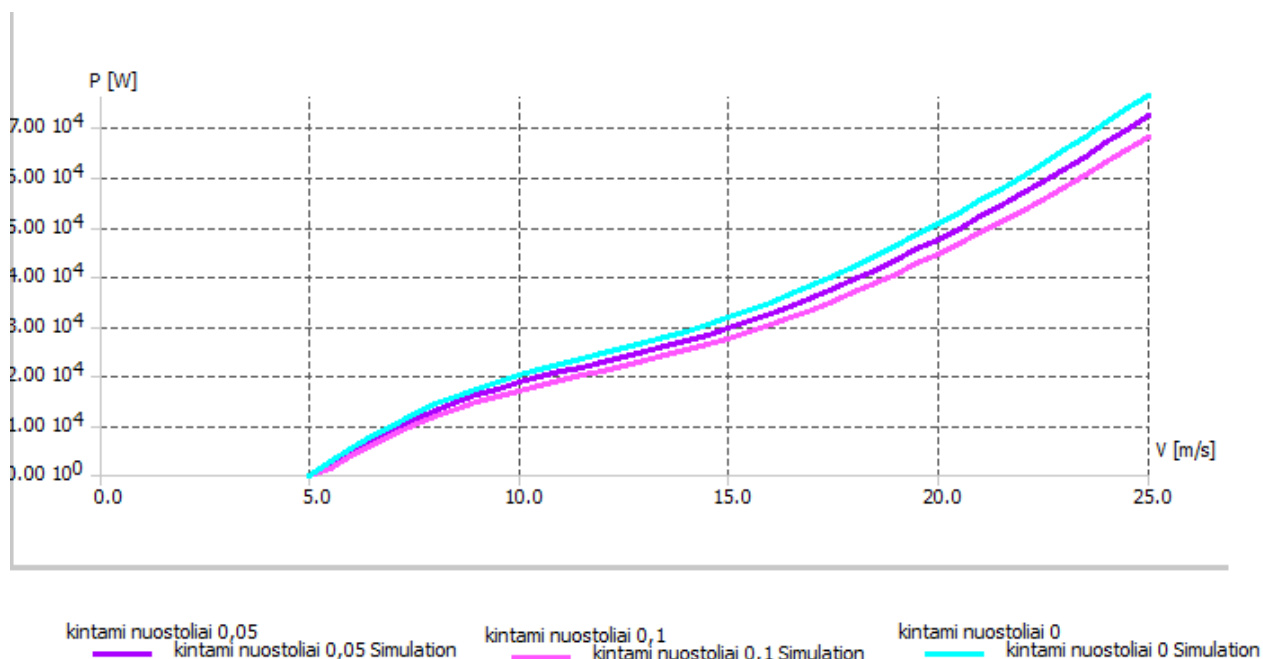
$$P_{out} = (1 - k_v)P_0 - P_{fixed} \quad (39)$$

k_v – kintamų nuostolių koeficientas;

P_{fixed} – pastovių nuostolių koeficientas.

Galios nuostolius galima apskaičiuoti naudojantis formule iš ANNEX XIV ataskaitos (Thumthae *et al.* 2006: 2-3):

$$P_{Generator} = 0,78 \cdot P_{Mechanical} \quad (40)$$



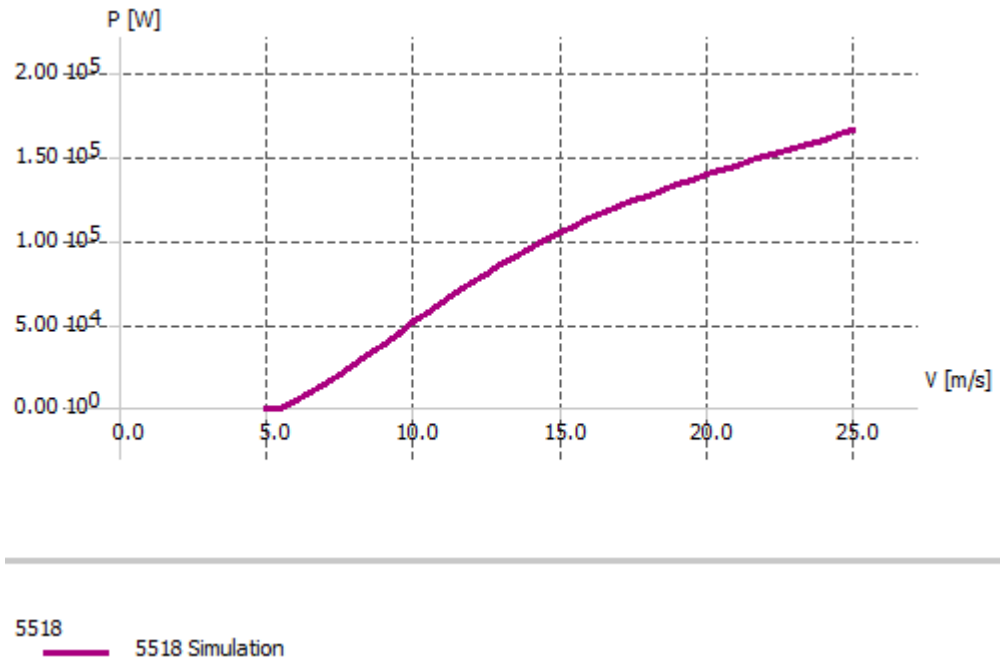
30 pav. Galios priklausomybė nuo vėjo greičio esant skirtingam kintamų nuostolių koeficientui

Turbinos modeliavimas vykdomas pasirinktame vėjo greičio reikšmių intervale. Pasirinkus sukimosi greitį, jėgainės mentės galo greičio santykis apskaičiuojamas kiekvienai vėjo greičio reikšmei. Tada modeliuojant pagal MEM teoriją apskaičiuojamas mentės galo greitis, kuris tolygus rotoriaus modeliavimui.

Taikant menčių elementų momentų teoriją *QBlade* programa apskaičiuojamas jėgainės galingumas. Parenkami jėgainės parametrai:

- Reguliavimas: srauto atitrūkimo (fiksauto žingsnio)
- Perdavimas: vienos pakopos
- Įjungimo vėjo greitis: 5 m/s
- Išjungimo vėjo greitis: 25 m/s

- Rotoriaus spindulys: 9437 mm
- Kintami nuostoliai: 0,08
- Pastovūs nuostoliai: 10 kW
- Apsisukimų skaičius: 50 aps/min.



