

**ŠIAULIŲ UNIVERSITETO
GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETO
FIZIKOS KATEDRA**

Diana Adomaitytė

**VĖJO PARAMETRŲ IR PROGNOZUOJAMOS VĖJO ELEKTRINIŲ
GALIOS ĮVERTINIMAS PAJŪRIO IR TAURAGĖS REGIONAMS**

Fizikos studijų programos

MAGISTRO DARBAS

**Mokslinis vadovas
doc. dr. Valdas GIRDAUSKAS**

**Šiauliai,
2010**

ANOTACIJA

Darbas susideda iš dviejų dalių teorinės bei praktinės. Darbo tikslas – Įvertinti vėjo parametrus ir prognozuojamą vėjo elektrinių galią pajūrio ir Tauragės regionams.

Teorinėje dalyje aprašoma vėjo energetikos pasiekimai ir perspektyvos Lietuvoje, aptariami vėjo srautų kitimo atmosferos pasienio sluoksnyje dėsniumai, vėjo prognozavimo metodai, vėjo jėgainių konstrukcija ir veikimo principas. Praktinėje dalyje pateikiama vėjo matavimo duomenų statistinė analizė, bei įvertinamas prognozuojamas metinis vėjo jėgainių pagamintos energijos kiekis.

ANNOTATION

The work consists of two parts: theoretical and practical. The aim of the work is to evaluate the parameters of the wind and prognosticated the power of wind- power- stations for near- shore zones and regions of Tauragė.

In the theoretical part the achievements and perspectives of wind energetics in Lithuania are described, the regularity of wind flow changes in atmosphere terminal are discussed, the methods of wind prognostication, the construction and working principle of wind- power- stations. In the practical part the statistical analysis of wind measures is shown and the prognosticated amount of energy produced by wind- power- stations per year is evaluated.

TURINYS

IVADAS	7
1. VĖJO SRAUTŲ KITIMO ATMOSFEROS PASIENIO SLUOKSNYJE	
DĒSNINGUMAI	8
1.1. Vėjo susidarymas ir globali cirkuliacija.....	8
1.2. Vėjo greičio ir krypties pasiskirstymas.....	9
1.3. Reljefo ir topografijos įtaka vėjo charakteristikoms.....	10
1.4. Vėjo greičio prognozavimo modeliai.....	13
2. VĖJO JĖGAINĖ	16
2.1. Vėjo energetikos pasiekimai ir perspektyvos Lietuvoje.....	16
2.2. Vėjo jėgainių tipai.....	18
2.3. Vėjo jėgainės konstrukcija.....	21
2.4. Rotoriaus aerodinamika.....	23
3. REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ	26
3.1. Rezultatų gavimo metodika.....	26
3.2. Matavimo prie Vilkyčių duomenų statistinė analizė.....	27
3.3. Matavimo prie Kretingos duomenų statistinė analizė.....	31
3.4. Matavimo prie Tauragės duomenų statistinė analizė.....	33
3.5. Vėjo parametrų prie Vilkyčių, Kretingos ir Tauragės palyginimas.....	36
3.6. Vėjo elektrinių vidutinės metinės energijos gamybos įvertinimas.....	38
IŠVADOS	42
LITERATŪRA	43
PRIEDAI	45

PAVEIKSLĖLIŲ SĄRAŠAS

1 pav. vėjo srautas apie kliūtį jo kelyje, vertikalus pjūvis [1].....	10
2 pav. vėjo greičio kitimo kreivė artėjant prie Žemės paviršiaus [1].....	11
3 pav. Vėjo greitis padidėja kalvos viršūnėje [1].....	12
4 pav. Vėjo greičio profilio pokyčiai kalvos viršūnėje [1].....	13
5 pav. Prognozės modelių tipai [5].....	14
6 pav. VE galios prognozės fizikinio modelio schema [5].....	15
7 pav. Energijos gamybos apimtys iš atsinaujinančių energijos šaltinių 2006 m. [9].....	17
8 pav. vertikalios ir horizontalios ašies jėgainių principinė schema [13].....	19
9 pav. horizontalios ašies vėjo jėgainės [16].....	19
10 pav. horizontalios ašies vėjo jėgainės menčių orientacija pagal vėjo kryptį [15].....	20
11 pav. Vertikalios ašies vėjo jėgainės [16].....	20
12 pav. Vertikalios ašies vėjo jėgainės menčių orientacija pagal vėjo kryptį [15].....	20
13 pav. Vėjo jėgainės pagrindiniai išoriniai elementai [1].....	21
14 pav. Vėjo jėgainės schema [17].....	22
15 pav. Skirtingo slėgio zonos aerodinamiame profilyje [18].....	23
16 pav. Aerodinaminį profilį veikiančios jėgos [18].....	24
17 pav. vėjo jėgainių pagrindinės techninės charakteristikos [18].....	24
18 pav. Mentės jėgų schema [19].....	25
19 pav. Aerodinaminės mentės susukimo paaiškinimas [19].....	25
20 pav. Vilkyčių vidutinio vėjo greičio 43 m. aukštyje histograma ir ją aproksimuojanti Weibull'o skirstinio funkcija.....	27
21 pav. Vilkyčių vidutinio vėjo greičio 21,5 m. aukštyje histograma ir ją aproksimuojanti Weibull'o skirstinio funkcija.....	28
22 pav. Vėjo krypties kitimas, prie Vilkyčių, pavaizduotas vėjų rože.....	28
23 pav. Kretingos vidutinio vėjo greičio 15 m. aukštyje histograma ir ją aproksimuojanti Weibull'o skirstinio funkcija.....	31
24 pav. Kretingos vidutinio vėjo greičio 27,5 m. aukštyje histograma ir ją aproksimuojanti Weibull'o skirstinio funkcija.....	31
25 pav. Vėjo krypties kitimas, prie Kretingos, pavaizduotas vėjų rože.....	32
26 pav. Tauragės vidutinio vėjo greičio 15 m. aukštyje histograma ir ją aproksimuojanti Weibull'o skirstinio funkcija.....	34
27 pav. Tauragės vidutinio vėjo greičio 28 m. aukštyje histograma ir ją aproksimuojanti Weibull'o skirstinio funkcija.....	34

28 pav. Vėjo krypties kitimas, prie Tauragės, pavaizduotas vėjų rože.....	35
29 pav. Paros vėjo greičio dinamika (matavimo prie Tauragės duomenys, aukštis 43 m).....	37
30 pav. Vidutinio vėjo greičio, išmatuoto prie Vilkyčių, Kretingos ir Tauragės, priklausomybė nuo aukščio.....	37
31 pav. Vėjo elektrinių E – 40 ir E -48 galios kreivės [5].....	39
32 pav. Vėjo jėgainės, prie Tauragės, VE – 40 galios kreivė.....	40
33 pav. prognozuojamos vidutinės galios priklausomybė nuo aukščio.....	41

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Elektros energijos gamyba prognozuota iki 2010 m., naudojant AEŠ ir atliekinės energijos šaltinius [10].....	17
2 lentelė. Prognozuotas VE galios prieaugis ir elektros energijos gamyba Lietuvoje [2].....	18
3 lentelė. Apskaičiuoti sezoniniai bei metiniai Weibull'o funkcijos parametrai A ir k , remiantis šiais parametrais apskaičiuotas vidutinis greitis u	29
4 lentelė. Vilkyčių regioninio vėjingumo lentelė.....	30
5 lentelė. Apskaičiuoti sezoniniai bei metiniai Weibull'o funkcijos parametrai A ir k , remiantis šiais parametrais apskaičiuotas vidutinis greitis u	32
6 lentelė. Vilkyčių regioninio vėjingumo lentelė.....	33
7 lentelė. Apskaičiuoti sezoniniai bei metiniai Weibull'o funkcijos parametrai A ir k , remiantis šiais parametrais apskaičiuotas vidutinis greitis u	35
8 lentelė. Tauragės regioninio vėjingumo lentelė.....	36
9 lentelė. Polinomo koeficientai.....	39
10 lentelė. Prognozuojamas vėjo jėgainių VE – 40 ir VE – 48 metinis energijos kiekis skirtinguose aukščiuose.....	40

SANTRUMPOS

VE – vėjo elektrinė;

SOP – skaitmeninė orų prognozė;

HE – hidroelektrinė;

AEŠ – atsinaujinantys energijos šaltiniai;

LEI AEŠ – Lietuvos energetikos instituto Atsinaujinančių energijos šaltinių laboratorija;

ES – Europos sąjunga;

LR – Lietuvos respublika;

Š – šiaurė;

P- pietūs;

R- rytai;

V- vakarai

Ivadas

Tema: Vėjo parametrų ir prognozuojamos vėjo elektrinių galios įvertinimas pajūrio ir Tauragės regionams.

Aktualumas: Lietuvai įstojus į Europos sąjungą, išsipareigota didinti elektros energijos gamybą iš atsinaujinančių energijos šaltinių. Nemažą dalį Lietuvoje iš atsinaujinančių energijos šaltinių gaunamos elektros turės pagaminti vėjo jėgainės. Norint, kad vėjo jėgainės pagamintų maksimaliai elektros energijos, reikia parinkti tinkamas vietas joms statyti. Kadangi vėjo energija skirtingose vietovėse yra nevienoda, tai būtina prognozuoti tose vietovėse pagaminamos energijos kiekį, kad būtų galima įvertinti ar palankios sąlygos statyti vėjo jėgaines šiose vietovėse. Norint prognozuoti vėjo jėgainių pagaminamos energijos kiekį, reikia mokėti įvertinti vėjo parametrus: vidutinį vėjo greitį skirtingiems aukščiams, ir vyraujančią kryptį.

Hipotezė: darbo rengimo metu, atlikus vėjo parametrų analizę bus galima įvertinti ir prognozuoti vėjo elektrinių metinį energijos išdirbį, tirtose vietovėse (prie Kretingos, Vilkyčių ir Tauragės).

Tikslas: Įvertinti vėjo parametrus ir prognozuojamą vėjo elektrinių galią pajūrio ir Tauragės regionams.

Uždaviniai:

- Susipažinti su vėjo energetikos pasiekimais ir perspektyvomis Lietuvoje;
- Apžvelgti vėjo srautų žemės pasienio sluoksnyje ypatumus;
- Susipažinti su vėjo srautų parametrų ir vėjo energijos išteklių skaičiavimo metodais;
- Atlikti vėjo parametrų statistinę analizę ir prognozuoti vėjo elektrinių pagamintą metinį energijos kiekį.

Tyrimo metodai: statistinė vidutinio vėjo greičio analizė, kompiuterinis modeliavimas.

Laukiami rezultatai: atlikus vėjo parametrų statistinę analizę, bus galima įvertinti vietovių palankumo sąlygas vėjo elektrinių statybai, bei prognozuoti vėjo jėgainių metinį pagamintos energijos kiekį.

1. VĖJO SRATŲ KITIMO ATMOSFEROS PASIENIO SLUOKSNYJE DĒSNINGUMAI

1.1. Vėjo susidarymas ir globali cirkuliacija

Vėjas – tai horizontalus atmosferos oro masių judėjimas, sąlygotas Saulės energijos, išspinduliuotos į Žemės paviršių, ir Žemės rutulio sukimosi jėgų [1].

Oro masių judėjimas atsiranda dėl nevienodo Žemės ir vandenų paviršiaus, o kartu ir dėl paviršinio oro išilimo veikiant Saulės spinduliams, nes skirtinguose regionuose Saulės spinduliavimo intensyvumas skirtingas. Dėl to Saulės spinduliavimo energija nevienodai pasiskirsto Žemės paviršiuje, sudarydama sąlygas susikurti atmosferoje slėgio gradientams.

Vėjų yra įvairių formų:

Globalinius vėjas susideda iš Hadley'aus cirkuliacijos celės, Ferrel'o cirkuliacijos celės ir Poliarinė cirkuliacijos celės [1].

Hadley'aus cirkuliacijos cele vadinama uždaru ciklu judanti oro masių sistema. Ši celė juosia visą Žemės rutulį. Apatinėje Hadley'aus celės dalyje judančios oro masės vadinamos šiaurės rytų pasatiniu vėju šiauriniame pusrutulyje ir pietryčių pasatu pietiniame pusrutulyje.

Kita labai svarbi globalinių vėjų dalis yra Poliarinė cirkuliacijos celė. Ji susiformavusi geografinėje platumoje tarp 60° ir 90° lygiagrečių. Šioje juostoje antžeminis vėjas pučia iš šiaurės rytų ir vadinamas poliariniu rytiniu.

Ferrel'o cirkuliacijos celės užima tarpinę vietą tarp pirmųjų dviejų, t.y. geografinę platumą tarp 30° ir 60° lygiagrečių. Jos antžeminis oro masių judėjimas vadinamas vakarių vėjų juosta. Ši vėjų juosta, skirtingai negu dvi pirmosios, nėra tokia patvari. Ją stipriai veikia vietinės geografinės ir klimatinės sąlygos ir dažnai nulemia vėjų kryptį ir stiprumą.

Prie specifinių vėjų grupės priskiriami jūrų ir žemynų brizai dar vadinami *pakrančių vėjais*. Šie vėjai atsiranda dėl to, kad dieną Saulė įkaitina žemyno paviršių labiau negu jūros vandenį. Įkaitęs oras kyla nuo žemės paviršiaus, sudarydamas žemo slėgio zoną, į kurią pradeda veržtis šaltesnis oras nuo jūros paviršiaus. Naktį žemės paviršius ataušta greičiau negu jūros paviršius ir virš jo susidaro aukštesnio slėgio zona, iš jos oras išstumiamas į jūrą.[1] Dėl šių terminių efektų, t.y. temperatūrų skirtumų virš jūros ir sausumos, pajūrio regionai yra dažniausiai vėjuoti.

Didelę įtaką vėjo srautų kitimui turi ir reljefo forma, pavyzdžiui vėjas virš kalvų ir kalnų viršūnių yra stipresnis nei papėdėse ar slėniuose.

Sinoptinius vėjus sąlygoja didelio masto šalto ir šilto oro frontai. Sinoptiniai vėjai lemia kasdieninę orų kaitą [1].

1.2. Vėjo greičio ir krypties pasiskirstymas

Vėjo energetikai svarbiausias atmosferos vėjo parametras yra vėjo greitis atmosferos pasienio sluoksnyje. Tai toks oro sluoksnis, kurio aukštis apytiksliai siekia iki 100 m giedromis naktimis ir iki 2 km saulėtą vasaros dieną. Apatinė atmosferos pasienio sluoksnio dalis vadinama pažemio sluoksniu. Šiame apie 100 m aukščio sluoksnyje vėjo greičio vertikalus pasiskirstymas aprašomas logaritminiu dėsnio[2]:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0}; \quad (1.1)$$

čia $u(z)$ – vėjo greitis aukštyje z virš žemės paviršiaus; u_* - trinties greitis, randamas iš paviršiaus trinties įtempimo formulės (1.2); κ – von Karmano konstanta, lygi 0,4 [3,4]; z_0 – žemės paviršiaus šiurkštumo ilgis.

$$|\tau| = \rho u_*^2; \quad (1.2)$$

Dažniausiai realiomis sąlygomis vėjo greičio profilis nukrypsta nuo logaritminio, nes vėjo greičio pasiskirstymas priklauso ne tik nuo paviršiaus šiurkštumo, bet ir plūdrumo jėgos. Įvedus stabilumo funkciją pagal Monino – Obuchovo teoriją, ši dėsnį galima taikyti tiek stabilioms tiek nestabilioms atmosferos sąlygoms[5]:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left[\frac{z}{z_0} - \Psi \left(\frac{z}{L} \right) \right] \quad (1.3)$$

čia Ψ – stabilumo funkcija; L – Monino – Obuchovo ilgio parametras.

