



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

**Vėju varomos rotorinės transporto priemonės tyrimas**  
Baigiamasis magistro projektas

---

**Andrius Šimeliūnas**  
Projekto autorius

**Doc. dr. Ramūnas Skvireckas**  
Vadovas

---

**Kaunas, 2022**



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

**Vėju varomos rotorinės transporto priemonės tyrimas**  
Baigiamasis magistro projektas  
Transporto priemonių inžinerija (6211EX021)

---

**Andrius Šimeliūnas**

Projekto autorius

**Doc. dr. Ramūnas Skvireckas**

Vadovas

**Doc. dr. Robertas Keršys**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2022**



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas  
Andrius Šimeliūnas

## **Vėju varomos rotorinės transporto priemonės tyrimas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Andrius Šimeliūnas

*Patvirtinta elektroniniu būdu*



## Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Studijų programa – Transporto priemonių inžinerija (6211EX021)

# Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studentui *Andriui Šimeliūnui*

## 1. Baigiamojo projekto tema:

*Vėju varomos rotorinės transporto priemonės tyrimas*

*Research of a Wind-Powered Rotary Vehicle*

## 2. Projekto tikslas:

Atlikti vėju varomos rotorinės transporto priemonės modelio tyrimą

## 3. Projekto uždaviniai:

- 3.1. atlikti vėju varomų rotorinių transporto priemonių literatūros analizę;
- 3.2. atlikti vėju varomos transporto priemonės modelio teorinius skaičiavimus;
- 3.3. pagaminti vėju varomos rotorinės transporto priemonės natūrinį modelį;
- 3.4. atlikti eksperimentinį vėju varomos rotorinės transporto priemonės tyrimą.

## 4. Projekto aprašomosios dalies struktūra:

- 4.1. vėju varomų rotorinių transporto priemonių vystymosi istorija ir patentų analizė;
- 4.2. „Blackbird“ projektas, rekordai;
- 4.3. pagrindiniai vėju varomos rotorinės transporto priemonės komponentai.

## 5. Projekto konsultantai:

Dr. Martynas Lendraitis

Baigiamojo projekto autorius	Andrius Šimeliūnas	2020-10-09
	<i>(vardas, pavardė, data)</i>	
Baigiamojo projekto vadovas	Doc. dr. Ramūnas Skvireckas	2020-10-09
	<i>(pareigų sutrumpinimas, vardas, pavardė, data)</i>	
Krypties studijų programų vadovas	Doc. Saulius Japertas	2020-10-09
	<i>(pareigų sutrumpinimas, vardas, pavardė, data)</i>	

Šimeliūnas, Andrius. Vėju varomos rotorinės transporto priemonės tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Ramūnas Skvireckas; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Transporto inžinerija (E12), Inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: vėju varoma, rotorinė, tyrimas, orasraigtis.

Kaunas, 2022. 60 p.

## **Santrauka**

Magistro baigiamajame projekte analizuota vėju varomų rotorinių transporto priemonių istorija, pagrindiniai patentai įtakoję šio sektoriaus vystymąsi bei pagrindiniai technologiniai protrūkiai įtakoję šių transporto priemonių efektyvumo augimą. Aptarti pagrindiniai vėju varomos rotorinės transporto priemonės komponentai, jų teigiamybės ir neigiamybės.