31 pav. Jėgainės galios priklausomybė nuo vėjo greičio

Šiame skyriuje pateikti pagrindiniai etapai projektuojant vėjo jėgainę naudojant *QBlade* programą. Buvo išanalizuotos profilių charakteristikos, parinktas tinkamiausias mentės profilis, sukurta mentės geometrija, sumodeliuota 360° profilio poliarė. Taikant mentės elementų momentų teoriją apskaičiuota galios koeficiento priklausomybė nuo mentės galo greičio. Sumodeliuota vėjo jėgainė, įvertinamas vėjo greitis, jėgainę veikiantys faktoriai. Gauta galios kreivė priklausomai nuo vėjo greičio. Mentės, kurios profilis NACA 5518, keliamosios jėgos koeficientas $C_{Lmax} = 1.62$, suprojektuotos mentės ilgis 9437 mm, galios koeficientas $C_p = 0.45$, kai $\lambda = 6.4$, parinkus menčių skaičių 3 jėgainės galia kai vėjo greitis 15 m/s siekia 104 kW.

4. EKSPERIMENTAS IR JO REZULTATŲ ĮVERTINIMAS, PALYGINAMOJI ANALIZĖ

Suprojektavus vėjo jėgainę, išanalizavus aerodinamines charakteristikas, žinant jėgainės parametrus galima atlikti tyrimą, kaip jos parametrai kinta nuo skirtingo apsisukimų skaičiaus, kaip keičiasi sukuriamą galia keičiant geometrinius parametrus. Pasirinkus jėgainės reguliavimo tipą žingsninį, galima nustatyti koks mentės žingsnio kampas reikalingas prie skirtingo vėjo greičio.

Tyrimas atliekamas *QBlade* programa, skaičiavimai atliekami remiantis menčių elementų momentų teorija. Tyrimo metu nustatomi pagrindiniai parametrai kurie daro didžiausią įtaką jėgainės sukuriamai galiai, grafiškai pateikiamas palyginimas su suprojektuota mente ir mente, kurios parametrai pakeisti. Tyrimo rezultatai, tai vėjo jėgainės sukuriamą galia kilovatais prie tam tikro vėjo greičio priklausomai nuo skirtingų keičiamų parametru. Tyrimas parodo pagrindinius parametrus į kuriuos reikia atkreipti dėmesį projektuojant jėgainę, kokius parametrus keisti norint padidinti jėgainės galią. Atlikus tokį tyrimą, galima suprojektuoti norimo galingumo jėgainę.

4.1 Jėgainės galios priklausomybė nuo skirtingo apsisukimų greičio

Taikant menčių elementų momentų teoriją *QBlade* programa apskaičiuojamas jėgainės galingumas. Tiriama jėgainės galia, kaip ji kinta keičiant apsisukimų greitį. Suprojektavus mentę, apsisukimų skaičius gali būti apskaičiuotas remiantis galios koeficiento ir santykinio jėgainės mentės greičio priklausomybės grafiku (pav 28). Pasirinkti tokie nedideli apsisukimų greičiai, nes nagrinėjamas jėgainės darbas prie mažų vėjo greičių. Parenkami jėgainės parametrai (32 pav.):

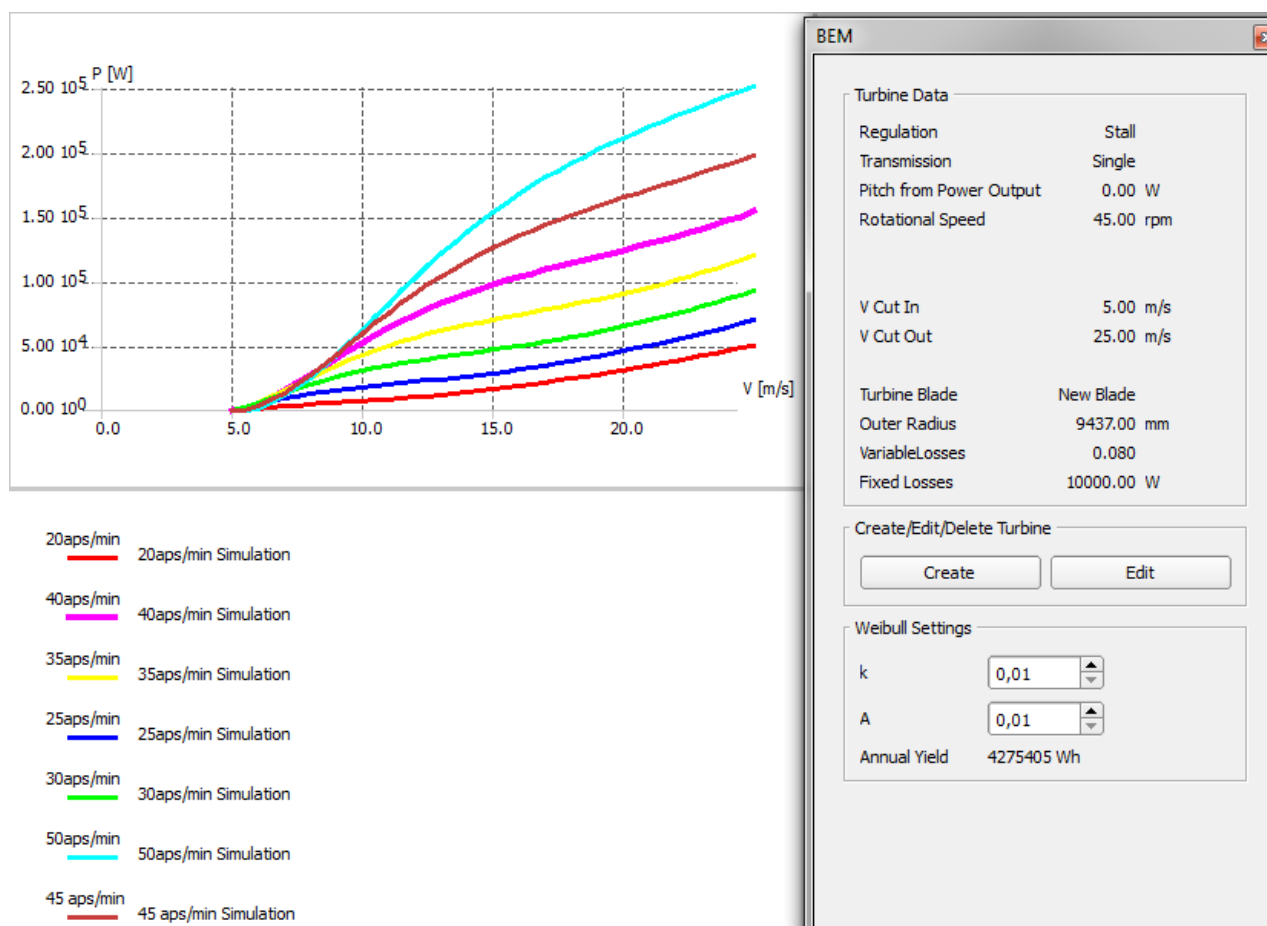
- Reguliavimas: srauto atitrūkimo (fiksuoto žingsnio)
- Perdavimas: vienos pakopos
- Įjungimo vėjo greitis: 5 m/s
- Išjungimo vėjo greitis: 25 m/s
- Rotoriaus spindulys: 9437 mm
- Kintami nuostoliai: 0,08
- Pastovūs nuostoliai: 10kW
- Keičiamas apsisukimų greitis nuo 20aps/min iki 50 aps/min.