Stabilumo funkcija teigiama nestabiliomis atmosferos sąlygomis ir neigiama – stabiliomis. Bendra jos forma [3]:

$$\Psi \left(\frac{z}{L} \right) = \left(1 - \gamma \frac{z}{L} \right)^\beta; \quad (1.4)$$

čia γ ir β – stabilumo funkcijos parametrai [3].

Atmosferos stabilumas priklauso nuo kelių veiksnių. Didžiausią įtaką atmosferos stabilumui turi jos terminiai procesai. Tuo tarpu atmosferos pasienio sluoksnio savybes lemia planetos paviršiaus šiurkštumas.

Kylant aukštyn žemės paviršiaus įtaka atmosferos judėjimui mažėja, nes jį sąlygoja tik dideli sinoptiniai slėgio gradientai ir Koriolio jėga.

Toks oro judėjimas, kurio neveikia žemės paviršius vadinamas geostrofiniu vėju [2]. Tai toks vėjas, kuris susidaro aukščiau kaip 1000 m aukštyje. Geostrofinio vėjo greitis artėjant prie žemės paviršiaus dėl trinties mažėja ir ties žemės paviršiumi sumažėja iki nulio. Skiriasi ir vėjo kryptis: Šiaurės pusrutulyje ji sukasi prieš laikrodžio rodyklę, o Pietų pusrutulyje pagal laikrodžio rodyklę. Dėl Koriolio jėgos, Šiaurės pusrutulyje geostrofinis vėjas, judantis link šiaurės, pakeičia ir ima judėti į rytus, o judantis link pusiaujo – į vakarus. Dėl to Šiaurės

pusrutulyje vėjas aplink žemo slėgio sritį cirkuliuoja prieš laikrodžio rodyklę, o aplink aukšto slėgio sritį - pagal laikrodžio rodyklę. Pietų pusrutulyje atvirkščiai.

Priklausomybė tarp geostrofinio vėjo ir trinties greičio išreikiama [6]:

$$G = \frac{u_*}{\kappa} \sqrt{\left(\ln \frac{u_*}{f z_0} - A\right)^2 + B^2}; \quad (1.5)$$

čia G – geostrofinis vėjas; f – Koriolio parametras, A ir B – empirinės nedimensinės atmosferos stabilumo funkcijos.

Skirtumas tarp geostrofinio vėjo ir vėjo virš žemės paviršiaus krypčių:

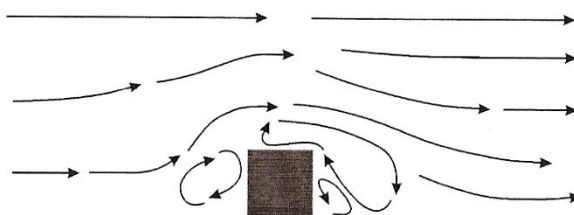
$$\sin \alpha = \frac{-B}{\sqrt{\left(\ln \frac{u_*}{f z_0}\right)^2 + B^2}}; \quad (1.6)$$

Taip įvertinamas vėjo krypties pokytis tarp dviejų aukščių, nes vėjo kryptis atmosferos pasienio sluoksnio viršuje ir prie žemės skiriasi apie 25° [5].

1.3. Reljefo ir topografijos įtaka vėjo charakteristikoms

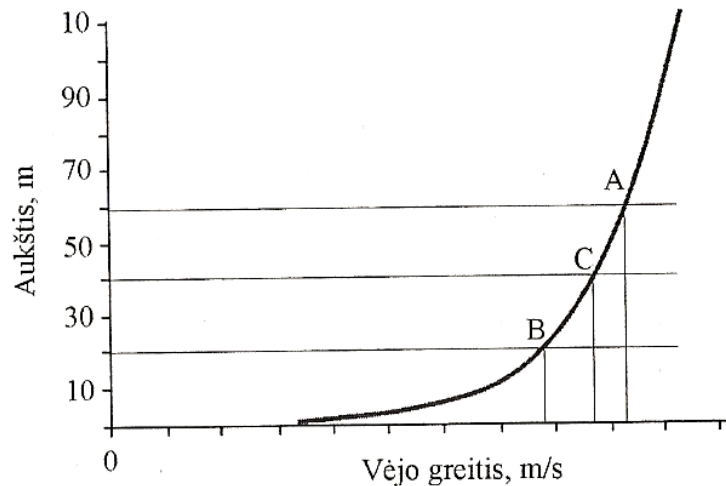
Kliūčių įtaka

Vėjo greičiui iš esmės gali turėti įtakos jo kelyje sutiktos kliūtys – pastatai, medžiai, kalvos ir pan. Kliūčių pavėjinėje pusėje susidaro sūkuriai, kuriuose dinamiškai kinta vėjo greitis ir jo kryptis (1 pav.). Vėjo greičio pakitimo laipsnis pavėjinėje ir priešvėjinėje pusėje priklauso nuo kliūties atvirumo laipsnio, kuris apibūdinamas kaip kliūties atviro ploto ir kliūties viso ploto santykis.



1 pav. vėjo srautas apie kliūtį jo kelyje, vertikalus pjūvis. [1]

Kylant aukštyrą virš žemės paviršiaus, kliūčių vėjo kelyje mažėja, dėl to jau kelių šimtų metrų aukštyje vėjas skrieja niekieno netrukdomas. Vėjo greičio kitimo kreivė artėjant prie žemės paviršiaus pavaizduota (2 pav.) [1]:



2 pav. vėjo greičio kitimo kreivė artėjant prie Žemės paviršiaus.[1]

Norint nustatyti vėjo greičio didėjimą kylant aukštyn reikia žinoti vėjo greitį pasirinktame aukštyje h_1 , ir vėjo greitį aukštyje h_2 bus galima apskaičiuoti pasitelkus logaritminę išraišką [7]:

$$V_2 = V_1 \frac{\ln\left(\frac{h_2}{h_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{h_0}\right)}; \quad (1.7)$$

čia V_1 – aukštyje h_1 išmatuotas vėjo greitis; V_2 – aukštyje h_2 skaičiuojamas vėjo greitis; h_0 – vietovės šiurkštumo parametras; $h_0 = 0,1 \cdot h_n$, čia h_n – šiurkštumo elemento aukštis; h_1 – matuojamas vėjo greitis meteorologinėse stotyse; h_2 – skaičiuojamas vėjo greitis pasirinktame aukštyje.

Paviršiaus šiurkštumas

Teritorijoje esančių kliūčių (augalija, pastatai) ir žemės paviršiaus poveikis, stabdantis vėjo srautą prie žemės paviršiaus, vertinamas kaip šiurkštumo poveikis. Teritorijos paviršiaus šiurkštumas nusakomas šiurkštumo ilgiu z_0 ir nustatomas pagal šiurkštumo elementų dydį ir pasiskirstymą [5].

Pagal vietovės paviršiaus šiurkštumo aukštį nustatoma vietovės paviršiaus šiurkštumo klasė [1]:

- 0 klasė – vandens (jūros, ežero) paviršius;
- 1 klasė – atviras kraštovaizdis;
- 2 klasė – dirbamoji žemė su mažomis apsauginėmis medžių juostomis ir sodybomis;
- 3 klasė – žemdirbystės regionas su apsauginėmis juostomis, giraitėmis ir kaimais.

Tarp šiurkštumo elementų ir šiurkštumo ilgio yra ryšys [5]:

$$z_0 = 0,5 \cdot \frac{h \cdot S}{A_H}; \quad (1.8)$$

čia z_0 – žemės paviršiaus šiurkštumo ilgis, h – šiurkštumo elemento aukštis, S – į vėją atsukto šoninio paviršiaus plotas. Šiurkštumo elementų pasiskirstymas nusakomas vidutiniu horizontaliu plotu A_H , tenkančiu kiekvienam elementui.

Jei A_H yra panašaus dydžio kaip S , tuomet z_0 yra povertinamas, nes elementai yra arti vienas kito, ir srautas „pakyla“ virš jų. Tuomet tik dalis S ir h nusako paviršiaus šiurkštumą. Dėl srauto pakilimo h aukštis virš žemės paviršiaus turi būti pradedamas matuoti tarp šiurkštumo elementų viršaus ir pusės jų aukščio. Šis aukštis turi būti įvertinamas tais atvejais, kai tiriamoje vietovėje yra aukšta augalija, miškas arba miestas [5].

Šiurkštumo ilgis toje pačioje vietovėje įvairiais metų laikais, gali keistis, pavyzdžiui medžiams metant lapus, dirvai pasidengiant sniego danga ir pan.

Reljefo įtaka

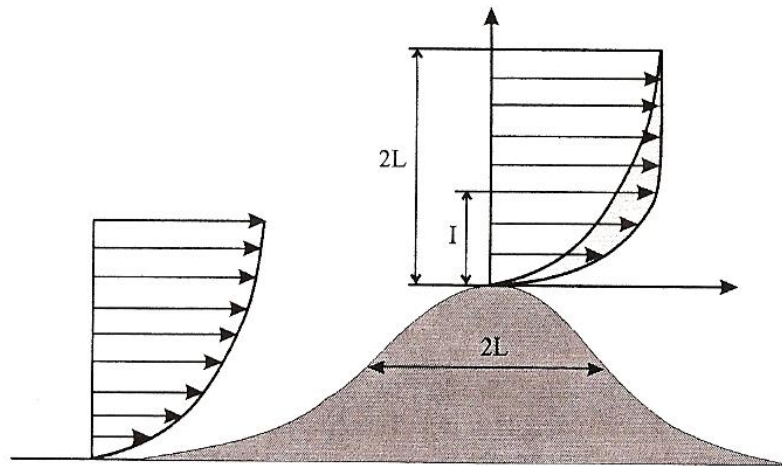
Reljefo elementai - kalvos, skardžiai, slėniai ir kt. – taip pat turi įtakos vėjo srautams.

Kalvos efektas. Nustatyta, kad vėjo greitis kalvos viršūnėje padidėja iki 80 %, o kalvos papėdėje sumažėja 20 – 40 %, palyginti su nepaveiktu pradiniu vėjo greičiu. Taip atsitinka dėl to, kad susiaurėjus judančio oro srauto skerspūviui, jo greitis turi padidėti tiek, kad per tą patį laiką per mažesnę skerspūvį galėtų pereiti toks pats oro masės kiekis. Judančio oro srauto skerspūvio padidėjimas veikia atvirkščiai – srauto greitį sumažina. Kai vėjo srautas susiduria su kalva, jo skerspūvis atitinkamai sumažėja, ir kalvos viršūnėje vėjo greitis visuomet būna didesnis negu lygumoje, tai vadinamasis kalvos efektas (3 pav.). Kalvos pavėjinėje pusėje susidaro sukurių, ir vėjo greitis sumažėja [1].



3 pav. Vėjo greitis padidėja kalvos viršūnėje. [1]

Maksimaliai vėjo greitis padidėja aukštyje L , o aukštyje $2L$ kalvos efektas jau nebepastebimas (4 pav.). Parametras L vadinamas kalvos ilgio charakteristika, kuris parodo kalvos ilgį ties jos aukščio vidurine reikšme [1].



4 pav. Vėjo greičio profilio pokyčiai kalvos viršūnėje [1]

Tunelio efektas. Tunelio efektą nesunku pastebėti vėjuotą dieną vaikščiojant tarp aukštų pastatų. Tarpuose tarp gretimų namų, esant atitinkamai vėjo kryptims, visuomet pastebimi stiprūs skersvėjai, kurių greitis didesnis, nei vėjo greitis atviroje vietoje. Tunelio efekto fizinę prigimtį galima paaiškinti analogišku reiškiniu kaip ir kalvos efektą.

Dėl šių efektų tiriamojoje vietovėje reljefas turi būti aprašomas kuo tiksliau, nes pavyzdžiui, 5 % reljefo pakilimas gali pakeisti vidutinę vėjo greičio reikšmę vėjo jėgainės vėjaračio aukštyje 5 %, ir vėjo energija gali padidėti 15 % [1].

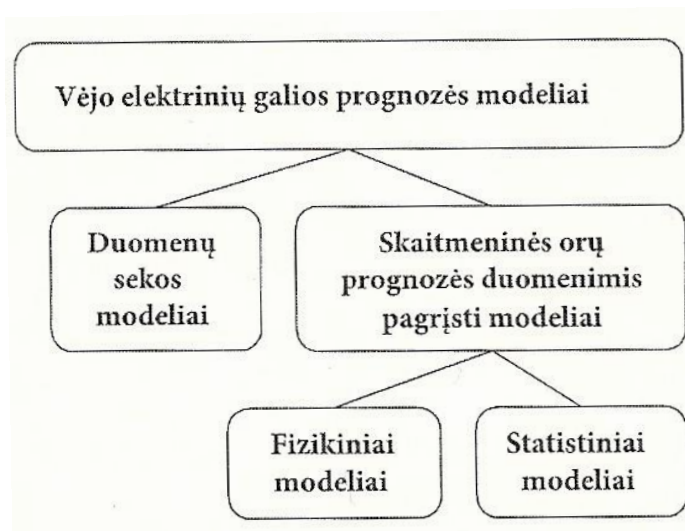
1.4. Vėjo greičio prognozavimo modeliai

Vėjo energetika, o tuo pačiu ir VE pagaminamas elektros energijos kiekis priklauso nuo meteorologinių sąlygų. Kintant meteorologinėms sąlygoms kinta ir VE galia. Norint numatyti VE galios kaitą reikalinga vėjo prognozė.

Šiuo metu visame pasaulyje naudojama dešimtys įvairių vėjo prognozės modelių, kurie padeda ne tik sėkmingiau planuoti VE darbą, bet ir balansuoti elektros sistemą.

VE galios prognozės modeliai pagal naudojamus pradinis duomenis skirstomi (pav. 5) [8]:

- Duomenų sekos modeliai, kuriuose naudojami tiesioginiai vėjo greičio arba VE galios matavimo duomenys, kuriuos analizuojant duomenų sekos analizės metodais sudaromos VE prognozės kelioms valandoms į priekį;
- Modeliai, naudojantys skaitmenines orų prognozės (SOP) rezultatus. Šie modeliai sudaro ilgesnio periodo (iki 48 val.) prognozes, ir yra pranašesni už duomenų sekos modelius.



5 pav. Prognozės modelių tipai [5]

1) Duomenų sekos modeliai.

Duomenų sekos modeliai yra paprasčiausi VE galios prognozės modeliai. Jiems užtenka pastarųjų kelių valandų vėjo greičio ar VE galios matavimo duomenų ir sudaro prognozes kelioms (4 - 6) artimiausioms valandoms.

Paprasčiausias duomenų sekos prognozės modelis – „išsilaikymo“ modelis. Pagal šį modelį prognozuojamo parametro (vėjo greičio arba VE galios) reikšmė yra lygi paskutinio matavimo reikšmei [5]:

$$X_{t+l} = X_t; \quad (1.9)$$

čia X_t – parametro reikšmė laiko momentu t ; l – laiko žingsnis (prognozės periodas).