Analizuoti du skirtingi vėjo energija varomos sausumos transporto priemonės judėjimo variantai: prieš vėją ir pavėjui. Apskaičiuotas rato apsisukimo skaičius prie tam tikro transporto priemonės modelio greičio, riedėjimo ir aerodinaminio pasipriešinimo jėgos. Apskaičiuotas orasraigčio efektyvumas, atliktas analitinis tyrimas siekiant išsiaiškinti kokių sąlygų reikia modeliui pasiekti didesnę už vėjo greitį trimis skirtingais atvejais: modeliui judant iki vėjo greičio, vėjo greičiu, virš vėjo greičio. Atlikti trys skirtingi skaičiavimai kuriais remiantis gauti pradiniai vėju varomos rotorinės transporto priemonės parametrai su kuriais būtų įmanoma viršyti vėjo greitį. Projektuojant vėju varomą rotorinę transporto priemonę atlikti analitiniai skaičiavimai, kuriais nustatyti grynosios traukos jėgos ir pasipriešinimo jėgų balansai, jais remiantis nubraižyti grafikai apibūdinantys dviejų skirtingų modelių maksimalius pasiekiamus greičius prie tam tikrų parametrų.

Projektuoti du skirtingi modeliai, detaliai palyginti jų komponentų skirtumai bei pagrindiniai parametrai, sudaryta vieno iš modelio detalių išsklotinė, pagrįstas detalių pasirinkimas. Projektuotas reguliuojamo žingsnio propeleris, kuriuo siekta efektyviau išnaudoti turimas priemonės eksperimentui įgyvendinti. Atliktas eksperimentinis tyrimas su siekiu nustatyti projektuojamų modelių gebėjimą viršyti vėjo greitį. Priimta išvada dėl vėju varomų rotorinių sausumos transporto priemonių gebėjimo išvystyti didesnę nei jas varančio vėjo greitį. Analizuoti teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatai ir padarytos išvados dėl jų rezultatų.

Šimeliūnas, Andrius. Research of a Wind-Powered Rotary Vehicle. Masters's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. Ramūnas Skvireckas; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Transport Engineering (E12), Engineering Science.

Keywords: wind-powered, rotary, research, propeller.

Kaunas, 2022. 60 p.

### **Summary**

The master's thesis analyzes the history of wind-powered rotary vehicles, the main patents that have influenced the development of this sector and the main technological outbursts that have influenced the growth of the efficiency of these vehicles. The main components of a wind-powered rotary vehicle, their positives and negatives are discussed.

Two different variants of the movement of a wind-powered land vehicle were analyzed: upwind and downwind. The wheel speed at the speed, rolling and aerodynamic drag of a given vehicle model is calculated. The efficiency of the propeller was calculated, and a theoretical study was performed to find out what conditions the model needs to achieve higher than the wind speed in three different cases: when the model moves to wind speed, wind speed, above wind speed. Three different calculations were performed to obtain the initial parameters of a wind-powered rotary vehicle that would allow the wind speed to be exceeded. In the design of a wind-powered rotary vehicle, theoretical calculations were performed to determine the balances of net forces and drag forces, based on which the graphs describing the maximum achievable speeds of two different models at certain parameters were drawn.