Nagrinėjamos jėgainės reguliavimo tipas – srauto atitrūkimo, bet naudojantis menčių elementų momentų teorijos skaičiavimais galima nagrinėti ir žingsninį reguliavimą, įvedami reikiami šio tipo parametrai. Jėgainė gali veikti su nustatytu fiksuotu žingsniu kol jėgainė neviršija nominalios galios.

Padidėjus vėjo greičiui keičiamas mentės žingsnis, taip stabdoma jėgainė kol galia pasiekia nominalią reikšmę.

Jėgainės reguliavimas srauto atitrūkimu, tai pats paprasčiausias mechaninis reguliavimo būdas, kai mentės pritvirtintos prie stebulės ir jų žingsnio keisti negalima.

Iš grafiko matyti, kad jėgainės galia didėja kai didėja vėjo greitis, taip pat sukuriamą galia daug didesnė kai mentės apsisukimų skaičius per minutę didėja. Kai vėjo greitis 15 m/s, o apsisukimų greitis 25 aps/min jėgainės galia tik 28 kW, o kai apsisukimų greitis 50 aps/min, galia išauga iki 153 kW.



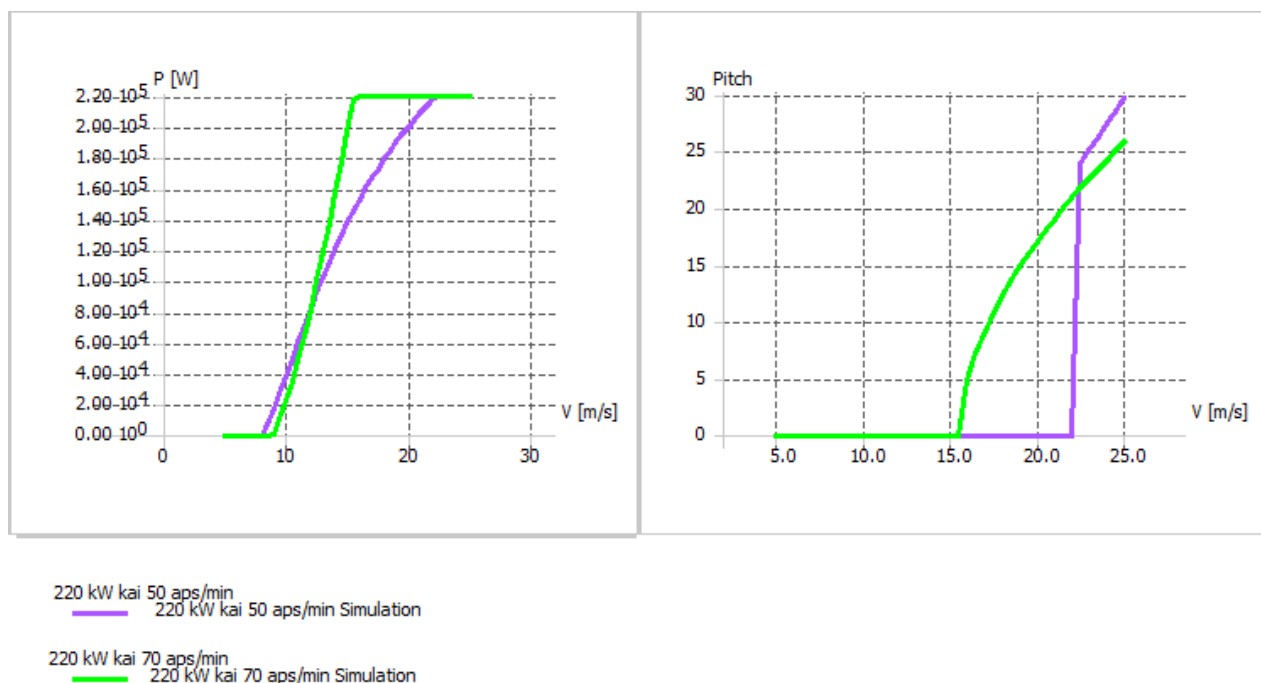
32 pav. Jėgainės galios skaičiavimas *QBlade* programa keičiant apsisukimų greitį

4.2 Jėgainės reguliavimas keičiant mentės žingsnio kampą

Projektuojant jėgainę galima pasirinkti reguliavimo tipą. Šiuo atveju turbino mentės žingsnis reguliuojamas, parenkama nominali galia 220 kW. Padidėjus vėjo greičiui turbina palaiko reikiamą išėjimo galią ir jei reikia keičiamas menčių žingsnis, taip mažinama galia.

Taikant menčių elementų momentų teoriją *QBlade* programa apskaičiuojamas jėgainės galingumas priklausantis nuo vėjo greičio. Parenkami jėgainės parametrai:

- Reguliavimas: žingsninis
- Nominali galia: 220kW
- Perdavimas: vienos pakopos
- Įjungimo vėjo greitis: 5 m/s
- Išjungimo vėjo greitis: 25 m/s
- Rotoriaus spindulys: 9437 mm
- Kintami nuostoliai: 0,08
- Pastovūs nuostoliai: 40kW
- Apsisukimų skaičius: 50aps/min ir 70 aps/min.



33 pav. Vėjo jėgainės galios ir mentės žingsnio kampas priklausomai nuo vėjo greičio

3 lentelė. Mentės žingsnio kampas priklausomai nuo vėjo greičio

V (m/s)	Žingsnio kampas (°) kai 50 aps/min	V (m/s)	Žingsnio kampas (°) kai 70 aps/min
22,5	23.80	16	4.80
23	25.05	17	9.15
23,5	26.25	18	12.25