Trumpiems periodams (kelioms minutėms ar valandoms) šis modelis gana tikslus, gaunama prognozės paklaida pakankamai maža, nes atmosferoje procesai vyksta lėtai. Ilgesniems periodams paklaida didėja, todėl kiti prognozavimo metodai, kaip fizikiniai ir daugelis statistinių modelių, yra pranašesni už išsilaikymo modelį, tačiau pagal išsilaikymo modelio rezultatus vertinami kitų vėjo prognozės modelių rezultatai [8].

Kituose ir daug sudėtingesniuose duomenų sekos modeliuose naudojamos duomenų sekos analizės metodikos (rekursiniai mažiausių kvadratų algoritmai, autoregresiniai metodai ir kt.), jomis surandami matavimo duomenų sekos svyravimo dėsniniai, pagal kuriuos duomenys ekstrapoliuojami kelioms valandoms į priekį.

2) SOP duomenimis pagrįsti modeliai

Fizikiniai modeliai

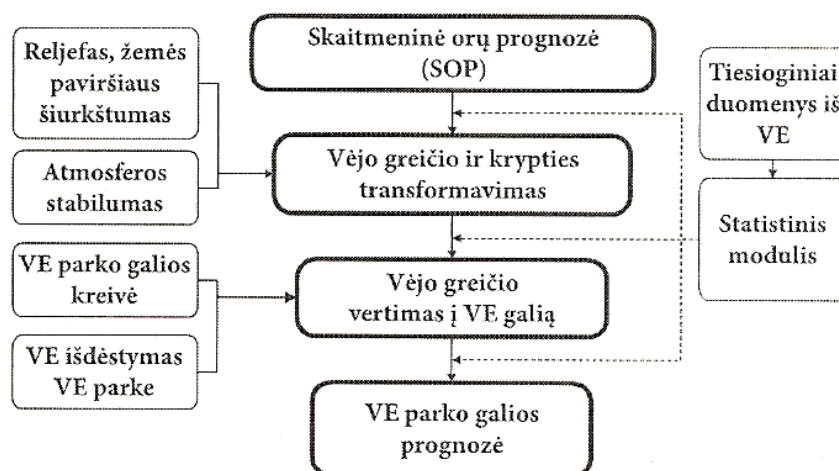
Norint prognozuoti vėjo greitį trumpam periodui (iki 3-5 val.) tam tikroje vietovėje, užtenka tos vietovės vėjo greičio ar VE galios matavimo duomenų statistinės analizės. Tačiau

dažniausiai reikia ilgesnio periodo vėjo prognozės, todėl dažniausiai tam tikslui naudojami fizikiniai modeliai [8].

Fizikiniuose vėjo prognozės modeliuose kaip pradiniai duomenys naudojami bendros atmosferos cirkuliacijos SOP modelių rezultatai. SOP – tai atmosferoje vykstančių procesų skaitmeninis modeliavimas siekiant aprašyti būsimą atmosferos būklę pagal pradinę būklę, kuri nustatoma matavimais, atliekamais meteorologijos stotyse, bei naudojant palydovų duomenis. Pradinių duomenų tikslumas sąlygoja modelio kokybę [8].

SOP modeliai skirti prognozuoti bendrajam atmosferos oro srautų judėjimui dideliame regione. Šių modelių pagrindas – daugiasluoksnis tinklelis, kurio kiekvienam mazgui priskiriamos atmosferos būklę aprašančių kintamųjų (atmosferos slėgio, oro tankio, vėjo greičio, krypties ir kt.) reikšmės. Modelį sudaro netiesinių diferencialinių lygčių su dalinėmis išvestinėmis sistema, neturinti analitinių sprendinių, todėl remiantis matavimų duomenimis apskaičiuojami skaitmeniniai sprendiniai kiekviename tinklelio mazge. [8]

Kadangi dabartinių SOP modelių skiriamoji geba yra tik iki 5 km, tokia geba yra per maža norint gauti pakankamai tikslią prognozę konkrečiam VE, nes nėra įvertinami mažesnės apimties atmosferos reiškiniai – oro srautų tekėjimas slėniuose, virš kalvų, miškų, miestų, taip pat pajūrio oro srautų judėjimo ypatumai bei įvairių kliūčių aptekėjimas. Todėl atliekamas fizikinis vėjo srautų modeliavimas - SOP duomenys transformuojami iki VE vėjaračio aukščio, įvertinant vietovės reljefą bei atsižvelgiant į atmosferos stabilumą. Tipinė fizikinių VE galios prognozės modelių veikimo schema pavaizduota 6 paveiksle [5].



6 pav. VE galios prognozės fizikinio modelio schema [5]

Naudojantis fizikiniais modeliais, neišvengiamai atsiranda sisteminių paklaidų. Norint šias paklaidas sumažinti ir pagerinti prognozės kokybę, naudojami statistiniai modeliai.

Maksimaliai sumažinti paklaidas galima pasinaudojus tiesine priklausomybe [8]:

$$U_{SP} = a + b \cdot U, \quad (1.10)$$

čia U_{SP} – statistiškai patikslintas prognozuojamas vėjo greitis, U – perskaičiuojamas vėjo greitis, a ir b – statistiniai funkcijos parametrai. Šie parametrai skirtingais priklausomai nuo metų laiko, bei SOP modelio patobulinimo gali keistis.[5] Todėl tiksliausia VE galios prognozės modeliuose naudoti tiesioginius matavimo duomenis iš VE ir parametrus nuolat perskaičiuoti.

Statistiniai modeliai.

Statistiniuose modeliuose pagal VE parko galios matavimo duomenis ir atitinkamus SOP modelio prognozės duomenis apskaičiuojami statistiniai parametrai, nusakantys šių duomenų ryšį, ir VE galia apskaičiuojama tiesiogiai. Šie modeliai patogūs tuo, kad nereikia atsižvelgti į fizikinius veiksnius, kurie lemia vėjo srautų dinamiką konkrečioje vietovėje, o atliekama tik duomenų analizė, kuri neturi jokio ryšio su meteorologiniais reiškiniais [8].

SOP prognozės ir VE parkų matavimo duomenų ryšiui nustatyti naudojami keli būdai [5]:

- Regresiniai adaptyvūs statistiniai metodai – šiuo metodu nustatomi statistiniai tam tikro laikotarpio SOP ir VE galios duomenų ryšiai. Jei sistema turi duomenis apie reljefą, įvairias kliūtis, atmosferos stabilumą bei kitus veiksnius, tai jų poveikio nereikia perskaičiuoti, nes sistema juos įvertina automatiškai ir taip prisitaiko prie duomenų pokyčių.
- Neuroninių tinklų metodas – tai netiesinio statistinio duomenų modeliavimo priemonė, naudojama modeliuojant sudėtingus įvairių duomenų ryšius

2. VĖJO JĖGAINĖ

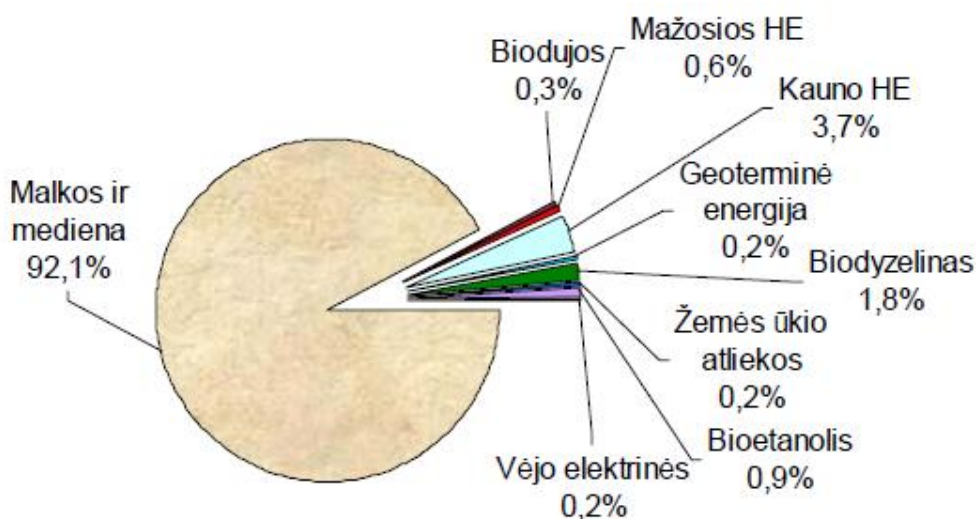
2.1. Vėjo energetikos pasiekimai ir perspektyvos Lietuvoje

Kas metai daugėjant ekologinių nelaimių, didėjant šiltnamio efektui, telkiamas vis didesnis dėmesys, kaip sumažinti klimato užterštumą. Nemažą dalį prie klimato taršos prisideda naftos, gamtinių dujų, anglių, orimulsijos deginimas. Todėl pasaulyje, o tuo pačiu ir Lietuvoje sprendžiama, kaip geriau žmonių energetiniams poreikiams panaudoti atsinaujinančius ir alternatyvius energijos šaltinius.

Atsinaujinančiais energijos šaltiniais laikoma gamtos išteklių (vandens potencinės energijos, saulės, vėjo, biomasės ir žemės gelmių šilumos) energija, kuri atsiranda ir atsinaujina veikiama gamtos ar žmogaus sukurtų procesų dėka [9].

Lietuvoje energijos gamyba iš atsinaujinančių energijos šaltinių labai paspartėjo nuo XX a. paskutiniojo dešimtmečio.

Iš atsinaujinančių energijos šaltinių Lietuvoje naudojama mediena, hidroenergija, sparčiai vystoma vėjo energetika (7 pav.).



7 pav. Energijos gamybos apimty iš atsinaujinančių energijos šaltinių 2006 m. [9]

Daugiausia šiuo metu elektros iš atsinaujinančių energijos šaltinių pagamina HE (hidroelektrinės) taip pat vėjo jėgainės (1 lentelė) [10].

1 lentelė. Elektros energijos gamyba prognozuota iki 2010 m., naudojant AES ir atliekinės energijos šaltinius.[10]

	Elektros energijos gamyba GWh					
	2004 m.	2005 m.	2006 m.	2007 m.	2008 m.	2009 m.
VE	28 (1,2)	84,2	112,2	140,3	196,4	278
Hidroelektrinės, be Kauno HE	80,4 (60,5)	99,8	114,6	125,6	132,0	134,2
Biomazės elektrinės	1,5 (7,4)	7,5	21	60	120	180
Saulės ir geoterminės elektrinės			0,2	1,3	3	6
Atliekinių energijos išteklių elektrinės		0,4	1,2	2	2,8	3,6
Iš viso su Kauno HE	439,9 (420,5)	521,9	529,4	659,1	784,2	931,8
Procentai nuo bendro elektros energijos sunaudojimo	4 (3,7)	4,7	5,1	5,6	6,4	7,4

XX a. paskutiniajame dešimtmetyje pradėjus gaminti nedideles, iki 60 kW galios vėjo jėgaines, Lietuvos energetikos institute Atsinaujinančių energijos šaltinių (LEI AES) laboratorijoje atlikti pirmieji tyrimai vėjo energetikos srityje. Vėjo išteklių skaičiavimai buvo atliekami remiantis hidrometeorologijos stočių matavimo duomenimis 10 m aukštyje virš žemės paviršiaus, apskaičiuoti vidutiniai daugiamečiai vėjo greičiai ir sudarytas vėjo greičio pasiskirstymo Lietuvos teritorijoje 10 m aukštyje žemėlapis [11].

Iškėlus modernią vėjo parametrų matavimo įrangą Giruliuose, nuo 1995 m. atlikta nemažai darbų, vėjo energijos matavimo duomenų statistinėje analizėje ir vėjo energijos išteklių vertinime.

Vėjo energetikos plėtra yra planuojama daugelyje šalių. Ypač smarkiai ji vystosi Europos sąjungoje. Lietuvai 2004 m. įstojus į Europos sąjungą pradėta spartesnė atsinaujinančių šaltinių energetikos plėtra. „Europos sąjungos direktyva 2001/77/EC įpareigoja ES šalis nares ir kandidates nustatyti ir suderinti su ES elektros gamybos normas, naudojant atsinaujinančių energijos šaltinių (AEŠ) išteklius. Lietuvos Respublikai (LR) siektina elektros norma naudojant AEŠ yra nustatyta 7 % nuo bendros energijos gamybos mūsų šalyje. Taigi Lietuvos Vyriausybės nutarimuose numatyta iki 2010 metų pasiekti 7% bendrosios elektros gamybos iš AEŠ bei skatinti pirkti vėjo elektrinių pagamintą elektros energiją. Numatyta iki 2010 metų VE gaminti 2,2% elektros energijos, suvartojamos šalyje (2 lentelė)“ [10]

2 lentelė. Prognozuotas VE galios prieaugis ir elektros energijos gamyba Lietuvoje.[2]

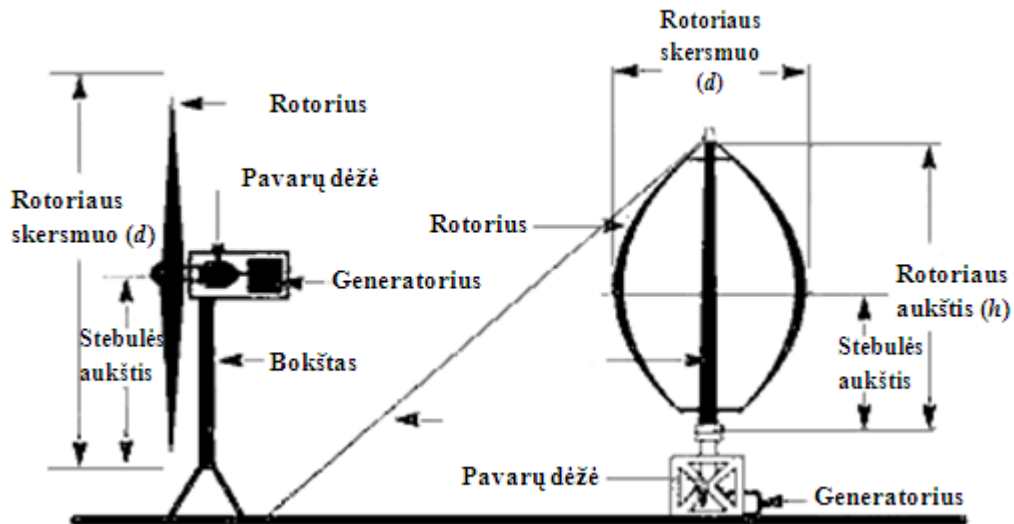
	Metai						Iš viso
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
Galios prieaugis MW	6,4	33	33	33	25	13	143,4
Elektros energijos gamyba GWh	1,2	84,2	112,2	140,3	196,4	278	812,3

Vėjo energetikos raidą ir perspektyvas Lietuvoje sąlygoja tokie veiksniai [12]:

- Tradicinės energetikos naudojamo kuro ištekliai mažėja, o ir jų prieinamumas taip pat mažėja dėl kylančių jų kainų ir politinės konjunktūros.
- Didėjantis vėjo energetikos prieinamumas, kuriant vis efektyvesnes vėjo elektrines įgalinančias mažinti jų pagalba gaminamos energijos savikainą.
- Elektros gamybos decentralizavimas, įgalinantis užtikrinti vartotojų nepriklausomybę nuo stambių elektros gamintojų.
- Mokslinių tyrimų įtraukimas į visas energetikos sektoriaus plėtros sritis.

2.2. Vėjo jėgainių tipai.

Vėjo jėgainės pagal vėjaračio ašies orientaciją erdvėje skirstomos į du tipus: vertikaliuos ir horizontalios ašies vėjo jėgaines (8 pav.).