Two different models were designed, the differences of their components and the main parameters were compared in detail, a layout of one of the model details was made, and the choice of details was based. An adjustable pitch propeller was designed to make more efficient use of the available tools to implement the experiment. An experimental study was conducted to determine the ability of the designed models to exceed the wind speed. A conclusion has been reached on the ability of wind-powered rotary land vehicles to develop wind speeds higher than those driving them. The results of theoretical and experimental research are analyzed and conclusions are drawn about their results.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>9</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>10</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>12</b>
<b>1. Literatūros apžvalga .....</b>	<b>13</b>
1.1. Vėju varomos rotorinės transporto priemonės sąvoka .....	13
1.2. Vėju varomų rotorinių transporto priemonių vystymosi istorija ir patentų analizė .....	13
1.3. „Blackbird“ projektas, rekordai .....	18
1.4. „The Inventus Ventomobile“ .....	20
1.5. „Racing Aeolus“ varžybos .....	20
1.6. Pagrindiniai vėju varomos rotorinės transporto priemonės komponentai .....	23
1.6.1. Rotorius (orasraigtis) .....	23
1.6.2. Mechaninė perdava.....	25
1.6.3. Korpusas (kėbulas) ir važiuoklė .....	26
1.6.4. Vairavimo mechanizmas ir stabdžių sistema .....	26
<b>2. Tiriamoji dalis.....</b>	<b>27</b>
2.1. Transporto priemonės judėjimo kryptis – pavėjui.....	27
2.2. Transporto priemonės judėjimo kryptis – prieš vėją .....	27
2.3. Bendroji sąlyga .....	28
2.4. Ratų apsisukimai .....	28
2.5. Riedėjimo pasipriešinimo jėga .....	30
2.6. Aerodinaminis pasipriešinimas .....	31
2.6.1. Analitinis tyrimas .....	32
2.6.2. Skaitinis tyrimas .....	35
2.7. DDFTTW (Direct downwind faster than the wind) sąlyga ir detalus analitinis tyrimas.....	37
2.8. Propelerio efektyvumas .....	39
2.9. Grynoji traukos jėga modelio greičiui pasiekus vėjo greitį.....	40
2.10. DDFTTW transporto priemonės optimizavimo parametrai .....	40
2.11. Grynosios traukos jėgos ir pasipriešinimo jėgų balansas .....	41
2.12. DDFTTW transporto priemonės maksimalus greitis .....	42
2.13. Supaprastintas skaičiavimas, siekiant išpildyti DDFTTW sąlygą.....	43
2.14. Rato perimetro ir orasraigčio žingsnio santykis .....	46
<b>3. Natūrinių modelių gamyba.....</b>	<b>47</b>
3.1. Pirmasis modelis.....	47
3.1.1. Pirmojo modelio reguliuojamo žingsnio orasraigtis.....	49
3.1.2. Pirmojo modelio mechaninė perdava .....	49
3.2. Antrasis modelis .....	50
3.2.1. Antrojo modelio orasraigčiai .....	52
3.2.2. Antrojo modelio mechaninė perdava.....	53
<b>4. Eksperimentinis tyrimas .....</b>	<b>54</b>
4.1. Eksperimentinio tyrimo sąlygos: .....	54
4.2. Eksperimentinio tyrimo objektas.....	55
4.3. Eksperimento eiga .....	55
<b>Išvados .....</b>	<b>57</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>58</b>

<b>Priedai.....</b>	<b>61</b>
1 priedas. Pirmojo modelio analitiniai skaičiavimai „Microsoft Excel“ programoje .....	61
2 priedas. Antrojo modelio analitiniai skaičiavimai „Microsoft Excel“ programoje .....	62
3 priedas. Pirmojo modelio analitiniai skaičiavimai „Microsoft Excel“ programoje, grafiko sudarymui .....	63
4 priedas. Antrojo modelio analitiniai skaičiavimai „Microsoft Excel“ programoje, grafiko sudarymui .....	64
5 priedas. Pirmojo ir antrojo modelio santykinio greičio priklausomybės grafikai .....	65
6 priedas. Pirmojo modelio skaitinio tyrimo rezultatai .....	66
7 priedas. Antrojo modelio skaitinio tyrimo rezultatai.....	67



## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Riedėjimo pasipriešinimo koeficientai [27] .....	31
<b>2 lentelė.</b> Minimali $LD_{min}$ reikšmė naudojant 30 mm spindulio ratus ir skirtingų ilgių orasraigčius	44
<b>3 lentelė.</b> Minimali $LD_{min}$ reikšmė naudojant 40 mm spindulio ratus ir skirtingų ilgių orasraigčius	44
<b>4 lentelė.</b> Minimali $LD_{min}$ reikšmė naudojant 50 mm spindulio ratus ir skirtingų ilgių orasraigčius	44
<b>5 lentelė.</b> Minimali $LD_{min}$ reikšmė naudojant 65 mm spindulio ratus ir skirtingų ilgių orasraigčius	45
<b>6 lentelė.</b> Minimali $LD_{min}$ reikšmė naudojant 80 mm spindulio ratus ir skirtingų ilgių orasraigčius	45
<b>7 lentelė.</b> VSR apskaičiavimas .....	46
<b>8 lentelė.</b> Pirmojo eksperimentinio modelio pagrindiniai parametrai .....	47
<b>9 lentelė.</b> Pirmojo eksperimentinio modelio išsami detalių informacija.....	48
<b>10 lentelė.</b> Antrojo eksperimentinio modelio pagrindiniai parametrai .....	51
<b>11 lentelė.</b> Antrojo eksperimentinio modelio išsami detalių informacija .....	51
<b>12 lentelė.</b> Antrojo eksperimentinio modelio orasraigčių parametrai .....	52
<b>13 lentelė.</b> „BT14“ bėgimo takelio charakteristikos .....	54
<b>14 lentelė</b> Skirtingų orasraigčių ir ratų porų komponuočių eksperimentinių tyrimų rezultatai .....	56

## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> Vėju varoma rotorinė transporto priemonė „Racing Aeolus“ varžybose [1] .....	13
<b>2 pav.</b> G. v. Vigevan‘o mechanizmo brėžiniai [3] .....	14
<b>3 pav.</b> U. Alertz‘o vėju varomo karo vagono modelis [2] .....	14
<b>4 pav.</b> 1798 m. Prancūzijos propaganda siekiant įbauginti priešus [4] .....	15
<b>5 pav.</b> H. Helmeke‘o orasraigčių varomos valtys patento brėžiniai [5] .....	15
<b>6 pav.</b> G. Tust‘o propeleriu varomos valtys brėžinys [6] .....	16
<b>7 pav.</b> C. A Rettman‘o vėju varomo traktoriaus patentas [7] .....	16
<b>8 pav.</b> R. J Annis‘o vertikalios ašies propelerį turinčios vandens transporto priemonės brėžinys [8] .....	17
<b>9 pav.</b> A. Bauer‘io vėjo energija varomos sausumos transporto priemonės brėžinys [9] .....	17
<b>10 pav.</b> Vėju varoma transporto priemonė „Blackbird“ [12] .....	18
<b>11 pav.</b> „Blackbird“ schema su pagrindiniais mazgais, $D$ – propelerio skersmuo; $W$ – vėjo greitis; $V$ – transporto priemonės greitis; $F_p$ – propelerio traukos jėga; $F_t$ – transporto priemonės riedėjimo pasipriešinimo jėga [12] .....	19
<b>12 pav.</b> Studentų sukurta „Inventus Ventomobile“ transporto priemonė „Aeolus Racing“ varžybose [14] .....	20
<b>13 pav.</b> „Racing Aeolus“ varžybų dalyviai, 2019 metai [15] .....	21
<b>14 pav.</b> Didžiausi leistini transporto priemonės matmenys milimetrais „Racing Aeolus“ varžybose [15] .....	22
<b>15 pav.</b> „Chinook 9“ komanda nugalėjo, „Racing Aeolus“ varžybose 2019 metais [16] .....	22
<b>16 pav.</b> „Aeolus Racing“ varžybų trasos schemas. a) – transporto priemonėms nekaupiančioms energijos, b) – transporto priemonėms kurios kaupia energiją [15] .....	23
<b>17 pav.</b> Transporto priemonė su rotoriumi (orasraigčiu) turinčiu gaubtą [17] .....	24
<b>18 pav.</b> Horizontalios ir vertikalios ašies vėjo turbinos [18] .....	24
<b>19 pav.</b> Orasraigčių menčių tipai [19] .....	24
<b>20 pav.</b> Trijų krumpliaračių diržinė perdava su įtempimo guoliu [20] .....	25
<b>21 pav.</b> Grandininė perdava su dvejom žvaigždutėm .....	25
<b>22 pav.</b> Kūginių dantračių pora naudota eksperimentiniame modelyje .....	26
<b>23 pav.</b> „Unibody“ tipo automobilio kūbulas [25] .....	26
<b>24 pav.</b> Natūrinių „DDFTTW“ modelių izometriniai vaizdai, kairėje – pirmas natūrinis modelis, be mechaninės perdavos, dešinėje – antras natūrinis modelis (pilnai surinktas) .....	27
<b>25 pav.</b> Šešių vėju varomos rotorinės transporto priemonės parametų tarpusavio ryšys [26] .....	28
<b>26 pav.</b> Rato spindulio ir apsisukimų skaičiaus priklausomybė judant skirtingais greičiais .....	30
<b>27 pav.</b> Pirmojo modelio mėlyno fono pikselių skaičius programoje „GIMP“ .....	32
<b>28 pav.</b> Pirmojo modelio bendras mėlyno fono pikselių skaičius programoje „GIMP“ .....	33
<b>29 pav.</b> Antrojo modelio mėlyno fono pikselių skaičius programoje „GIMP“ .....	34
<b>30 pav.</b> Antrojo modelio bendras mėlyno fono pikselių skaičius programoje „GIMP“ .....	34
<b>31 pav.</b> Pirmojo modelio aerodinaminio pasipriešinimo simuliacija programoje „Solidworks“ .....	36
<b>32 pav.</b> Antrojo modelio aerodinaminio pasipriešinimo simuliacija programoje „Solidworks“ .....	36
<b>33 pav.</b> „DDFTTW“ modelio jėgos ir pagrindiniai komponentai. $W$ – vėjo greitis; $V$ – modelio greitis .....	37
<b>34 pav.</b> DDFTTW modelį veikiančios jėgos iš propelerio ir modelio perspektyvos. $V-W$ – greitis propelerio atžvilgiu; $V$ – greitis ratų atžvilgiu; $P_p$ – propelerio jėga velene; $P_t$ – galia varančiojoje ašyje; $F_t$ – riedėjimo pasipriešinimo jėga .....	37