3 lentelės pabaiga

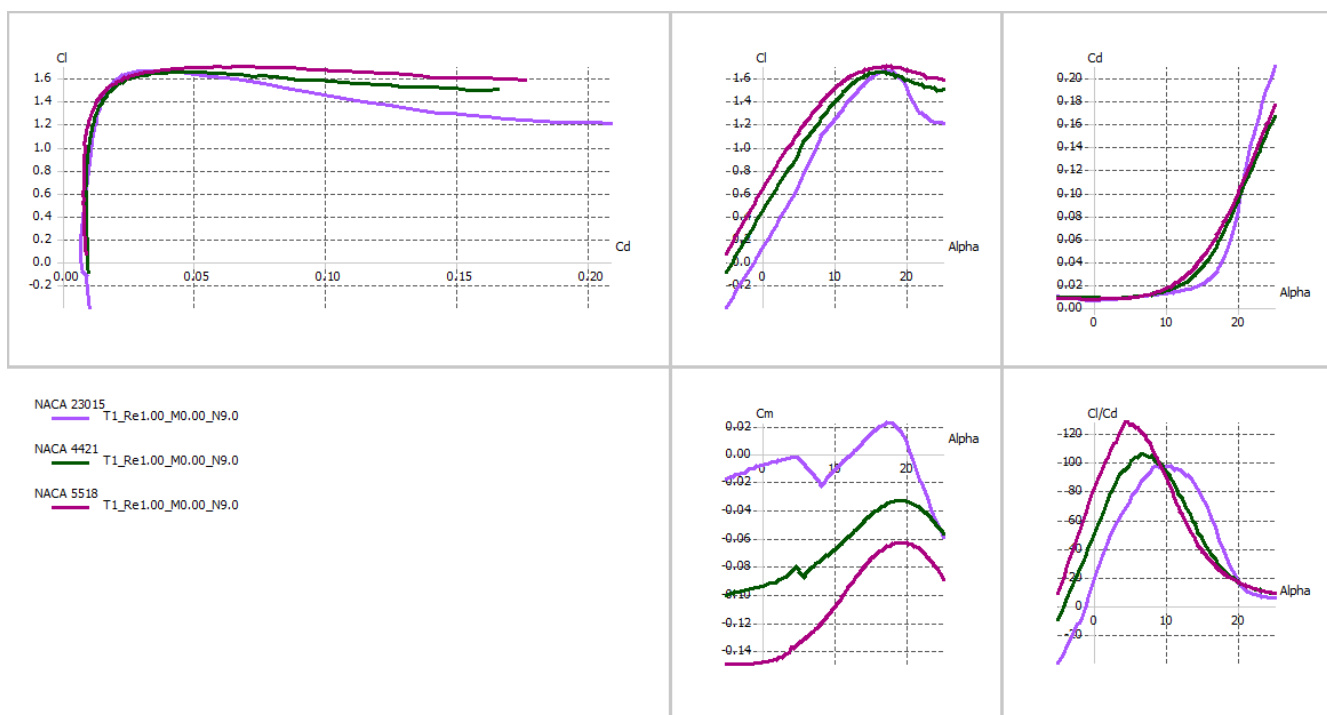
V (m/s)	Žingsnio kampas (°) kai 50 aps/min	V (m/s)	Žingsnio kampas (°) kai 70 aps/min
24	27.40	19	14.80
24,5	28.55	20	17.00
25	29.60	21	19.00
		22	20.85
		23	22.60
		24	24.20
		25	25.75

Iš grafiko matyti: kai jėgainės apsisukimų skaičius didesnis – sukurama didesnė galia prie mažesnio vėjo greičio. Nustačius norimą jėgainės galingumą, šiuo atveju 220 kW, kai apsisukimų skaičius 70 aps/min, jėgainė pradeda stabdyti kai vėjo greitis 16 m/s, mentės žingsnio nustatymo kampas 4.8 laipsnių.

4.3 Jėgainės charakteristikos naudojant NACA 5518, NACA 4421 ir NACA 23015 mentės profilius

Projektuojant jėgainę pagrindinis parametras yra galia. Siekiama, kad prie kuo mažesnio vėjo greičio jėgainės išėjimo galia būtų kuo didesnė. Buvo pateikta galios priklausomybė nuo apsisukimų skaičiaus, nuo reguliavimo tipo, nuo kintamų nuostolių dydžio. Sukuriama galia labiausiai priklauso nuo mentės geometrinių parametrų: mentės profilio, mentės ilgio.

Toliau pateikiamas jėgainės galios tyrimas priklausantis nuo mentės geometrinių parametrų. Apskaičiuojamos NACA 4421 ir NACA 23015 profilių charakteristikos ir sulyginamos su jau išnagrinėtu profiliu NACA 5518.



34 pav. NACA 5518, NACA 4421 ir NACA 23015 profilių charakteristikos

Programoje *QBlade* apskaičiavus profilių charakteristikas, nustatyta mentės geometrija. Stygos ilgis kiekviename pjūvyje, bei mentės ilgis tokie pat kaip anksčiau nagrinėtoje mentėje, sukurtos dvi naujos mentės naudojant NACA 4421 ir NACA 23015 profilius.

	Pos (mm)	Chord (mm)	Offset (mm)	Twist	Foil	Polar
1	892	758	0	22,26	NACA 4421	NACA 4421 360° Polar
2	1180	802	0	14,51	NACA 4421	NACA 4421 360° Polar
3	1769	888	0	11,1	NACA 4421	NACA 4421 360° Polar
4	2359	962	0	9,66	NACA 4421	NACA 4421 360° Polar
5	2949	1012	0	7,92	NACA 4421	NACA 4421 360° Polar
6	3539	1040	0	6,47	NACA 4421	NACA 4421 360° Polar
7	4129	1028	0	5,45	NACA 4421	NACA 4421 360° Polar
8	4718	956	0	4,69	NACA 4421	NACA 4421 360° Polar
9	5308	882	0	4,12	NACA 4421	NACA 4421 360° Polar
10	5898	809	0	3,66	NACA 4421	NACA 4421 360° Polar
11	6488	750	0	3,3	NACA 4421	NACA 4421 360° Polar
12	7077	682	0	3	NACA 4421	NACA 4421 360° Polar
13	7667	619	0	2,75	NACA 4421	NACA 4421 360° Polar
14	8257	535	0	2,538	NACA 4421	NACA 4421 360° Polar
15	8847	458	0	2,35	NACA 4421	NACA 4421 360° Polar
16	9437	333	0	2,19	NACA 4421	NACA 4421 360° Polar

35 pav. Mentės geometriniai parametrai, profilis – NACA 4421

	Pos (mm)	Chord (mm)	Offset (mm)	Twist	Foil	Polar
1	892	758	0	22,26	NACA 23015	NACA 23015 360° Polar
2	1180	802	0	14,51	NACA 23015	NACA 23015 360° Polar
3	1769	888	0	11,1	NACA 23015	NACA 23015 360° Polar
4	2359	962	0	9,66	NACA 23015	NACA 23015 360° Polar
5	2949	1012	0	7,92	NACA 23015	NACA 23015 360° Polar
6	3539	1040	0	6,47	NACA 23015	NACA 23015 360° Polar
7	4129	1028	0	5,45	NACA 23015	NACA 23015 360° Polar
8	4718	956	0	4,69	NACA 23015	NACA 23015 360° Polar
9	5308	882	0	4,12	NACA 23015	NACA 23015 360° Polar
10	5898	809	0	3,66	NACA 23015	NACA 23015 360° Polar
11	6488	750	0	3,3	NACA 23015	NACA 23015 360° Polar
12	7077	682	0	3	NACA 23015	NACA 23015 360° Polar
13	7667	619	0	2,75	NACA 23015	NACA 23015 360° Polar
14	8257	535	0	2,538	NACA 23015	NACA 23015 360° Polar
15	8847	458	0	2,35	NACA 23015	NACA 23015 360° Polar
16	9437	333	0	2,19	NACA 23015	NACA 23015 360° Polar