8 pav. vertikalios ir horizontalios ašies jėgainių principinė schema [13]

➤ **Horizontalios ašies vėjo jėgainės.**

Vėjo jėgainės, kurių ašies orientacija erdvėje horizontali žemės atžvilgiu, yra vadinamos horizontalios ašies vėjo jėgainėmis (9 pav.). Pagrindinės šios jėgainės dalys yra vėjaratis, greičių dėžė, generatorius, gaubtas, bokštas. Vėjaratis gali turėti įvairų skaičių sparnų ir sukis kintamu arba pastoviu greičiu. Dažniausiai pasitaiko ir labiausiai paplitusios trijų sparnų horizontalios ašies vėjo jėgainės [14].



9 pav. horizontalios ašies vėjo jėgainės [16]

Horizontalios ašies vėjo jėgainės privalumai [15]:

- Vėjo turbiną galima aukštai iškelti. Kadangi jau 10 metrų aukštyje vėjo greitis padidėja iki 20%, tai ir energijos sugeneruoti galima iki 34% daugiau.

- oDidelis efektyvumas, nes mentės visuomet yra statmenos vėjui ir generuoja energiją viso apsisukimo metu (10 pav.). Tuo tarpu vertikalios ašies vėjo turbinų mentės pusę apsisukimo energijos negeneruoja, nes nukrypsta prieš vėją.



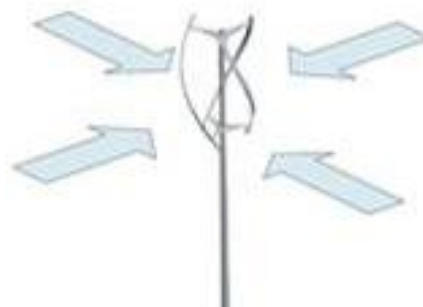
10 pav. horizontalios ašies vėjo jėgainės menčių orientacija pagal vėjo kryptį [15]

Horizontalios ašies vėjo jėgainės trūkumai [15]:

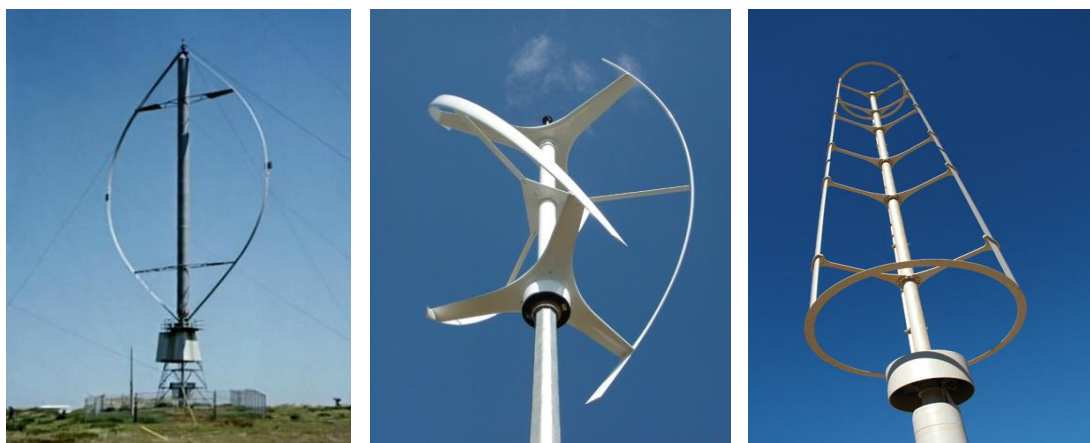
- Horizontalios ašies vėjo jėgainių bokštai siekia 30 – 100 metrų ilgio, todėl sunku juos transportuoti, bei reikalinga speciali įranga joms įrengti.
- Aukštos vėjo jėgainės gadina kraštovaizdį.

➤ Vertikalios ašies vėjo jėgainės.

Vėjo jėgainės, kurių ašies orientacija erdvėje vertikali žemės atžvilgiu, yra vadinamos vertikalios ašies vėjo jėgainėmis (11 pav.). Šios jėgainės nors ir yra paprastos konstrukcijos turi gana daug trūkumų. Jos lėtaeigės didelių gabaritų, vėjo energijos kiekis, pratekantis per besisukančių užimamą plotą, vėjaračio mažai panaudojamas (neviršija 18%). Pagrindinis jų privalumas, kad nereikalinga orientacijos sistema pagal vėjo kryptį (12 pav.). Tai yra didelis privalumas toje vietovėje, kur vėjo kryptis stipriai kinta. Pagrindiniai vertikalios ašies jėgainės elementai – greičių dėžė, generatorius gali būti sumontuoti ant jėgainės pamato [15].



12 pav. Vertikalios ašies vėjo jėgainės menčių orientacija pagal vėjo kryptį [15]



11 pav. Vertikalios ašies vėjo jėgainės [16]

Vertikalios ašies vėjo jėgainės privalumai [15]:

- Gali būti išeitis tose vietose, kur draudžiama statyti aukštą vėjo jėgainę, nes horizontalios ašies vėjo jėgainės yra santykinai žemesnės už vertikalios ašies jėgaines.
- Skleidžia mažesnę garsą nei horizontalios ašies vėjo jėgaines.

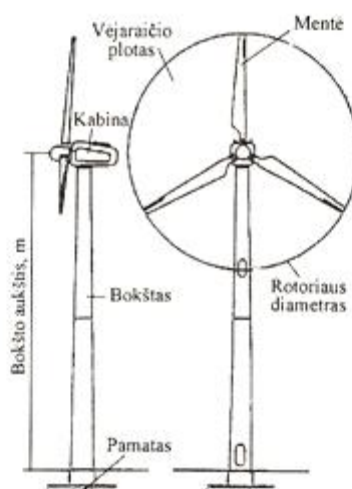
Vertikalios ašies vėjo jėgainės trūkumai [15]:

- Vertikalios ašies vėjo jėgainės yra didelio svorio, todėl auga konstruktyviniai reikalavimai sistemos pamatui. Statant generatorius nuo 1 kW galios, reikalingas kranas.
- Didelio svorio sistemų startui dažnai reikalingas papildomas įsukimas, o visai nurimus vėjui, pradinio sistemos greičio palaikymas, nes startuoti nuo nulio arba sistema negali, arba reikia ilgesnio laiko vėjo tarpo, kas gūsingų ir nepastovių vėjų zonose yra retas dalykas.

2.3. Vėjo jėgainės konstrukcija.

Pagrindiniai išoriniai vėjo jėgainės elementai (13 pav.):

- Rotorius
- Kabina
- Bokštas
- Pamatas



13 pav. Vėjo jėgainės pagrindiniai išoriniai elementai [1]

Vėjo jėgainės rotorius.

Vėjo jėgainės rotorius susideda iš menčių ir rotoriaus stebulės. Šiuolaikinėse jėgainėse naudojamos aerodinaminio profilio mentės.

Svarbus rotoriaus parametras yra vėjo srauto panaudojimo plotas, kadangi vėjo energijos panaudojimo potencialas proporcingas šiam plotui [1]:

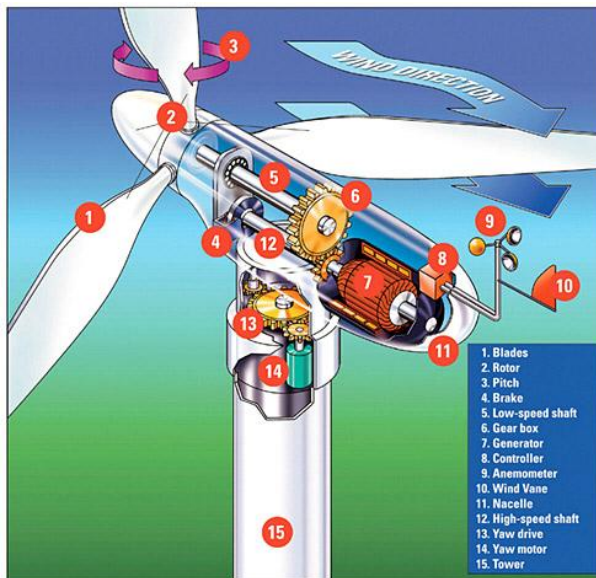
$$A = ((L + 0,5 H_d) \cdot 2) \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{3}; \quad (2.1)$$

čia L – mentės ilgis, H_d – stebulės viršūnės skersmuo.

Kabina. Vėjo jėgainės kabinoje montuojami jos darbo ir valdymo įrenginiai (14 pav.)

[1]:

- Pagrindinis velenas;
- Mechaninė pavara
- Diskinis stabdis;
- Generatorius.
- Keitiklis, galios transformatorius;
- Komutacinis aparatas;
- Valdymo spinta;
- Turbinos krypties valdymo sistema.



14 pav. Vėjo jėgainės schema: 1) mentė, 2) rotorius, 3) mentės atakos kampas, 4) stabdis, 5) velenas, 6) krumpliaračiai, 7) generatorius, 8) valdiklis, 9) anemometras, 10) vėjarodis, 11) kabina, 12) velenas, 13) rotoriaus krypties pavara, 14) rotoriaus krypties variklis, 15) stebulė [17]

Bokštas. Vėjo jėgainės rotorijų veikia didžiulės vėjo spaudimo jėgos. Pavyzdžiui, jei didelės vėjo jėgainės rotoriaus diametras siekia

100 m, tai esant 25 m/s vėjo greičiui per rotorijų praeina 470 t/s oro masė. Šio spaudimo jėgą padauginus iš jėgainės bokšto aukščio, galima rasti lenkimo momentą, kuris veikia bokšto pamatą. Taigi, jėgainės bokštas turi atlaikyti vėjo spaudimą esant 50 m/s vėjo greičiui, o pamatas turi atlaikyti dar ir keleto šimtų tonų turbinos bokšto svorį [1].

Jėgainės galios reguliavimo sistemos. Vėjo jėgainės projektuojamos taip, kad jų energijos kaštai būtų kuo mažesni, o jėgainės parametrai parenkami taip, kad jų maksimali galia būtų pasiekta vėjo greičiui esant apie 15 m/s. Jei vyrauja didesnis nei 15 m/s vėjo greitis, būtina perteklinę vėjo energiją neutralizuoti, kad generatorius nebūtų perkraunamas.

Todėl naudojama galios reguliavimo sistema. Galiai reguliuoti pasitelkiama atitinkamos rotoriaus mentės aerodinaminės savybės: vėjo atiduodamos galios rotoriumi didėjimas didinant vėjo atakos kampą ir oro srauto atitrūkimas nuo mentės pavėjinės pusės, kai atakos kampas pasiekia kritinę reikšmę [1].

Stabdymo sistemos. Jėgainės rotorius pradeda sukintis, kai vėjo greitis 4 – 5 m/s, ir turi būti stabdomas, kai vėjo greitis 25 m/s. Dėl to jėgainėse įmontuojami aerodinaminiai stabdžiai, kurie apsaugo nuo neleistino rotoriaus greičio padidėjimo dviem atvejais: vėjo greičiui padidėjus iki numatytos ribos ir generatoriumi neplanuotai atsijungus nuo elektros

tinklo. Tuomet labai svarbu greitai sustabdyti jėgainę, nes rotoriaus sukimosi dažnis pradeda didėti šuoliu ir greitai gali pasiekti suirimo ribą [1].

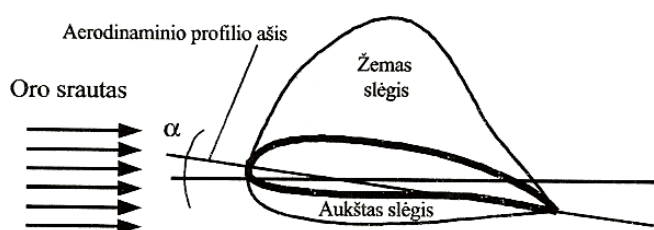
2.4. Rotoriaus aerodinamika.

Didelę įtaką jėgainės darbo efektyvumui turi tos jėgainės menčių aerodinaminės savybės. Šias savybes lemia mentės forma bei aerodinaminis profilis.

Vėjo jėgainės pagal naudojamos aerodinaminės jėgos rūšį galima suskirstyti į du tipus [1]:

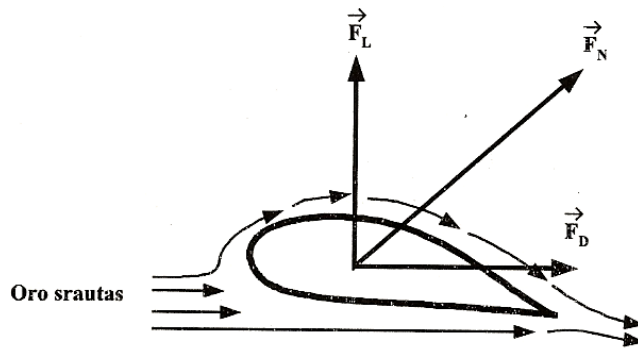
- Vėjo jėgainės daugiausiai naudojančios aerodinaminio slėgimo jėgą. Aerodinaminio slėgimo jėgą dažniausiai naudoja mažo greičio jėgainės, kurių rotoriaus menčių apskritiminių greitis mažesnis negu vėjo greitis, o sukimo momentas palyginti aukštas.
- Vėjo jėgainės daugiausiai naudojančios aerodinaminio kėlimo jėgą. Aerodinaminio kėlimo jėgą dažniausiai naudoja didelio greičio turbinos, kurių rotoriaus menčių apskritiminių greitis keletą kartų didesnis nei vėjo greitis, o sukimo momentas palyginti žemas.

Aerodinaminių jėgų veikimą į vėjo turbinos rotoriaus mentes galima paaiškinti klasikine aerodinaminio profilio teorija. Kai aerodinaminį profilį apteka skysčio ar dujų srautas, abipus šio profilio atsiranda skirtingo dydžio ir krypties slėgio jėgos. Viršutinėje dalyje atsiradusi mažo slėgio oro zona kelia aerodinaminį profilį aukštyn. Apatinėje dalyje – priešingai, susidariusi aukšto oro slėgio zona kelia aerodinaminį profilį aukštyn (15 pav.). [18]



15 pav. Skirtingo slėgio zonos aerodinaminiame profilyje.[18]

Profilį veikia normalinė jėga F_N , kurią galima išskaidyti į dvi dedamąsias – kėlimo jėgą F_L , kuri su oro srautu sudaro 90° kampą, ir pasipriešinimo jėgą F_D , kurios kryptis lygiagreti su oro srauto kryptimi (16 pav.). Pagal tai, kuri iš šių jėgų vyrauja, rotoriai skirstomi į keliamuosius ir stumiamuosius. Keliamieji ($F_L > F_D$) rotoriai paprastai turi didesnę kampinį sukimosi greitį ir gana mažą sukimo momentą, o stumiamieji ($F_L < F_D$) atvirkščiai (17 pav.). [18]



16 pav. Aerodinaminį profilį veikiančios jėgos [18]

Keliamoji jėga apskaičiuojama pagal formulę:

$$F_L = C_L \frac{\rho v^2}{2} S; \quad (2.2)$$

čia C_L – keliamosios jėgos koeficientas, ρ – oro tankis, v – oro srauto greitis, S – sparno plotas [19].