<b>35 pav.</b> Pirmojo modelio santykinio greičio $VW$ priklausomybė nuo $C'_T$ , $\eta_{net}$ , $\eta_{swirl}$ , $C'r$ , $CDA'$ .....	42
<b>36 pav.</b> Antrojo modelio santykinio greičio $VW$ priklausomybė nuo $C'_T$ , $\eta_{net}$ , $\eta_{swirl}$ , $C'r$ , $CDA'$ .....	43
<b>37 pav.</b> $LD_{min}$ priklausomybė nuo propelerio diametro ir rato spindulio .....	45
<b>38 pav.</b> Pirmojo eksperimentinio modelio detalių išsklotinė .....	48
<b>39 pav.</b> Reguliuojamo žingsnio orasraigtis su fiksavimo vietomis „Solidworks“ programoje .....	49
<b>40 pav.</b> Reguliuojamo žingsnio orasraigtis pagamintas 3D spausdintuvu .....	49
<b>41 pav.</b> Pirmojo natūrinio modelio mechaninė perdava .....	50
<b>42 pav.</b> Antrojo natūrinio modelio propeleriai naudoti eksperimentinio tyrimo metu .....	52
<b>43 pav.</b> Eksperimentinio tyrimo metu naudotos ratų poros (rato spinduliai - 40, 50, 55, 60, 70 mm.) .....	52
<b>44 pav.</b> Antrojo natūrinio modelio mechaninė perdava .....	53
<b>45 pav.</b> Pirmojo modelio vaizdai iš galo ir šono (be orasraigčio) .....	55
<b>46 pav.</b> Antrojo modelio vaizdai iš galo ir šono (be orasraigčio) .....	55
<b>47 pav.</b> Pirmasis natūrinis modelis eksperimento metu .....	55
<b>48 pav.</b> Antrasis natūrinis modelis eksperimento metu .....	56

## Įvadas

Vėju varoma rotorinė transporto priemonė – tai transporto priemonė turinti rotorių (orasraigtį) kuris yra varomas vėjo energija, o pati transporto priemonė gali judėti įvairiose aplinkose (sausumoje, vandenyje, oro erdvėje).