36 pav. Mentės geometriniai parametrai, profilis – NACA 23015

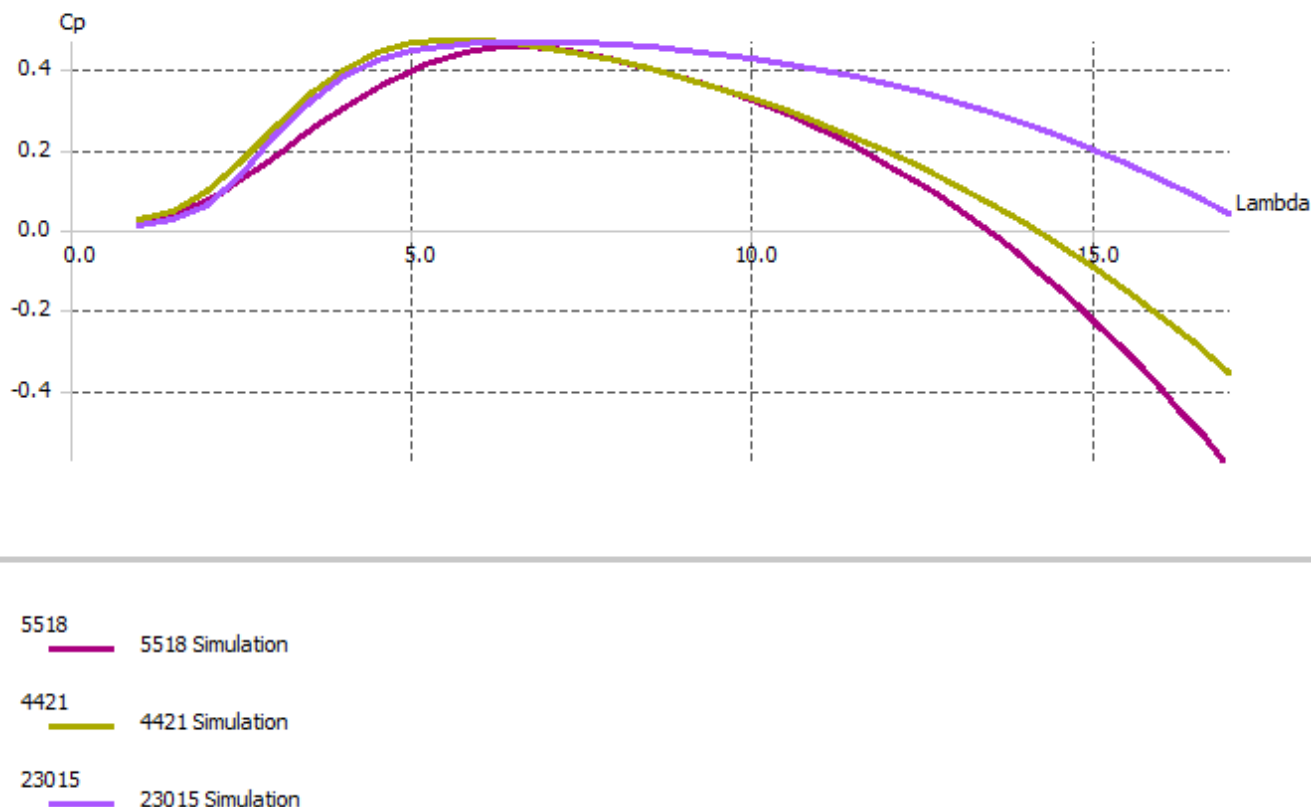
Suprojektavus dar dvi mentes *QBlade* programoje modeliuojamas rotorius. Modeliavimo metu pasirinktas mentės galo greičio santykio intervalas nuo 1 iki 17.

Parenkamos menčių elementų momentų teorijos skaičiavimo parametrų reikšmės:

- Mentės elementų skaičius: 50
- Maksimali konvergencijos epsilon: 0,0001
- Maksimalus iteracijų skaičius: 100
- Slopavimo koeficientas: 0,2
- Tankis: 1,2
- Klampumas: 0,00001780

Kiekvienas taškas C_p kreivėje apibūdina MEM skaičiavimus priklausomai nuo vienos mentės galo greičio reikšmės. Grafike pateiktos galios koeficiento kreivės modeliuojant rotorių su skirtingo profilio

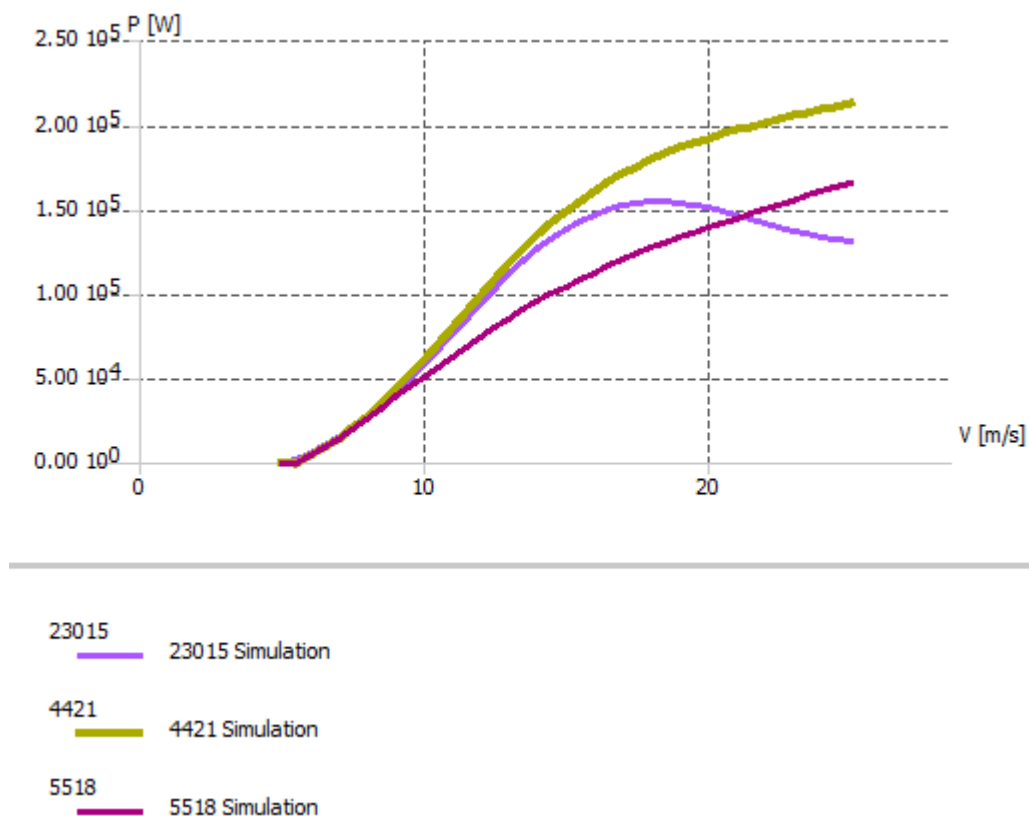
mentėmis. Naudojant šiuos tris NACA profilius, galios koeficiento reikšmės labai panašios, tik menčių su NACA 4421 ir NACA 23015 profiliiais galios koeficiento reikšmė didesnė prie mažesnio mentės galo greičio.