Pasipriešinimo jėga apskaičiuojama pagal formulę:

$$F_D = C_D \frac{\rho v^2}{2} S; \quad (2.3)$$

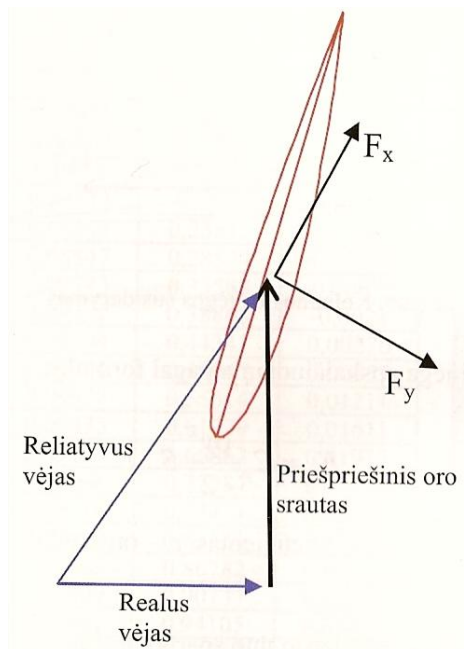
čia C_D – pasipriešinimo jėgos koeficientas [19].

Vėjo jėginių pagrindinės techninės charakteristikos						
Rotoriaus tipas	Kampinis sukimosi greitis ω	Naudingumo koeficientas C_p	Momentas M			
Vienmentis propelerinis*	Didelis	0,42	Mažas			
Dvimentis propelerinis*				"	0,44	"
Trimentis propelerinis*						
Vertikalios ašies (Darrieus)*	"	0,48	"			
Daugiamentis				Vidutinis	0,35	Vidutinis
Plokščiamentis	Mažas	0,17	Didelis			
Samčiamentis						

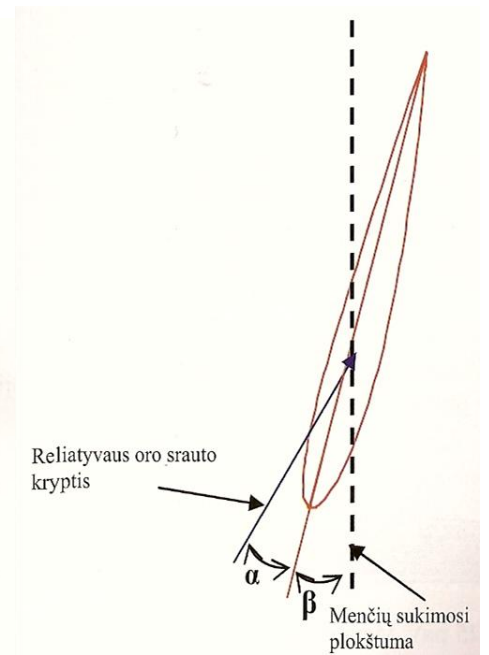
Pastaba: žvaigždute pažymėtuose rotoriuose ($F_L > F_D$).

17 pav. vėjo jėginių pagrindinės techninės charakteristikos [18]

Taigi, remiantis klasikine aerodinaminio profilio teorija galima aprašyti ir menčių veikimo principą. „Pučiant vėjui susidaro keliamoji ir pasipriešinimo jėgos, o tų dviejų jėgų atstojamoji, t.y. pilnoji aerodinaminė



18 pav. Mentės jėgų schema [19]



19 pav. Aerodinaminės mentės susukimo paaiškinimas [19]

jėga, sukuria mentės sukamąjį momentą, kuris

ir suka jėgainės rotorius. Pučiant vėjui mentės pradeda sukis, ir jų sukimosi linijinio greičio ir vėjo greičio vektorinė suma lemia atakos kampo dydį, t.y. reliatyvųjų vėjo krypties vektorių (18 pav.). Tačiau mentės linijinis sukimosi greitis, o kartu ir priešpriešinio oro srauto greitis kiekvienam mentės atakos briaunos taškui yra skirtingas (kuo toliau nuo sukimosi ašies, tuo didesnis). Tai reiškia, kad, norint gauti vienodą atakos kampą α visu jos ilgiu, mentė turi būti susukta skirtingu kampu β (19 pav.)“ [19].

3. REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ

3.1. Rezultatų gavimo metodika

Magistro rašymo metu buvo iškeltas tikslas - įvertinti vėjo parametrus ir prognozuojamą vėjo elektrinių galią pajūrio ir Tauragės regionams. Norint įvertinti vėjo parametrus, buvo pasinaudota Lietuvos energetikos instituto, Atsinaujinančių energijos šaltinių laboratorijos, vėjo matavimo duomenimis Vilkyčių, Kretingos ir Tauragės regionuose, kur vėjo greičio ir krypties matavimai yra atliekami standartiniais anemometrais, kurie matavimus atlieka kas dešimt minučių. Imant tokių vėjo matavimo duomenų vidurkius, buvo atlikta statistinė analizė, kur vėjo greičio kitimas aprašytas statistinės matematikos metodais. Tipinėje vietovėje vėjo greičio kitimui aprašyti naudota standartine laikoma ir plačiausiai naudojama Weibull'o tankio skirstinio funkcija, kurios matematinė išraiška [5, 20, 21]:

$$f(u) = \frac{k}{A} \left(\frac{u}{A}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{u}{A}\right)^k}; \quad (3.1)$$

čia u - vėjo greitis, A ir k – Weibull'o parametrai, atitinkamai vadinami dydžio ir formos parametrais, apskaičiuojami mažiausių kvadratų metodu.

Kai parametras $k = 2$, Weibull'o funkcija įgyja paprastesnį pavidalą ir vadinama Rayleigh pasiskirstymu, kuris pasitaiko dažniausiai. Kai k reikšmė didesnė, pavyzdžiui $k = 2,5$ ar $k = 3$, rodo, kad toje vietovėje momentiniai vėjo greičio svyravimai apie metų vidurkį yra maži. Jei parametro k reikšmė mažesnė nei 2, vėjo greičio svyravimai apie vidurkį yra didesni [20].

Šiame darbe Weibull'o funkcija ir jos parametrai buvo skaičiuojami pasinaudojus statistinės rezultatų analizės programa STATISTICA.

Nustačius Weibull'o parametrus, buvo apskaičiuotas vidutinis vėjo greitis:

$$u_{vid} = A \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right); \quad (3.2)$$

čia A ir k – Weibull'o dydžio ir formos parametrai, Γ – Eulerio gama funkcija.

Apskaičiuotas vidutinis vėjo greitis pasinaudojus Weibull'o parametrais ir Eulerio gama funkcija lyginamas su aritmetiškai suskaičiuotu vidutiniu vėjo greičiu:

$$u_{vid} = \frac{u_1 + u_2 + \dots + u_n}{n}. \quad (3.3)$$

Apskaičiavus Weibull'o parametrus, bei vidutinį vėjo greitį buvo apskaičiuotas vidutinis vėjo galios tankis.

Vėjo galios tankis – tai vėjo srauto kinetinė energija, pratekanti pro kvadratinį metrą per laiko vienetą. Naudojant šį matą, vertinamas potencialus VE išdirbis. Iš principo vėjyje glūdinti energija turėtų būti skaičiuojama pagal momentinius vėjo greičius, t.y. turėtų būti

įvertinama vėjo srauto turbulencija. Tačiau vėjo elektrinės nepajėgios sureaguoti į trumpalaikius vėjo gūsius, todėl vėjo energetikos tikslams paprastai naudojami 10 min. vėjo greičio vidurkiai [5].

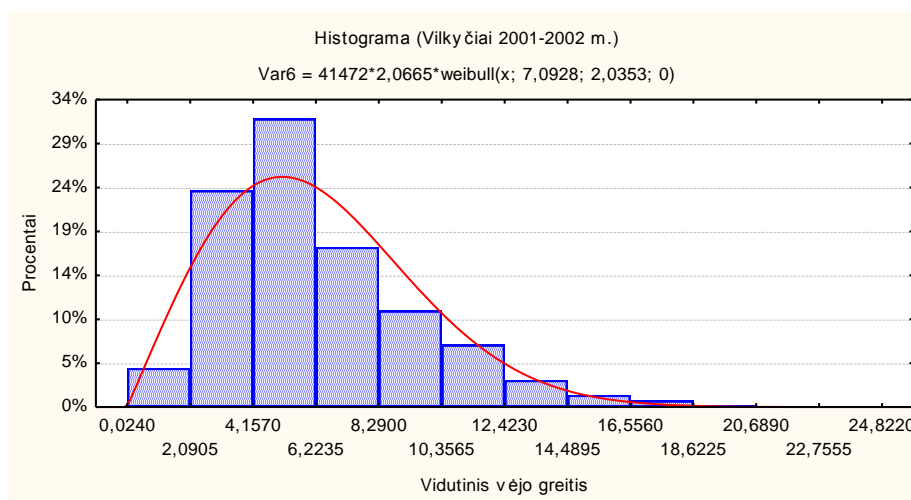
Vidutinis vėjo galios tankis proporcingas vėjo greičio kubui [20]:

$$E = \frac{1}{2} \rho \cdot u_{vid}^3 = \frac{1}{2} \rho \cdot A^3 \cdot \Gamma \left(1 + \frac{3}{k} \right); \quad (3.4)$$

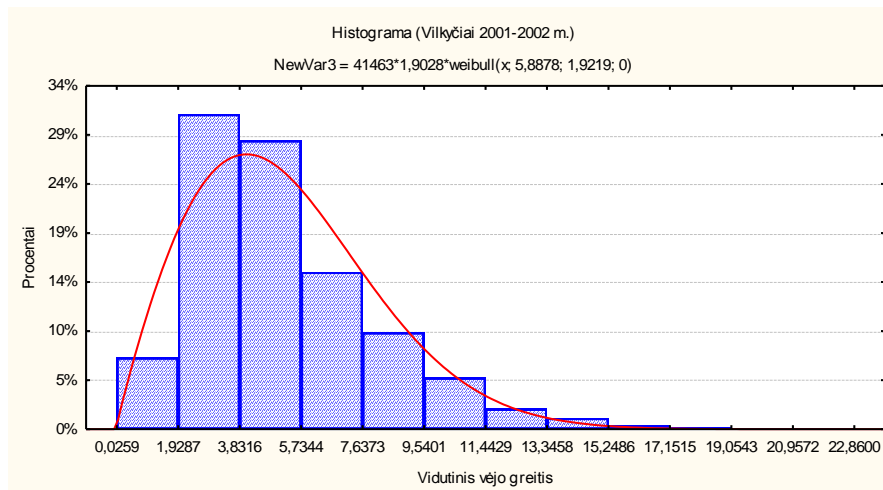
čia E – vėjo galios tankis, ρ – oro tankis ($\sim 1,225 \text{ kg/m}^3$), u_{vid} – vidutinis vėjo greitis.

3.2. Matavimo prie Vilkyčių duomenų statistinė analizė

Matavimo vietoje, prie Vilkyčių, vėjo greičio ir krypties pasiskirstymo įvertinimui atlikta statistinė analizė. Analizei naudoti 2001 m. gegužės – 2002 m. vasario mėnesiai 21,5 ir 43 m. aukštyje virš žemės paviršiaus registruoti 10 min. vėjo greičio vidurkiai. Iš gautos histogramos matyti, kad vidutinio vėjo greičio kitimo pasiskirstymas, gerai aproksimuojamas Weibull'o skirstinio funkcija (20, 21 pav.) (sezoninės vidutinio vėjo greičio histogramos ir jas aproksimuojanti Weibull'o funkcija pateikta 1 priede). Apskaičiuotas vidutinis vėjo greitis 21,5 ir 43 m. aukštyje siekia 5,20 ir 6,26 m/s.

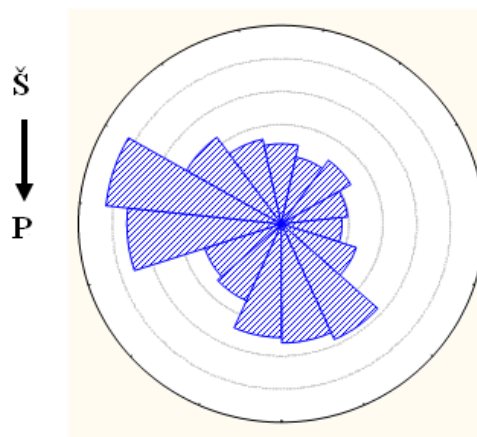


20 pav. Vilkyčių vidutinio vėjo greičio 43 m. aukštyje histograma ir ją aproksimuojanti Weibull'o skirstinio funkcija.



21 pav. Vilkyčių vidutinio vėjo greičio 21,5 m. aukštyje histograma ir ją aproksimuojanti Weibull'o skirstinio funkcija.

Duomenys apie vėjo krypties kitimą, prie Vilkyčių, pateikiami kompas skalės pavidalo diagramoje, vadinamojoje vėjų rožėje, padalytoje į 15 kampinių sektorių, atitinkančių pasaulio šalių kryptis Š – P – R – V, taip pat tarpines kryptis. Pačioje diagramoje dar buvo nubrėžti keli apskritimai, kurių spindulys proporcingas vėjo krypties pasikartojimo dažniui, išreikštai santykiniais vienetais (%). Diagramos centras atitinka nulinį pasikartojimo dažnį. Vėjų rožė buvo brėžiama pasinaudojus statistinės analizės programa STATISTICA (22 pav.) (sezoninis vėjo krypties kitimas pateiktas 2 priede).



22 pav. Vėjo krypties kitimas, prie Vilkyčių, pavaizduotas vėjų rožė.

Iš vėjų rožės matyti, kad prie Vilkyčių vyraujančios vėjo kryptys yra pietų - pietryčių.

Apskaičiavus Weibull'o funkcijos parametrus, suskaičiuotas vidutinis vėjo greitis (3 lentelė).

3 lentelė. Apskaičiuoti sezoniniai bei metiniai Weibull'o funkcijos parametrai A ir k , remiantis šiais parametrais apskaičiuotas vidutinis greitis u .

Metų laikas 2001 – 2002 m.	Vilkyčiai							
	43 m.				21,5 m.			
	A , m/s	k	v , m/s	u , m/s	A , m/s	k	v , m/s	u , m/s
Vasara (06 - 08 mėn.)	5.36	2.60	4.77	4.76	4.44	2.40	3.93	3.93
Ruduo (09 – 11 mėn.)	7.52	1.98	6.64	6.66	6.23	1.84	5.51	5.54
Žiema (12 - 02 mėn.)	8.57	2.30	7.58	7.60	7.14	2.18	6.31	6.33
Pavasaris (03 - 04 mėn.)	7.02	2.11	6.20	6.22	5.89	2.01	5.20	5.22
2001-2002 m.	7.09	2.03	6.26	6.28	5.89	1.92	5.20	5.22

Gauti rezultatai atspindi tik matavimo laikotarpio (2001-2002 m.) vėjingumo sąlygas ir parodo, kad įvairias metų laikais vidutinis greitis skiriasi, didžiausias vidutinis greitis užfiksuotas žiemą, tuo tarpu mažiausias – vasarą. Lyginant vidutinį vėjo greitį (v) apskaičiuotą pagal aritmetinio vidurkio formulę ir vidutinį vėjo greitį (u) apskaičiuotą pasinaudojus Weibull'o funkcijos parametrais, bei Eulerio gama funkcija, gautos panašios vertės.