Žvelgiant globaliau, dėl didėjančios žmonijos populiacijos, augančios pramonės, kasdien prastėjančios aplinkos užterštumo problemos, energijos gamybai su lig kiekvienais metais vis labiau telkiamas dėmesys į atsinaujinančiuosius energijos šaltinius. Iškastinis kuras sudaro didžiąją dalį mūsų gaunamos energijos, tačiau šiuo metu atsinaujinantieji energijos šaltiniai yra itin sparčiai vystomi, 2022 m. prognozuojama, kad jie sudarys apie 22 % bendros pasaulio elektros energijos gamybos ir augs po 1% artimiausiais ateinančiais metais. Nors skaičiai džiugina, vis dėl to transformacija nuo iškastinio kuro iki atsinaujinančiųjų energijos šaltinių užtruktų labai ilgai, dėl šios priežasties ieškoma kaip padidinti išgaunamos atsinaujinančios energijos gavybą ir kaip tai integruoti į kasdienį mūsų gyvenimą.

Dėl eksponentiškai didėjančio informacijos ir technologijų kiekio dabartiniame gyvenime sunku pastebėti, kad tam tikri atsinaujinantieji energijos šaltiniai vis dažniau įdiegiami mūsų namuose ir aplinkoje: saulės elektrinės ant namo stogo, gebančios maitinti elektrinius prietaisus, geoterminė energija šildanti namus, įvairiausios apšvietimo sistemos galinčios kaupti energiją visos paros metu, vėjo turbinos ir t.t. Dauguma šiuo metu naudojamų atsinaujinančiųjų energijos šaltinių prietaisų yra stacionarūs, tačiau technologijos tobulėja todėl artimiausioje ateityje šie įtaisai gali tapti daug mažesni bei našesni, kaip pavyzdys: telefonus galėsime įkrauti saulėtą dieną padėję juos ant stalo, automobilio kėbulai sugers saulės energiją bei šilumą nuo asfalto dangos vėliau šią energiją panaudodamas variklio darbui, vėjo energija laivuose bus panaudojama dar efektyviau taip padidinant burinių (galbūt ir rotorinių) laivų greitį.

**Darbo tikslas** – Atlikti vėju varomos rotorinės transporto priemonės modelio tyrimą

### **Darbo uždaviniai:**

1. atlikti vėju varomų rotorinių transporto priemonių literatūros analizę;
2. atlikti vėju varomos transporto priemonės modelio teorinius skaičiavimus;
3. pagaminti vėju varomos rotorinės transporto priemonės natūrinį modelį;
4. atlikti eksperimentinį vėju varomos rotorinės transporto priemonės tyrimą.