37 pav. Galios koeficiento priklausomybė nuo mentės galo greičio

Taikant menčių elementų momentų teoriją *QBlade* programa apskaičiuojamas jėgainės galingumas. Parenkami jėgainės parametrai:

- Reguliavimas: srauto atitrūkimo (fiksuoto žingsnio)
- Perdavimas: vienos pakopos
- Įjungimo vėjo greitis: 5 m/s
- Išjungimo vėjo greitis: 25 m/s
- Rotoriaus spindulys: 9437 mm
- Kintami nuostoliai: 0,08
- Pastovūs nuostoliai: 10kW
- Apsisukimų skaičius: 50 aps/min.



38 pav. Jėgainės galios priklausomybė nuo vėjo greičio su skirtingo profilio mentėmis

Iš grafiko matome, kad jėgainės galia priklauso nuo mentės profilio, nekeičiant kitų geometrinių parametrų, tik mentės profilį galia gali pasikeisti apie 40% (kai vėjo greitis 25m/s).

4.4 Jėgainės charakteristikos keičiant mentės geometrinius parametrus

Atliktas tyrimas, kaip pasikeis jėgainės sukuriama galia padidinus mentės geometrinius parametrus. Mentės profilis NACA 5518, susukimo kampas kiekviename pjūvyje toks pat kai ir anksčiau nagrinėtoje mentėje, 10% ir 20% padidintas mentės ilgis (proporcingai kiekviename skerspjūvyje) taip pat ir stygos ilgis.

	Pos (mm)	Chord (mm)	Offset (mm)	Twist	Foil	Polar
1	981,2	833,8	0	22,26	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
2	1298	882,2	0	14,51	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
3	1945,9	976,8	0	11,1	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
4	2594,9	1058,2	0	9,66	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
5	3243,9	1113,2	0	7,92	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
6	3892,9	1144	0	6,47	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
7	4541,9	1130,8	0	5,45	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
8	5189,8	1051,6	0	4,69	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
9	5838,8	970,2	0	4,12	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
10	6487,8	889,9	0	3,66	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
11	7136,8	825	0	3,3	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
12	7784,7	750,2	0	3	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
13	8433,7	680,9	0	2,75	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
14	9082,7	588,5	0	2,538	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
15	9731,7	503,8	0	2,35	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
16	10380,7	366,3	0	2,19	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar

39 pav. Mentės geometriniai parametrai padidinus juos 10%

	Pos (mm)	Chord (mm)	Offset (mm)	Twist	Foil	Polar
1	1070,4	909,6	0	22,26	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
2	1416	962,4	0	14,51	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
3	2122,8	1065,6	0	11,1	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
4	2830,8	1154,4	0	9,66	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
5	3538,8	1214,4	0	7,92	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
6	4246,8	1248	0	6,47	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
7	4958,8	1233,6	0	5,45	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
8	5661,6	1147,2	0	4,69	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
9	6369,6	1058,4	0	4,12	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
10	7077,6	970,8	0	3,66	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
11	7785,6	900	0	3,3	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
12	8492,4	818,4	0	3	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
13	9200,4	742,8	0	2,75	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
14	9908,4	642	0	2,538	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
15	10616,4	549,6	0	2,35	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar
16	11324,4	399,6	0	2,19	NACA 5518	NACA 5518 360° Polar

40 pav. Mentės geometriniai parametrai padidinus juos 20%

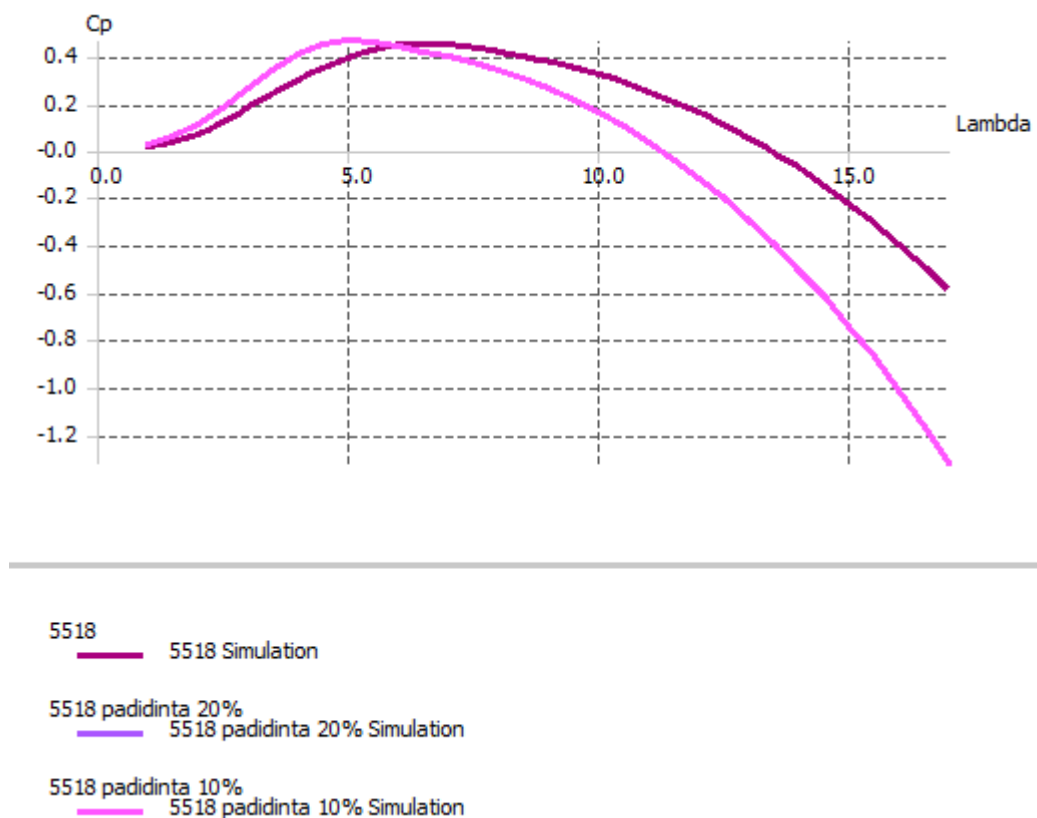
Padidinus mentės geometrinius parametrus *QBlade* programoje modeliuojamas rotorius. Modeliavimo metu pasirinktas mentės galo greičio santykio intervalas nuo 1 iki 17.