Norint nustatyti vertikalų vėjo greičio pasiskirstymą, remiantis statistiškai apdorotais matavimo duomenimis, Mathcad programa perskaičiuoti Weibull'o parametrai, vidutinis vėjo greitis bei vėjo galios tankis skirtinguose aukščiuose. Tarus, kad vidutinio vėjo greičio tikimybių pasiskirstymas aukštyje $h_1 = 21,5$ m ir $h_2 = 43$ m. priklauso tam pačiam Weibull'o pasiskirstymo tipui, gaunama, kad parametru atitinkamai aukščiuose virš žemės paviršiaus h_1 ir h_2 : (A_{h1}, k_{h1}) ir (A_{h2}, k_{h2}) yra toks ryšys [22]:

$$A_2 = \alpha A_1^\beta, \quad (3.4)$$

$$k_2 = \frac{k_1}{\beta}, \quad (3.5)$$

kur

$$\alpha = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{B_0}, \quad (3.6)$$

$$\beta = 1 + B_1 \ln \frac{h_2}{h_1}, \quad (3.7)$$

čia h_1 ir h_2 – aukščiai virš žemės paviršiaus, o B_0 ir B_1 koeficientai nustatyti pasinaudojant matavimo duomenimis.

Matavimo vietoje, prie Vilkyčių, šie koeficientai buvo nustatomi imant h_1 ir h_2 aukščius, kuriuose buvo atlikti matavimai, t.y. 21,5 ir 43 m. Kadangi Weibull'o funkcijos parametrai A ir k šiuose aukščiuose yra suskaičiuoti, tai koeficientai B_0 ir B_1 suskaičiuoti pagal formules:

$$\frac{k_1}{k_2} = \beta = 1 + B_1 \cdot \ln \frac{h_2}{h_1}; \quad (3.8)$$

$$B_1 = \frac{\beta - 1}{\ln \frac{h_2}{h_1}}; \quad (3.9)$$

$$\alpha = \frac{A_2}{A_1^\beta}; \quad (3.10)$$

$$\ln \alpha = B_0 \ln \frac{h_2}{h_1}; \quad (3.11)$$

$$B_0 = \frac{\ln \alpha}{\ln \frac{h_2}{h_1}}. \quad (3.12)$$

Matavimo vietoje, prie Vilkyčių, šie koeficientai lygūs $B_0 = 0,435$ ir $B_1 = -0,085$.

Pagal gautus duomenis sudaryta Vilkyčių regioninio vėjingumo lentelė (4 lentelė). Šioje lentelėje pateikti ekstrapoliuoti statistiniai vėjo parametrų duomenys (Weibull'o parametrai, vidutinis vėjo greitis ir vėjo galios tankis).

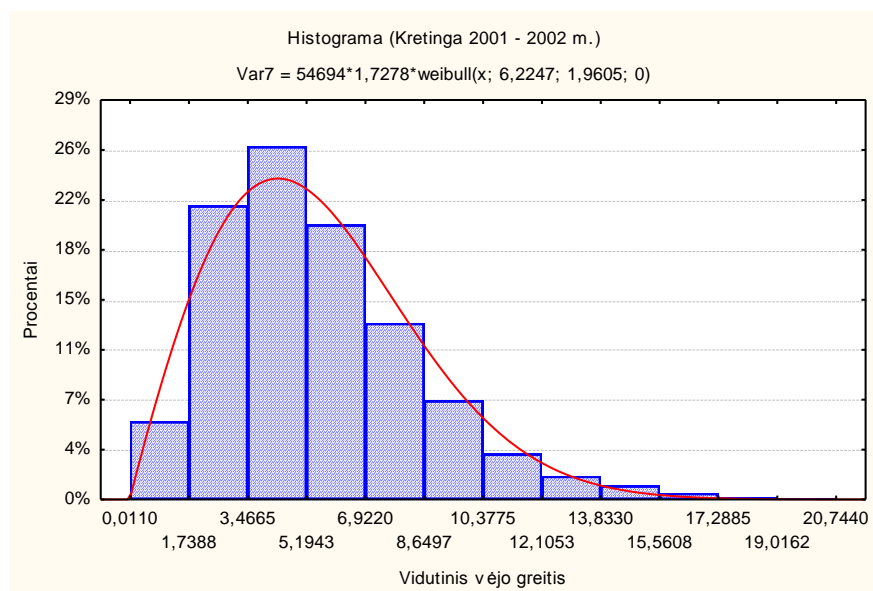
4 lentelė. Vilkyčių regioninio vėjingumo lentelė.

Aukštis, m	Vilkyčiai			
	Parametras			
	Weibull A , m/s	Weibull k	Vid. vėjo greitis u , m/s	Galios tankis E , W/m ²
20	6.36	1.97	5.64	213.30
30	7.09	2.03	6.28	285.31
40	7.66	2.09	6.79	350.98
50	8.13	2.13	7.20	412.35
60	8.54	2.16	7.57	470.51
70	8.90	2.19	7.89	526.16
80	9.23	2.22	8.17	579.74
90	9.53	2.24	8.44	631.59
100	9.80	2.27	8.68	681.96
110	10.05	2.29	8.91	731.04
120	10.29	2.31	9.12	778.97
130	10.51	2.32	9.32	825.88
140	10.73	2.34	9.50	871.87
150	10.94	2.36	9.68	917.02
160	11.12	2.37	9.85	961.41
170	11.30	2.39	10.02	1005
180	11.47	2.40	10.17	1048
190	11.64	2.41	10.32	1091
200	11.80	2.43	10.47	1132

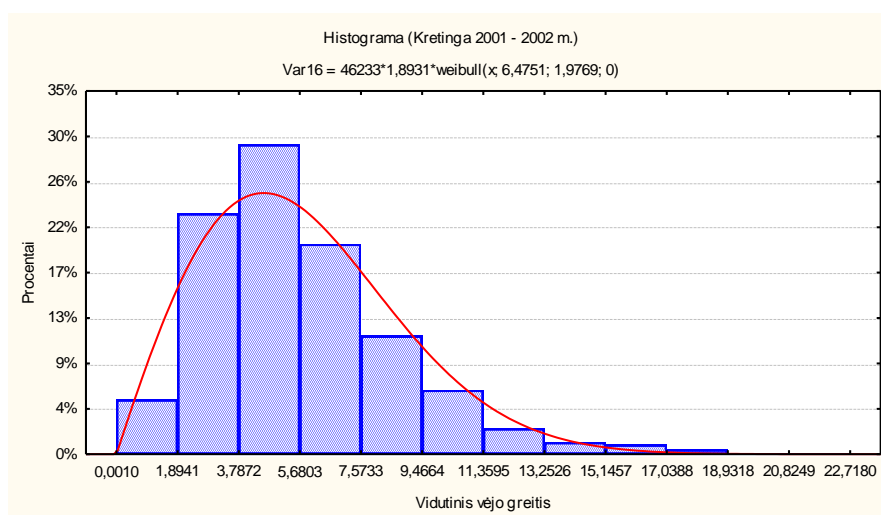
4 lentelėje pateikti duomenys atspindi bendrus vėjo srautų dėsningumus: didėjant aukščiui vidutinis vėjo greitis, Weibull'o parametrai A ir k bei galios tankis didėja. Pagal gautus duomenis jau 80 m. aukštyje virš žemės paviršiaus, vidutinis vėjo greitis viršija 7 m/s. Tai rodo palankias vėjingumo sąlygas vėjo energetikos šiame regione vystymui.

3.3. Matavimo prie Kretingos duomenų statistinė analizė

Matavimo vietoje, prie Kretingos, vidutinis vėjo greitis 15 m aukštyje siekė 5,50 m/s, o 27,5 aukštyje 5,73 m/s. Vidutinio vėjo greičio matavimai atlikti 2001 m. balandžio – 2002 m. balandžio mėnesiais (23, 24 pav.) (sezoninės vidutinio vėjo greičio histogramos ir jas aproksimuojanti Weibull'o funkcija pateikta I priede).

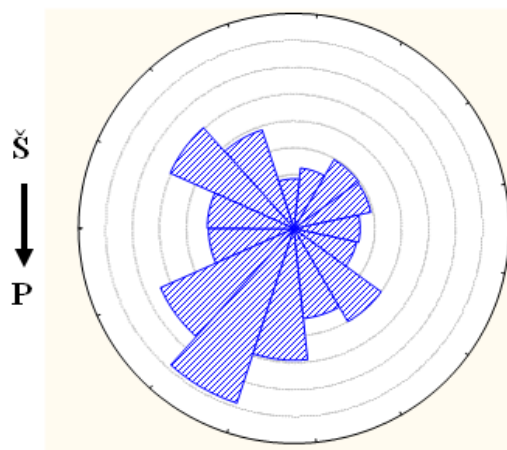


23 pav. Kretingos vidutinio vėjo greičio 15 m. aukštyje histograma ir ją aproksimuojanti Weibull'o skirstinio funkcija.



24 pav. Kretingos vidutinio vėjo greičio 27,5 m. aukštyje histograma ir ją aproksimuojanti Weibull'o skirstinio funkcija

Vėjo krypties prie Kretingos analizei buvo sudaryta vėjų rožė. Iš diagramos matyti, kad vyraujančios vėjo kryptys prie Kretingos pietvakarių, skiriasi nuo krypties prie Vilkyčių (25 pav.).



25 pav. Vėjo krypties kitimas, prie Kretingos, pavaizduotas vėjų rože.

Apskaičiavus Weibull'o funkcijos parametrus, suskaičiuotas vidutinis vėjo greitis įvairiais metų laikais.

5 lentelė. Apskaičiuoti sezoniniai bei metiniai Weibull'o funkcijos parametrai A ir k , remiantis šiais parametrais apskaičiuotas vidutinis greitis u .

Metų laikas 2001 - 2002	Kretinga							
	15 m.				27,5 m.			
	A , m/s	k	v , m/s	u , m/s	A , m/s	k	v , m/s	u , m/s
Pavasaris (04 – 05 mėn.)	5.63	2.34	4.98	4.989	6.20	2.45	5.49	5.50
Vasara (06 – 08 mėn.)	4.76	2.35	4.21	4.217	5.37	2.48	4.76	4.76
Ruduo (09 – 11 mėn.)	6.72	1.88	5.95	5.968	7.54	1.92	6.67	6.69
Žiema (12 – 02 mėn.)	7.67	2.19	6.78	6.792	8.55	2.21	7.58	7.57
Pavasaris (03 – 04 mėn.)	5.99	2.04	5.30	5.313	6.55	1.95	5.84	5.81
2001-2002 m.	6.23	1.96	5.50	5.519	6.47	1.98	5.73	5.74

Gauti rezultatai parodo, kad Kretingoje kaip ir Vilkyčiuose, nepriklausomai nuo matavimo aukščio, didžiausias vidutinis vėjo greitis apskaičiuotas žiemą ir rudenį, tuo tarpu mažiausias – pavasarį ir vasarą. Lyginant vidutinį vėjo greitį (v) apskaičiuotą pagal aritmetinio vidurkio formulę ir vidutinį vėjo greitį (u) apskaičiuotą pasinaudojus Weibull'o funkcijos parametrais, gautos panašios vertės.

Pagal logaritminį dėsnį vidutinį vėjo greitį perskaičiavus skirtingiems aukščiams, nustatyta, kad didėjant aukščiui vidutinis vėjo greitis taip pat didėja. Pagal perskaičiuotus duomenis sudaryta regioninio vėjingumo lentelė (6 lentelė).

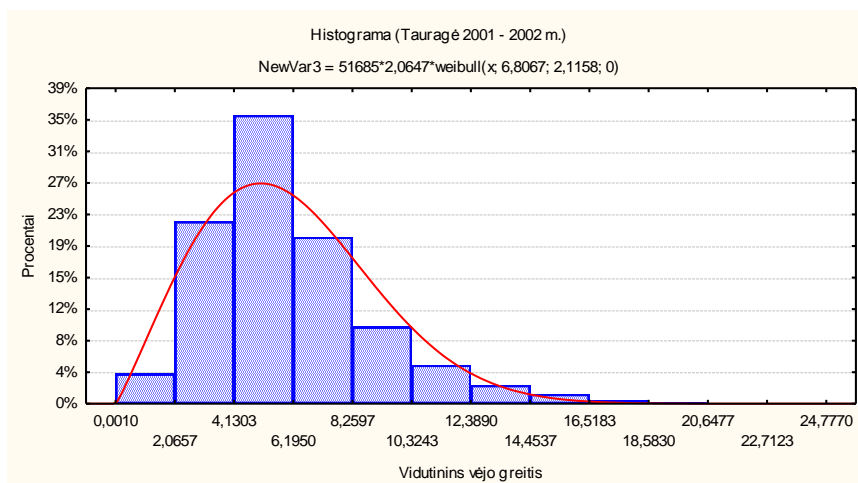
6 lentelė. Vilkyčių regioninio vėjingumo lentelė.

Aukštis <i>h</i> , m	Kretinga			
	Parametras			
	Weibull <i>A</i> , m/s	Weibull <i>k</i>	Vid. vėjo greitis <i>u</i> , m/s	Galios tankis <i>E</i> , W/m ²
20	5.69	1.93	5.05	155.89
30	6.22	1.96	5.52	200.64
40	6.63	1.98	5.88	240.02
50	6.96	1.99	6.17	275.83
60	7.25	2.01	6.42	309.04
70	7.50	2.02	6.64	340.22
80	7.72	2.03	6.84	369.78
90	7.92	2.03	7.02	397.98
100	8.11	2.04	7.18	425.03
110	8.28	2.05	7.34	451.09
120	8.44	2.05	7.48	476.28
130	8.59	2.06	7.61	500.69
140	8.73	2.06	7.73	524.41
150	8.86	2.07	7.85	547.51
160	8.99	2.07	7.96	570.04
170	9.11	2.08	8.07	592.05
180	9.23	2.08	8.17	613.58
190	9.34	2.09	8.27	634.67
200	9.44	2.09	8.36	655.35

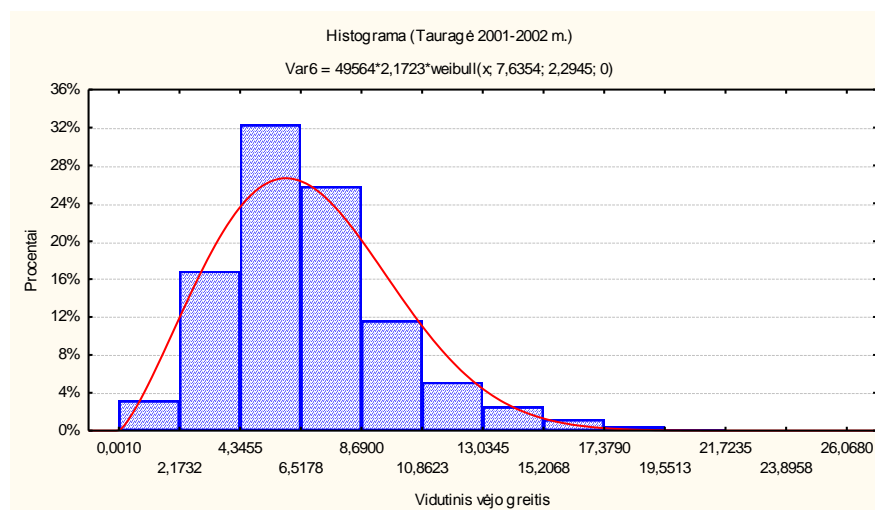
Lentelėje pateikti duomenys atspindi vėjo parametrų kitimo dėsningumus ir leidžia teigti, kad prie Kretingos, kuri yra panašiu atstumu nutolusi nuo jūros kaip ir Vilkyčiai, vidutinis vėjo greitis didėjant aukščiui didėja mažiau nei Vilkyčiuose. 90 m aukštyje vidutinis vėjo greitis siekia 7 m/s. Norint, kad prie Kretingos būtų pagaminamas toks pat metinis energijos kiekis kaip Vilkyčiuose, reikėtų statyti vėjo jėgaines ne žemesnes kaip 90 m aukščio.