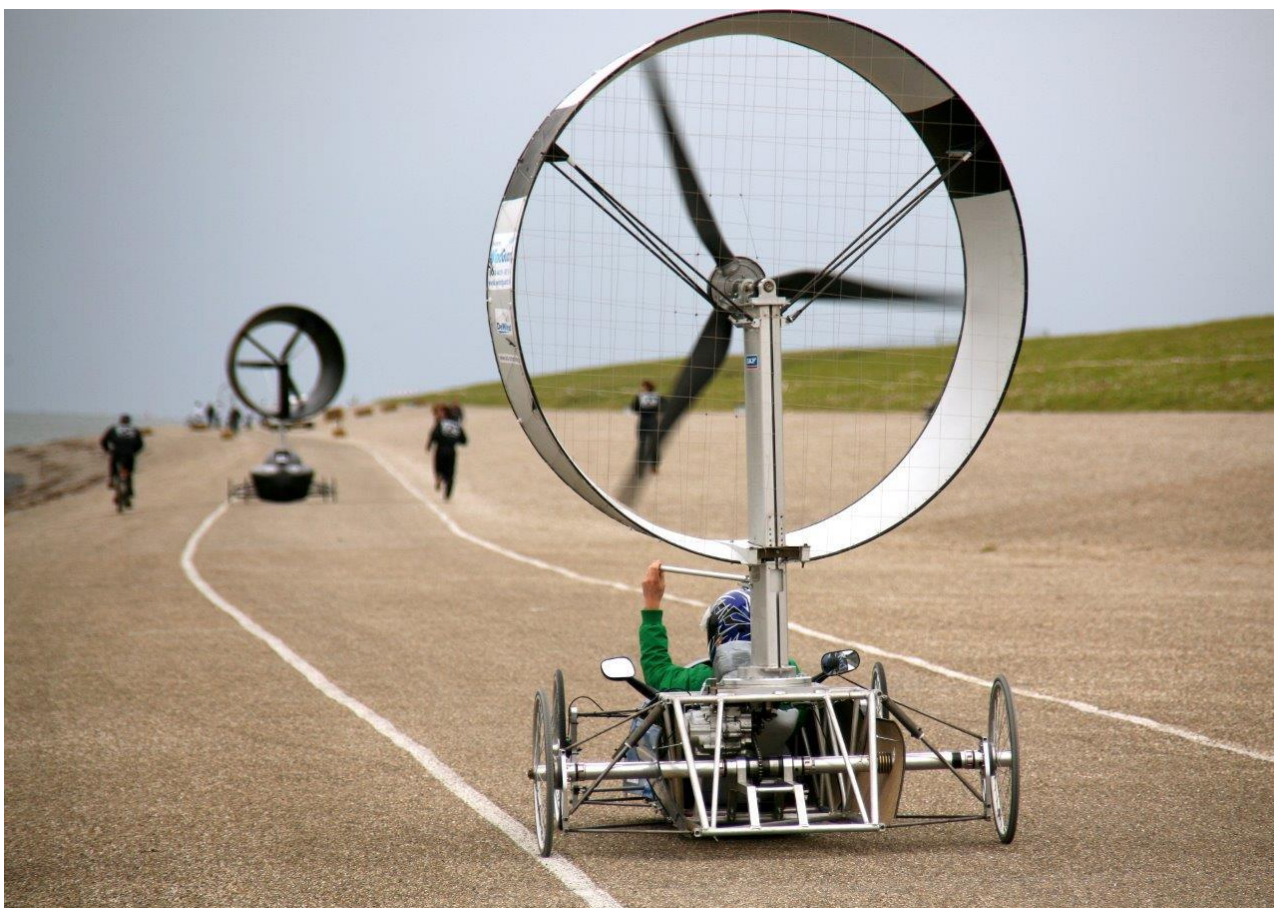
Šio darbo metu bus projektuojamas vėju varomos rotorinės transporto priemonės modelis, natūrinis modelis bus tiriamas teoriniu ir eksperimentiniu būdu, siekiant nustatyti kokių parametru modelis pasiekia ir viršija jį varančio vėjo greitį. Modelyje bus keičiami pagrindiniai komponentai turintys įtakos energijos panaudojimui – orasraigtis, ratai, mechaninė perdava. Gauti rezultatai bus palyginami ir iš jų padaryta galutinė išvada.

## 1. Literatūros apžvalga

Šiame skyriuje bus analizuojama vėju varomų rotorinių transporto priemonių vystymosi raida, jų tipai, patentai bei tendencijos, tam, kad būtų suprasta, koku tempu vystosi šios transporto priemonės, kokie komponentai jas išskiria iš kitų transporto priemonių ir kokios perspektyvos yra galimos ateityje. Skyriuje taip pat bus apžvelgti tokio tipo transporto priemonių pagrindiniai komponentai, varžybos bei dabartiniai rekordai.