Parenkamos menčių elementų momentų teorijos skaičiavimo parametrų reikšmės:

- Mentės elementų skaičius: 50
- Maksimali konvergencijos epsilon: 0,0001
- Maksimalus iteracijų skaičius: 100
- Slopavimo koeficientas: 0,2
- Tankis: 1,2
- Klampumas: 0,00001780

Grafike pateiktos galios koeficiento kreivės modeliuojant rotorių su jau nagrinėta mente, kurios profilis NACA 5518 ir kitomis mentėmis, kai padidinti šios mentės parametrai. Naujai suprojektuotų

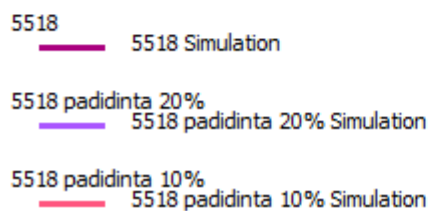
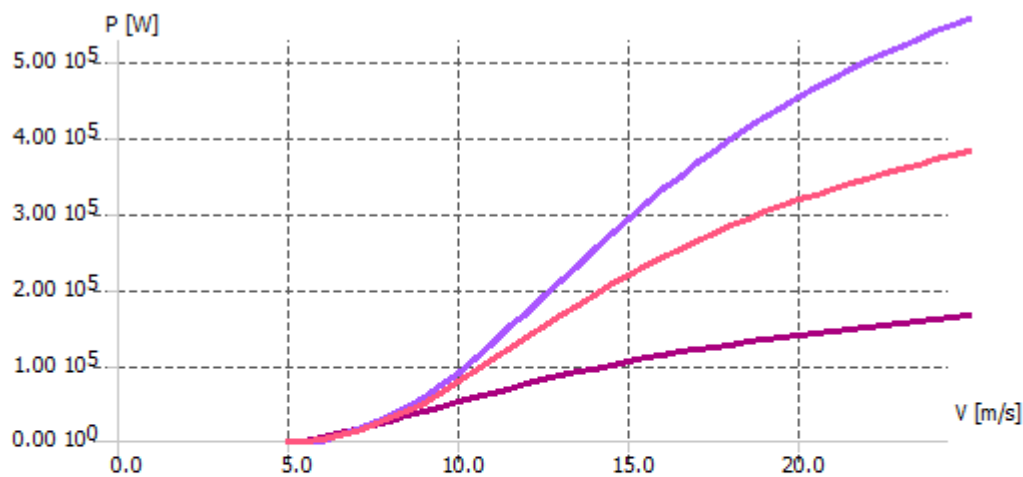
padidintų menčių galios koeficiento reikšmės didesnės prie mažesnio mentės galo apsisukimų skaičiaus, nei mentės 5518. Padidinus mentės geometrinius parametrus 10% ir 20% jų galios koeficiento priklausomybė nuo mentės galo greičio lieka tokia pati.



41 pav. Galios koeficiento priklausomybė nuo mentės galo greičio lyginant skirtingas mentes

Taikant menčių elementų momentų teoriją *QBlade* programa apskaičiuojamas jėgainės galingumas naudojant naujai suprojektuotas mentes. Parenkami jėgainės parametrai:

- Reguliavimas: srauto atitrūkimo (fiksuoto žingsnio)
- Perdavimas: vienos pakopos
- Įjungimo vėjo greitis: 5 m/s
- Išjungimo vėjo greitis: 25 m/s
- Rotoriaus spindulys: 10380 mm ir 11324 mm
- Kintami nuostoliai: 0,08
- Pastovūs nuostoliai: 10kW
- Apsisukimų skaičius: 50 aps/min.



42 pav. Jėgainės galios priklausomybė nuo vėjo greičio keičiant mentės geometrinius parametrus

Jėgainės galia labiausiai priklauso nuo mentės geometrinių parametrų. Padidinus mentės ilgį ir stygą kiekviename pjūvyje vos 10% matome žymų galios didėjimą lyginant su 5518 mentės sukuriama galia. Kai vėjo greitis 15 m/s, apsisukimų skaičius 50 aps/min, jėgainė, kurios geometriniai parametrai padidinti 10 % sukuria dvigubai didesnę galią: jėgainės 5518 galia 104 kW, o padidinus šios jėgainės mentės geometriją galia siekia 214 kW. Padidinus mentę 20% galia siekia 293 kW.

Suprojektuotos jėgainės sukuriamos galios priklausomybė nuo vėjo greičio keičiant skirtingus parametrus pateikta lentelėje 6.

5 lentelė. Galios priklausomybė nuo vėjo greičio keičiant apsisukimų skaičių ir geometrinius parametrus

V (m/s)	P (kW) 20aps/min (NACA 5518)	P (kW) 30aps/min (NACA 5518)	P (kW) 40aps/min (NACA 5518)	P (kW) NACA 5518 (50aps/min)	P (kW) NACA 23015 (50aps/min)	P (kW) NACA 4421 (50aps/min)	P (kW) NACA5518 padidinta 10%	P (kW) NACA5518 padidinta 20%
6	0.48	5.54	3.95	3.73	5.23	3.68	0.38	0.00
7	2.54	12.82	14.35	13.87	14.62	13.83	12.81	13.42
8	4.14	19.57	26.85	25.70	26.72	27.12	29.13	32.91
9	5.48	25.38	39.83	37.94	41.42	43.14	50.15	57.83
10	6.74	30.23	52.36	50.34	58.34	61.12	76.99	89.28
11	8.06	34.28	63.77	62.56	76.26	80.08	105.92	128.00
12	9.6	37.72	73.86	74.21	94.24	99.25	135.65	169.10
13	11.44	40.79	82.37	85.09	111.42	117.52	165.01	211.21
14	13.56	43.67	90.37	95.09	126.33	134.00	192.99	252.98
15	15.93	46.52	97.11	104.22	138.16	148.42	218.87	293.11
16	18.50	49.45	103.13	112.51	146.77	160.72	242.74	330.75
17	21.28	52.61	108.65	120.00	152.11	170.97	264.33	365.63
18	24.26	56.61	113.85	126.83	154.27	179.27	283.91	397.60
19	27.42	60.18	118.91	133.11	153.52	186.11	301.60	426.30
20	30.75	64.66	123.97	138.97	150.74	191.86	317.59	453.52
21	34.26	69.53	129.13	144.51	146.42	196.78	322.25	477.82
22	37.93	74.77	134.55	149.83	141.74	201.08	345.85	500.18
23	41.77	80.33	140.40	155.10	137.40	205.06	358.57	520.17
24	45.76	86.20	146.83	160.32	133.88	208.68	370.75	539.82
25	49.91	92.37	153.87	165.61	131.13	212.14	382.49	557.87