3.4. Matavimo prie Tauragės duomenų statistinė analizė

Matavimo vietoje, prie Tauragės, vėjo greičio ir krypties pasiskirstymo įvertinimui atlikta statistinė analizė. (26, 27 pav.) Analizei naudoti 2001 m. rugsėjo – 2002 m. vasario mėn. išmatuoti vėjo greičio vidurkiai, 15 ir 28 m aukštyje. Vidutinis vėjo greitis 15 m aukštyje siekė 6,04 m/s, o 28 m aukštyje 6,77 m/s.

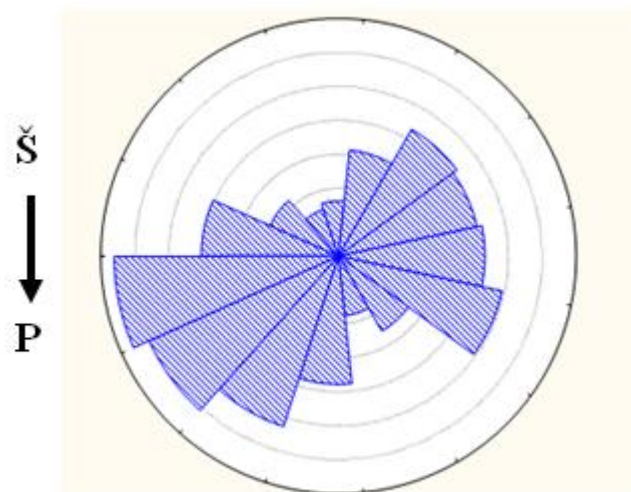


26 pav. Tauragės vidutinio vėjo greičio 15 m. aukštyje histograma ir ją aproksimuojanti Weibull'o skirstinio funkcija



27 pav. Tauragės vidutinio vėjo greičio 28 m. aukštyje histograma ir ją aproksimuojanti Weibull'o skirstinio funkcija

Vėjo krypties prie Tauragės analizei buvo sudaryta vėjų rožė. Iš diagramos matyti, kad vyraujančios vėjo kryptys prie Tauragės vakarų – pietvakarių (28 pav.).



28 pav. Vėjo krypties kitimas, prie Tauragės, pavaizduotas vėjų rožė.

Pasinaudojus statistinės analizės programa STATISTICA ir apskaičiavus Weibull'o funkcijos parametrus, suskaičiuotas vidutinis vėjo greitis įvairiais metų laikais (7 lentelė).

7 lentelė. Apskaičiuoti sezoniniai bei metiniai Weibull'o funkcijos parametrai A ir k , remiantis šiais parametrais apskaičiuotas vidutinis greitis u .

Metų laikas 2001 – 2002 m.	Tauragė							
	28 m.				15 m.			
	A , m/s	k	v , m/s	u , m/s	A , m/s	k	v , m/s	u , m/s
Ruduo (09 – 11 mėn.)	7.71	2.21	6.826	6.82	6.95	1.88	6.21	6.16
Žiema (12 – 02 mėn.)	8.82	2.27	7.80	7.81	8.55	2.36	7.58	7.58
Pavasaris (03 – 05 mėn.)	7.31	2.52	6.49	6.49	6.19	2.49	5.49	5.49
Vasara (06 – 08 mėn.)	6.71	2.71	5.98	5.96	5.46	3.08	4.89	4.89
2001-2002 m.	7.63	2.29	6.77	6.76	6.81	2.12	6.04	6.02

Gauti rezultatai parodo, kad mažiausias vidutinis vėjo greitis, kaip ir kituose vietovėse apskaičiuotas vasarą ir pavasarį, tuo tarpu didžiausias – žiemą ir rudenį.

Palyginimui su kitais regionais vėjo greitis pagal logaritminį dėsnį buvo perskaičiuotas į skirtingus aukščius, bei sudaryta regioninio vėjingumo lentelė (8 lentelė).

8 lentelė. Tauragės regioninio vėjingumo lentelė.

Aukštis <i>h</i> , m	Tauragė			
	Parametras			
	Weibull <i>A</i> , m/s	Weibull <i>k</i>	Vid. vėjo greitis <i>u</i> , m/s	Galios tankis <i>E</i> , W/m ²
20	7.08	2.17	6.27	266.92
30	7.63	2.29	6.76	319.54
40	8.05	2.39	7.14	363.65
50	8.39	2.46	7.44	402.42
60	8.68	2.53	7.70	437.42
70	8.93	2.59	7.93	469.61
80	9.15	2.64	8.13	499.57
90	9.35	2.69	8.32	527.72
100	9.53	2.74	8.48	554.37
110	9.70	2.78	8.64	579.75
120	9.86	2.82	8.78	604.01
130	10.01	2.86	8.92	627.31
140	10.15	2.90	9.05	649.75
150	10.28	2.93	9.17	671.44
160	10.40	2.96	9.28	692.43
170	10.52	3.00	9.39	712.81
180	10.63	3.03	9.49	732.61
190	10.73	3.06	9.59	751.90
200	10.84	3.08	9.69	770.71

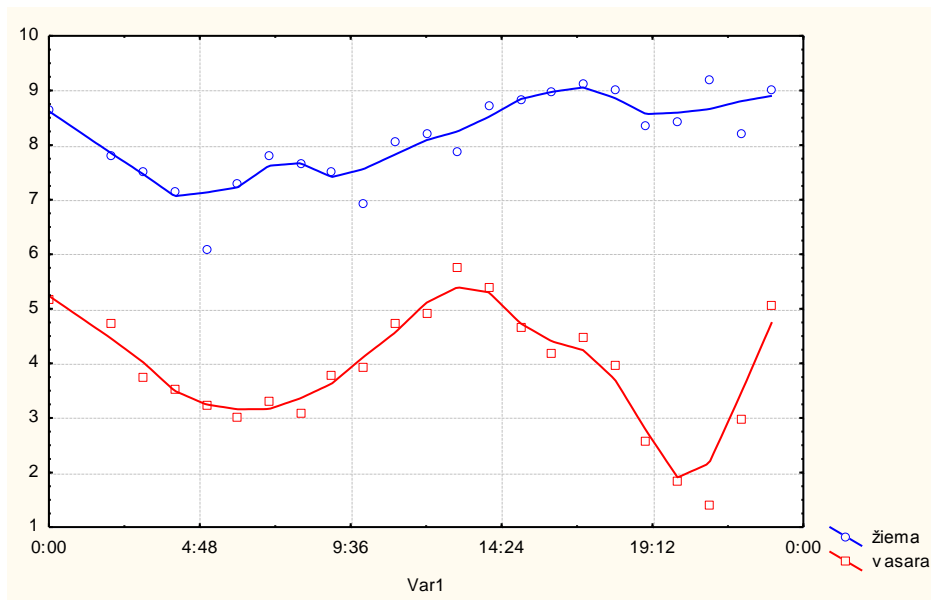
Palyginimui su kitais regionais pasirenkamas vienas aukštis, 100 m. Nustatyta, kad šiame aukštyje vidutinis vėjo greitis prie Tauragės siekė 8,48 m/s ir yra didesnis nei prie Kretingos (7,18 m/s), bet šiek tiek mažesnis nei prie Vilkyčių (8,68 m/s). Palankios vėjingumo sąlygos nuo 40 m aukščio, nes vidutinis vėjo greitis šiame aukštyje siekia 7,14 m/s.

3.5. Vėjo parametrų prie Vilkyčių, Kretingos ir Tauragės palyginimas

Palyginus visų tirtų regionų atskirų metų laikų duomenis, nustatyti vėjo greičio ir krypties pasiskirstymo tirtuose vietovėse panašumai. Visuose regionuose vyraujančių vėjo krypčių sektoriai daugumai metų laikų sutampa, kadangi vėjo kryptį daugiausiai lemia orų sistemos, slenkančios per Lietuvą, ir jos yra didesnės už atstumus tarp vėjo matavimo vietų.

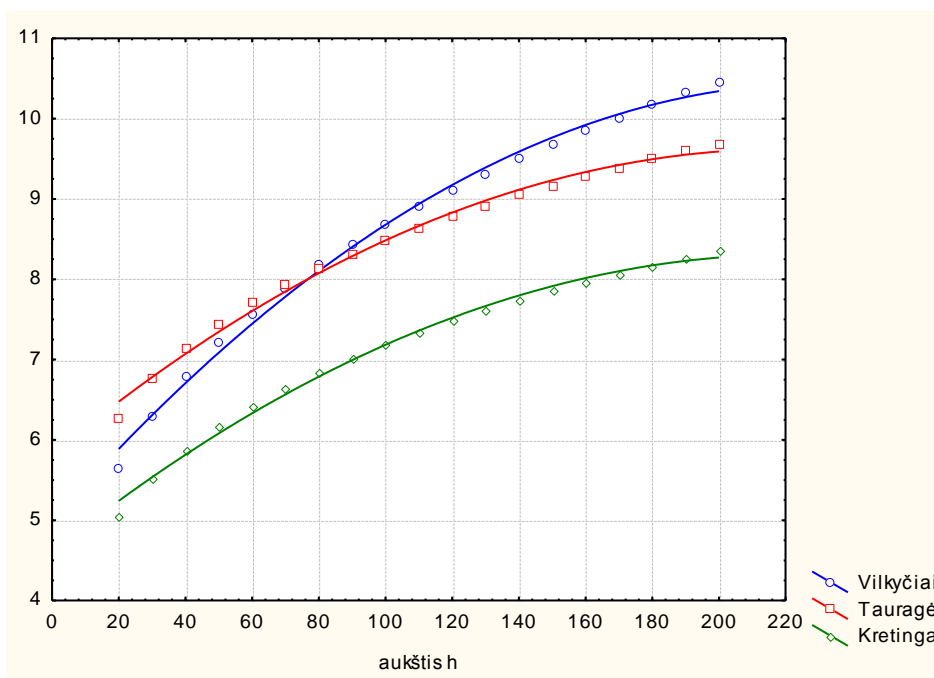
Nagrinęjant vėjo greičio sezoninę dinamiką nustatyta, kad visuose tirtuose regionuose vėjo greitis mažiausias šiltuoju periodu (pavasari - vasarą), o didžiausias šaltuoju periodu (rudenį - žiemą). Tai susiję su procesais atmosferos pasienio sluoksnyje įvairiais metų laikais. Vasarą saulė labiau įšildo žemės paviršių, dėl to šilumos srautas nuo jo į atmosferą yra intensyvesnis nei žiemą, tai sąlygoja daug didesnę vėjo greičio kitimą paros bėgyje.

Tai patvirtina duomenys pateikti 29 pav. Nustatyta, kad vidutinio vėjo greičio kitimas per parą priklauso nuo metų laiko: vasarą dienos metu vėjo greitis didesnis nei naktį, o žiemą visą parą vėjo greitis kinta santykinai mažai (29 pav.)



29 pav. Paros vėjo greičio dinamika (matavimo prie Tauragės duomenys, aukštis 43 m)

Vėjo greičio priklausomybės nuo aukščio, visiems trims matavimo regionams, pateiktos 30 pav.



30 pav. Vidutinio vėjo greičio, išmatuoto prie Vilkyčių, Kretingos ir Tauragės, priklausomybė nuo aukščio.

Didžiausias greitis ir greičiausias jo kitimas didėjant aukščiui gautas prie Vilkyčių, o mažiausias prie Kretingos. Tauragės regionui gauta, kad iki 80 m aukščio vėjo greitis yra didesnis už greitį ties Kretinga ir Vilkyčiais, o virš 80 m vėjo greitis pasidaro mažesnis už

greitį ties Vilkyčiais. Taip galėjo atsitikti, dėl nevienodo skirtingų regionų reljefo ir paviršiaus šiurkštumo ar vietinių kliūčių įtakos.

3.6. Vėjo elektrinių vidutinės metinės energijos gamybos įvertinimas

Vėjo energijos išteklių skaičiavimo pagrindinė paskirtis yra naujų VE parkų įrengimo vietovių planavimas. Dėl šios priežasties buvo apskaičiuotas ir lyginamas pasirinktų VE tipų (E – 40 ir E -48, kurių nominali galia siekia atitinkamai 600 ir 800 kW) vidutinis metinis pagaminamos energijos kiekis. Pasirinktos būtent šio tipo vėjo jėgainės, kadangi yra žinomos šių jėgainių eksperimentinės galios kreivės (šių VE techninės charakteristikos pateiktos 3 priede).

VE metinis pagaminamos energijos kiekis apskaičiuotas, pasinaudojant vėjo greičio matavimo duomenis, pagal formulę [20]:

$$W = \int_0^{\infty} \left(\frac{k}{A}\right) \left(\frac{u}{A}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{u}{A}\right)^k} P(u) du; \quad (3.13)$$

čia W – metinis energijos kiekis, A ir k – Weibull'o dydžio ir formos parametrai, u – vėjo greitis; $P(u)$ – VE galios kreivė.

Šiam integralui apskaičiuoti buvo sukurta MATLAB programa (4 priedas), kurioje taikyti integralo skaičiavimo trapecijų metodu skaitmeniniai metodai.

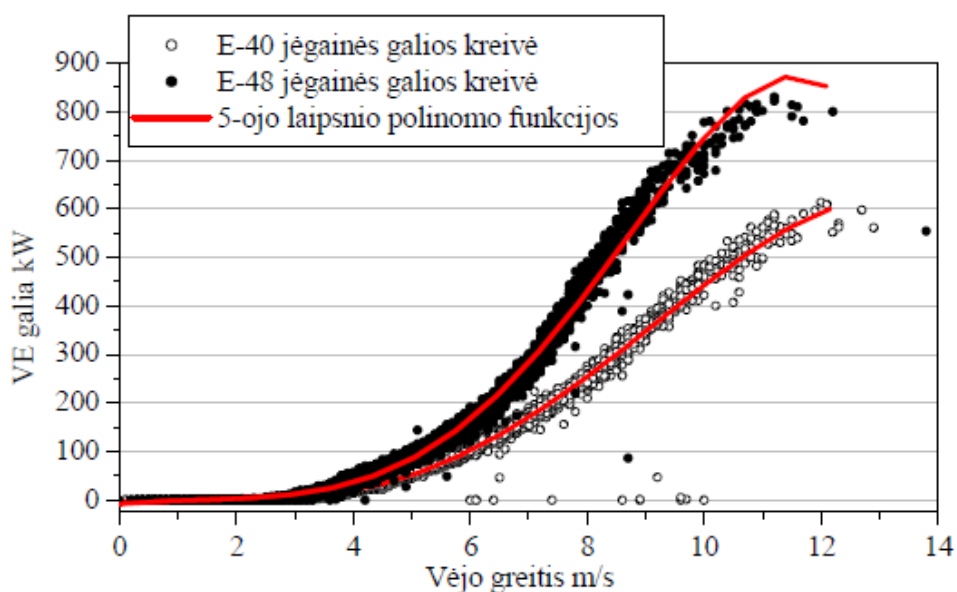
Galios kreivių sudarymui naudoti kiekvienos VE vėjo greičio ir VE galios matavimo duomenys kas (10 min. vidurkiai). VE galios kreivei aproksimuoti naudotas 5 – ojo laipsnio polinomas [5]:

$$y = a + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 + b_4x^4 + b_5x^5; \quad (3.14)$$

čia y – priklausomas kintamasis (VE galia); x – nepriklausomas kintamasis (vėjo greitis); a ir b – statistiniai funkcijos parametrai. Polinomo koeficientai pateikti 9 lentelėje, apskaičiuoti mažiausių kvadratų metodu (31 pav.).

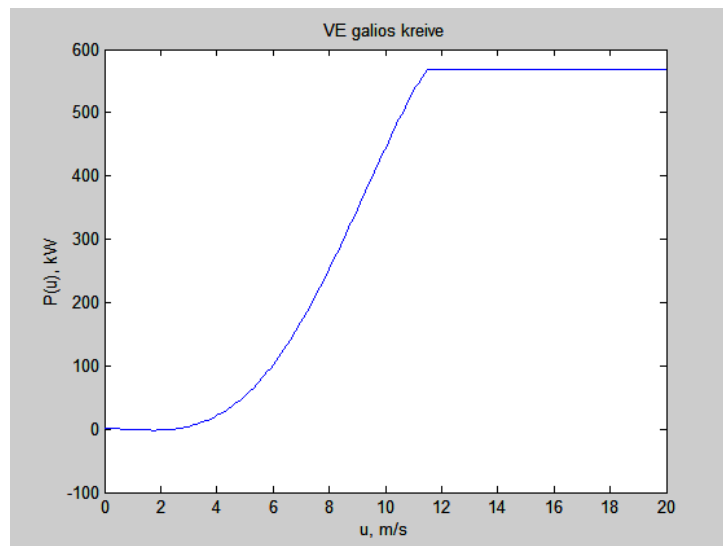
9 lentelė. Polinomo koeficientai.

Polinomo koeficientai	Jėgainės tipas	
	E – 40	E – 48
a	-0,00406	-0,01805
b ₁	0,02212	0,25069
b ₂	0,83648	0,39384
b ₃	-2,00805	-4,57645
b ₄	-0,76066	11,76145
b ₅	1,085	-8,99121



31 pav. Vėjo elektrinių E – 40 ir E -48 galios kreivės [5].

Polinomu buvo aproksimuojama galios kreivės dalis iki maksimumo (apie 11,5 m/s vėjo greičio) ir toliau didėjant vėjo greičio reikšmėms, polinomo funkcija pakeičiama tiese, kol pasiekiamas maksimalus leistinas vėjo greitis (20 m/s) (32 pav.) (kitos galios kreivės pateiktos 5 priede).



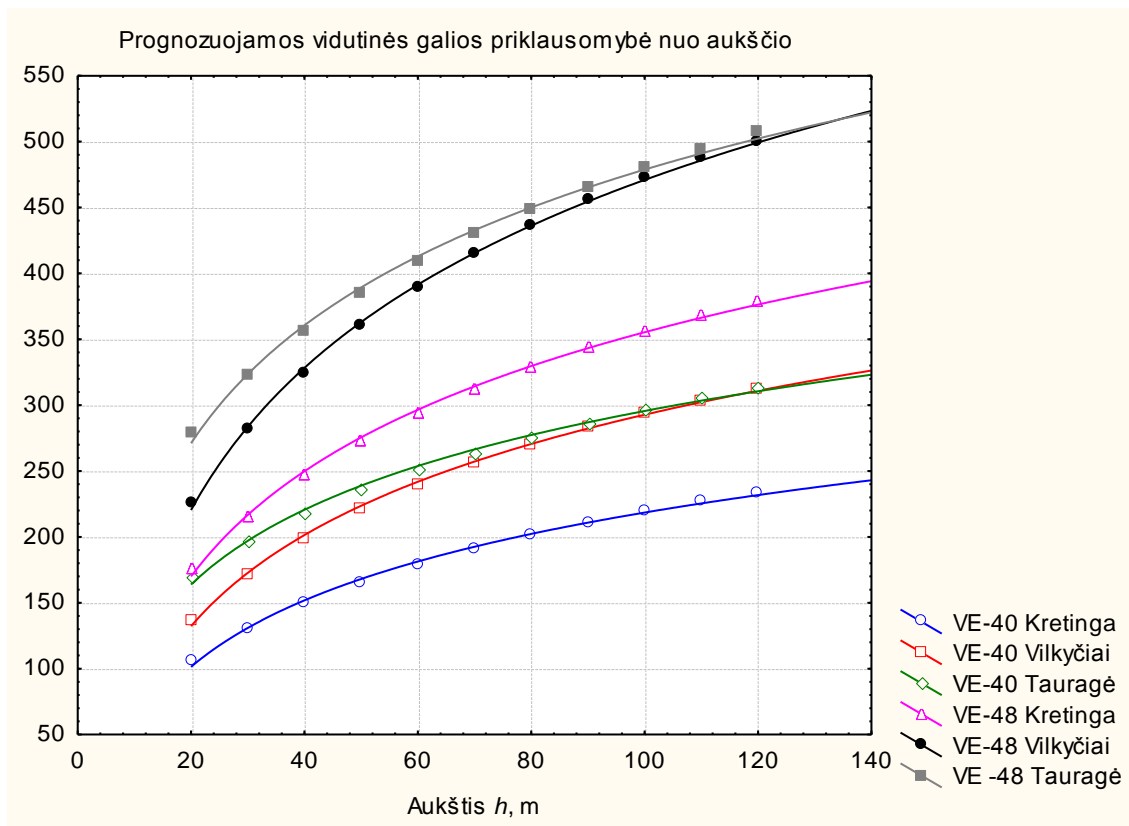
32 pav. Vėjo jėgainės, prie Tauragės, VE – 40 galios kreivė

Remiantis vidutinio vėjo greičio matavimo duomenimis prie Kretingos, Vilkyčių ir Tauragės apskaičiuotas prognozuojamas VE – 40 ir VE – 48 metinis pagaminamos energijos kiekis.

10 lentelė. Prognozuojamas vėjo jėgainių VE – 40 ir VE – 48 metinis energijos kiekis skirtinguose aukščiuose

Aukštis <i>h</i> , m	E – 40 jėgainės prognozuojama vidutinė galia <i>P</i> , kW			E – 48 jėgainės prognozuojama vidutinė galia <i>P</i> , kW		
	Kretinga	Vilkyčiai	Tauragė	Kretinga	Vilkyčiai	Tauragė
20	105.43	136.74	169.16	175.56	226.06	278.71
30	130.27	171.45	196.51	215.66	281.61	322.58
40	149.72	198.77	217.99	246.82	324.80	356.79
50	165.76	221.19	235.72	272.33	360.01	384.90
60	179.38	240.13	250.94	293.89	389.55	408.90
70	191.24	256.34	264.32	312.57	414.69	429.92
80	201.68	270.44	276.233	328.94	436.46	448.55
90	211.02	282.85	286.96	343.55	455.52	465.25
100	219.40	293.81	296.71	356.61	472.29	480.39
110	227.02	303.63	305.72	368.46	487.26	494.34
120	233.94	312.42	314.00	379.19	500.61	507.11
130	240.35	320.35	321.71	389.11	512.60	518.97
140	246.24	327.49	328.86	398.19	523.37	529.93
150	251.68	333.95	335.57	406.59	533.08	540.19
160	256.78	339.82	341.94	414.44	541.88	549.90
170	261.55	345.16	347.91	421.77	549.84	558.99
180	265.97	350.05	353.54	428.53	557.12	567.54
190	270.11	354.46	358.88	434.87	563.67	575.64
200	273.99	358.56	363.94	440.79	569.72	583.27

Gauti rezultatai rodo, kad skirtinguose vietovėse vėjo jėgainių pagaminamos metinis energijos kiekis skiriasi. Palankiausias sąlygos vėjo jėgainėms statyti yra Tauragėje, nes apskaičiuotas metinis energijos kiekis, šioje vietovėje yra didžiausias (33 pav.)



33 pav. prognozuojamos vidutinės galios priklausomybė nuo aukščio.

Iš prognozuojamos vidutinės galios grafiko matyti, prognozuojamas pagamintas metinis energijos kiekis yra didžiausias Tauragės regionui, o mažiausias Kretingos regionui. Kretingoje pagamintos VE energijos kiekis skiriasi nuo Tauragėje pagaminto energijos kiekio apie 30 % ir aukščiui didėjant šis skirtumas auga. Vilkyčiuose prognozuojamas VE pagamintos energijos kiekis nedaug mažesnis už Tauragės. Skirtumas didžiausias mažam aukščiui, o aukščiui augant skirtumas mažėja. Pastebėti VE pagamintos energijos kiekio priklausomybės nuo aukščio dėsningumai skirtingiems regionams vienodi abiejų tipų jėgainėms E-40 ir E-48.

IŠVADOS

1. Atlikus Lietuvos pajūrio regionų (Kretingos, Vilkyčių) vėjingumo sąlygų analizę, nustatyta, kad vidutinis vėjo greitis abiejuose Lietuvos pajūrio regiono vietose skiriasi apie 20 %. 100 m aukštyje vidutinis vėjo greitis prie Kretingos 7,18 m/s ir prie Vilkyčių 8,68 m/s.
2. Prie Tauragės, kuri yra toliau nuo jūros, vidutinis vėjo greitis 100 m aukštyje siekia 8,48 m/s ir yra artimas vėjo greičiui ties Vilkyčiais. Sąlygos vystyti vėjo energetikai yra tokios pat palankios kaip ir pajūrio regione.
3. Iš vėjų rožių nustatyta, kad visose trijose vietovėse vyrauja vakarų – pietvakarių vėjo kryptys.
4. Atlikus statistinę vidutinio vėjo greičio analizę nustatyta, kad vidutinis vėjo greitis didžiausias šaltuju metų periodu, o mažiausias - šiltuoju periodu. Šiais periodais skiriasi ir paros laikotarpio vėjo greičio kitimas. Nustatyta, kad vasarą dienos metu vėjo greitis didesnis nei naktį, o žiemą visą parą vėjo greitis svyruoja nežymiai.
5. Apskaičiavus vidutinį vėjo greitį skirtingiems aukščiams, visuose trijuose regionuose, įvertinta dviejų tipų jėgainių (VE – 40 ir VE - 48) metinis pagaminamos energijos kiekis. Gauti rezultatai parodė, kad daugiausia prognozuojamos energijos pagaminama Tauragės ir Vilkyčių vietovėse, o mažiausiai (iki 30 %) prie Kretingos.
6. Vėjo energijos kitimo dėsningumų skaičiavimai leidžia tiksliau įvertinti perspektyvias vietoves vėjo energetikos plėtrai ir numatyti būsimų vėjo jėgainių pagaminamos energijos kiekį.

LITERATŪRA

1. Kytra S. Atsinaujinantys energijos šaltiniai. Kaunas, 2006.
2. Stull R. B. An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Kluwer Academic: Dordrecht. 1988.
3. Hogström U. Non-dimensional wind and temperature profiles in the atmospheric surface layer: A re-evaluation. Boundary Layer Meteorology, 1988.
4. Badger, J. et al. Report on the use of stability parameters and mesoscale modeling in short-term prediction: report. Wind Energy Department, Riso National Laboratory, Technical University of Denmark. Roskilde, Denmark, 2007.
5. Marčiukaitis M. Vėjo energijos tyrimai, modeliavimas ir prognozė. Daktaro disertacija. Kaunas, 2009.
6. Hojstrup, J. et al. Full Scale Measurements in Wind-Turbine Arrays. Department of Meteorology and Wind Energy, Riso National Laboratory, Technical University of Denmark. Roskilde, Denmark, 1993.
7. Birgiolas E., Katinas V. Vėjo srauto parametrų kitimo dėsningumų tyrimas Lietuvos pajūryje [žiūrėta 2009-12-10]. Prieiga per internetą:
<http://images.katalogas.lt/maleidykla/Ener62/Ener029_033.pdf>.
8. Marčiukaitis M. Vėjo elektrinių galios prognozavimo galimybės Lietuvoje [žiūrėta 2010-04-23]. Prieiga per internetą:
<http://images.katalogas.lt/maleidykla/Ener73/Ener_072_076.pdf>.
9. Katinas V. Energijos gamybos apimčių iš atsinaujinančių energijos išteklių 2008-2025 m. studijos parengimas [žiūrėta 2010-05-20]. Prieiga per internetą:
<http://lsta.lt/files/studijos/2007/21_AEI_studija.pdf>.
10. Katinas V., Markevičius A., Burlakovas A. Vėjo energetika ir jos artimiausia perspektyva Lietuvoje [žiūrėta 2010-01-25]. Prieiga per internetą:
<http://images.katalogas.lt/maleidykla/Ener63/Ener067_076.pdf>.
11. Katinas V., Tumosa A. Vėjo energijos panaudojimo galimybės Lietuvoje. Vilnius, 1995.
12. Paulauskas A., Tamonis M. Vėjo energetikos plėtros techninio ir ekonominio pagrindimo patikslinimas [žiūrėta 2009-12-05]. Prieiga per internetą:
<http://images.katalogas.lt/maleidykla/Ener73/Ener_024_032.pdf>.
13. Informacija apie vėjo jėgainių tipus [žiūrėta 2010-05-27]. Prieiga per internetą:
<<http://thesolarguide.com/wind-power/turbine-types.aspx>>.

14. Informacija apie vėjo jėgaines [žiūrėta 2010-05-27]. Prieiga per internetą: <http://www.jegaines.lt/index.php?lang=lt&page=apie_jegaines>.
15. Informacija apie vėjo jėgainių pranašumus ir trūkumus [žiūrėta 2010-05-27]. Prieiga per internetą: <<http://www.vejojegaines.info>>.
16. Informacija apie vėjo jėgainių tipus [žiūrėta 2010-05-27]. Prieiga per internetą: <<http://energijaplus.lt/lt/vejo-jegainiu-tipai>>.
17. Work, energy and power. 2008.10.24 [žiūrėta 2010-05-29]. Prieiga per internetą: <<http://www.petervaldivia.com/technology/energy/wind-energy.php>>.
18. Petrauskas G. Modernių vėjo jėgainių savybės ir plėtojimo perspektyvos. Energetika, 2001, Nr. 1.
19. Lankauskas A. Kaip pačiam pasigaminti modernią Saulės ir vėjo jėgainę. Šiauliai, 2008.
20. Troen I., Petersen E. L. European wind atlas. Riso National Laboratory, Technical University of Denmark. Roskilde, Denmark, 1989.
21. Petersen E. L. et.al. Wind Power Meteorology. Part I: Climate and Turbulence. Wind Energy, 1998.
22. Katinas V., Markevičius A. Vėjo energijos išteklių ir stebėjimo postų kūrimas Lietuvoje. Energetika, 2001, Nr. 2.
23. Informacija apie vėjo jėgainių technines charakteristikas [žiūrėta 2010-04-07]. Prieiga per internetą: <http://enercon.de/en/_home.htm>.

PIEDAI

1. Sezoninės vidutinio vėjo greičio histogramos ir jas aproksimuojanti Weibull'o skirstinio funkcija.
2. Sezoninis vėjo krypties kitimas, pavaizduotas vėjų rožėmis.
3. Vėjo jėgainių techninės charakteristikos.
4. MATLAB programa skirta apskaičiuoti VE metiniam energijos kiekiui.
5. Vėjo jėgainių galios kreivės.
6. Magistro darbo elektroninė versija (CD).