IŠVADOS

1. Pateikti pagrindiniai etapai projektuojant vėjo jėgainę naudojant *QBlade* programą. Išanalizuotos profilių charakteristikos, parinktas tinkamiausias mentės profilis, sukurta mentės geometrija, sumodeliuota 360° profilio poliarė. Taikant mentės elementų momentų teoriją, apskaičiuota galios koeficiento priklausomybė nuo mentės galo greičio. Sumodeliuota vėjo jėgainė, įvertinamas vėjo greitis, jėgainę veikiantys faktoriai. Gauta galios kreivė priklausomai nuo vėjo greičio. Mentės, kurios profilis NACA 5518, keliamosios jėgos koeficientas $C_{Lmax} = 1.62$, suprojektuotos mentės ilgis 9437 mm, galios koeficientas $C_p = 0.45$, kai $\lambda = 6.4$, parinkus menčių skaičių 3 jėgainės galia kai vėjo greitis 15 m/s siekia 104 kW.
2. Jėgainės galia didėja, kai didėja vėjo greitis, taip pat sukurama galia daug didesnė, kai mentės apsisukimų skaičius per minutę didėja. Kai vėjo greitis 15 m/s, o apsisukimų skaičius 25 aps/min jėgainės galia tik 28 kW, o kai apsisukimų skaičius 50 aps/min, galia išauga iki 153 kW. Tokia priklausomybė tinka esant dideliame vėjo greičiui (daugiau nei 10 m/s). Apsisukimų greitis labai priklauso nuo vėjo greičio nuo mentės ilgio. Kai vėjo greitis nedidelis, efektyviau dirba jėgainės, kurių apsisukimai mažesni.
3. Nustačius norimą jėgainės galingumą, šiuo atveju 220 kW, kai apsisukimų skaičius 70 aps/min, jėgainė pradedama stabdyti kai vėjo greitis 16 m/s, mentės žingsnio nustatymo kampas 4.8 laipsnių.
4. Jėgainės galia priklauso nuo mentės profilio, nekeičiant kitų geometrinių parametrų, tik mentės profilį galia gali pasikeisti apie 40% (kai vėjo greitis 25m/s).
5. Jėgainės galia labiausiai priklauso nuo mentės geometrinių parametrų. Padidinus mentės ilgį ir stygą kiekviename pjūvyje vos 10%, matomas žymus galios didėjimas lyginant su 5518 mentės sukurama galia. Kai vėjo greitis 15 m/s, apsisukimų skaičius 50 aps/min, jėgainė, kurios geometriniai parametrai padidinti 10 % sukuria dvigubai didesnę galią: jėgainės 5518 galia 104 kW, o padidinus šios jėgainės mentės geometriją, galia siekia 214 kW. Padidinus mentę 20% galia siekia 293 kW.

MOKSLINĖS LITERATŪROS SĄRAŠAS

- Burton, T., Sharpe, D., Kenkins, N., Bossanyi, E. 2001 *Wind Energy Handbook*. 200–208.
- Gulbinas, A. 2009. *Vėjaračiai nedidelės galios vertikalios ašies vėjo jėgainiai*. Vilnius: Energetika, 214–219.
- Gulbinas, A. 2007. *Vėjo jėgainių galios reguliavimas*. Žemės ūkio inžinerija: LŽŪII ir LŽŪU mokslo darbai 39(3): 81–94.
- Jureczko, M.; Pawlak, M.; Mezyk, A. 2005. Optimisation of wind turbine blades, *Journal of Materials Processing Technology* 167: 463–471.
- Kulunk, E.; Yilmaz, N. 2009. Computer-aided design and performance analysis of HAWT blades, in *5th Internacional Advanced Technologies Symposium (IATS-09)*, May 13–15, 2009, Karabuk, Turkey.
- Maheri, A., Noroozi, S., Toomer, C. A. and Vinney, J., 2006. Damping the Fluctuating Behaviour and Improving the Convergence Rate of the Axial Induction Factor in the BEMT-Based Rotor Aerodynamic Codes. In: *Proceedings of the European Wind Energy Conference (EWEC2006)*, 27 February- 2 March 2006, Athens, Greece.
- Markevičius, A.; Katinas, V. 2003. *Vėjo energetikos plėtros tendencijos*. Vilnius: Energetika, 22–27.
- Martin, O. L., Hansen, 2008. *Aerodinamics of Wind Turbines*. 7–18.
- Roskam, J. 1997. *Airplane Aerodinamics and Performance*. 51–94.
- Saeed, F. 2008. Inverse Airfoil Design Method for Low-Speed Straight-Blade Darrieus- Type VAWT Applications. Iš: *Septintosios Pasaulinės Vėjo Energijos Konferencijos* [7th World Wind Energy Conference], įvykusios Kingston, Ontario, Kanada 2008 birželio 24–26 d.
- Petrauskas, G., 2001. *Modernių vėjo jėgainių savybės ir plėtojimo galimybės*. Vilnius: Energetika, 74–78.
- Tangler, J. L., Somers, D. M. 1995. NREL airfoil families for HAWTs. Iš: *95-osios Vėjo Galios Konferencijos* [Windpower95 conference], įvykusios Washington.
- Thumthae, C., Chitsomboon, T. 2006. Optimal Pitch for Untwisted Blade Horizontal Axis Wind Turbine. In: *SEE (Sustainable Energy and Environment) 2006, The 2nd Joint International Conference*. Bangkok, Thailand. 21-23 November 2006.

PRIEDAI

1 priedas. NACA 5518 profilio charakteristikos

alfa	Cl	Cd
5.000	1.1249	0.00893
6.000	1.2153	0.00981
7.000	1.2998	0.01099
8.000	1.3759	0.01258
9.000	1.4489	0.01444
10.000	1.5114	0.01696
11.000	1.5617	0.02034
12.000	1.6049	0.02454
13.000	1.6368	0.02993
14.000	1.6654	0.03616
15.000	1.6787	0.04418
16.000	1.6909	0.05300
17.000	1.6918	0.06347
18.000	1.6939	0.07434
19.000	1.6861	0.08685
20.000	1.6604	0.10179
21.000	1.6529	0.11487
22.000	1.6283	0.13051
23.000	1.6053	0.14611
24.000	1.5987	0.15969
25.000	1.5774	0.17610

2 priedas. Rotoriaus modeliavimas.

lmda	Cp
1.00000e+00	2.26420e-02
1.60000e+00	4.67544e-02
2.20000e+00	9.27306e-02
2.80000e+00	1.58495e-01
3.40000e+00	2.32171e-01
4.00000e+00	3.02777e-01
4.60000e+00	3.62803e-01
5.20000e+00	4.08826e-01
5.80000e+00	4.39948e-01
6.40000e+00	4.55054e-01
7.00000e+00	4.51808e-01
7.60000e+00	4.34120e-01
8.20000e+00	4.12969e-01
8.80000e+00	3.87958e-01
9.40000e+00	3.58560e-01
1.00000e+01	3.24169e-01
1.06000e+01	2.82848e-01
1.12000e+01	2.35411e-01
1.18000e+01	1.81754e-01
1.24000e+01	1.21604e-01
1.30000e+01	5.47062e-02
1.36000e+01	-1.92673e-02
1.42000e+01	-1.00610e-01
1.48000e+01	-1.89654e-01
1.54000e+01	-2.86661e-01
1.60000e+01	-3.91970e-01
1.66000e+01	-5.05865e-01
1.69000e+01	-5.66121e-01