### 1.1. Vėju varomos rotorinės transporto priemonės sąvoka

Vėju varomos rotorinės transporto priemonės – transporto priemonės, varomos vėjo energija bei naudojančios rotorius (orasraigtį) vietoje burių ar kito energijos šaltinio, rotorius priklausomai nuo konstrukcijos gali turėti arba neturėti gaubto aplink save ir gali orientuotis į atitinkamą vėjo kryptį arba būti statinis ir orientuotas tik viena kryptimi (žr. 1 pav.). Rotorius per mechanines perdavas gali būti tiesiogiai prijungtas prie ratų arba generatoriaus, kuris kaupiamą energiją tiekia varantiesiems ratams.

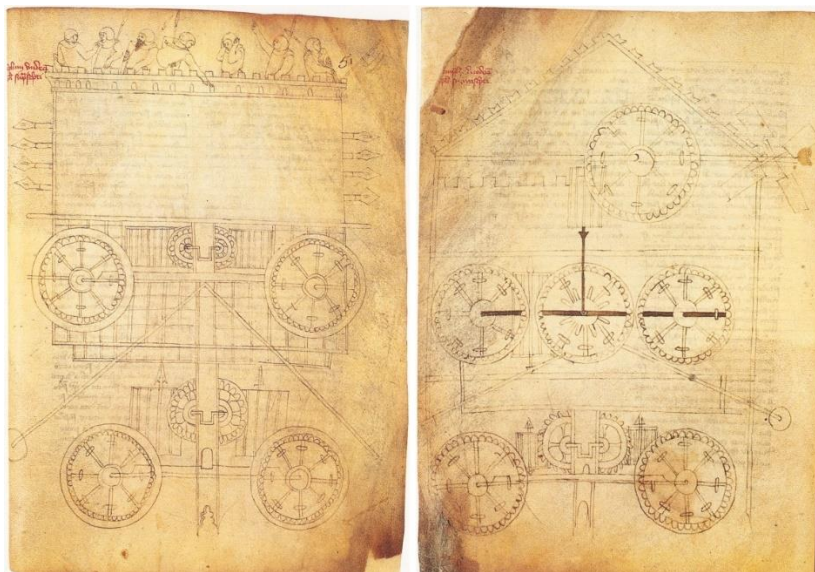


1 pav. Vėju varoma rotorinė transporto priemonė „Racing Aeolus“ varžybose [1]

### 1.2. Vėju varomų rotorinių transporto priemonių vystymosi istorija ir patentų analizė

Vėju varomų rotorinių transporto priemonių pirmtaku laikomas 1335 m. G. v. Vigevan'o (angl. *Guido von Vigevano*) nubraižytas mechanizmas kuris savo konstrukcijoje turėjo integruotą vėjo malūną varomą vėjo energijos. (žr. 2 pav.). Tuo metu vėjo energijai panaudoti, dėl savo konstrukcinio paprastumo, jau kurį laiką buvo naudojamos burės, tačiau tai nesustabdė mokslininko ieškoti

alternatyvių vėjo energijos panaudojimų būdų. Šio mechanizmo realaus dydžio modelis dėl nepastovių oro sąlygų ir lygių paviršių (kelių) nebuvimo taip ir nebuvo pagamintas, tačiau yra spekuliuojama, kad egzistavo mažesnio mastelio bandomasis modelis [2].



**2 pav.** G. v. Vigevan'o mechanizmo brėžiniai [3]

Istorikas U. Alertz'as (angl. *Ulrich Alertz*) remdamasis mokslininko G. v. Vigevan'o brėžiniais, atliko mechanizmo analizę ir sukūrė 8 metrų ilgio vėju varomo karo vagono skaitmeninį modelį (žr. 3 pav.), kuris, anot jo, su tobulesne perdavos sistema, vairavimo mechanizmo integravimu bei esant stipriam vėjui, tuo metu būtų galėjęs judėti plokščiose ir lygiose vietovėse [2].

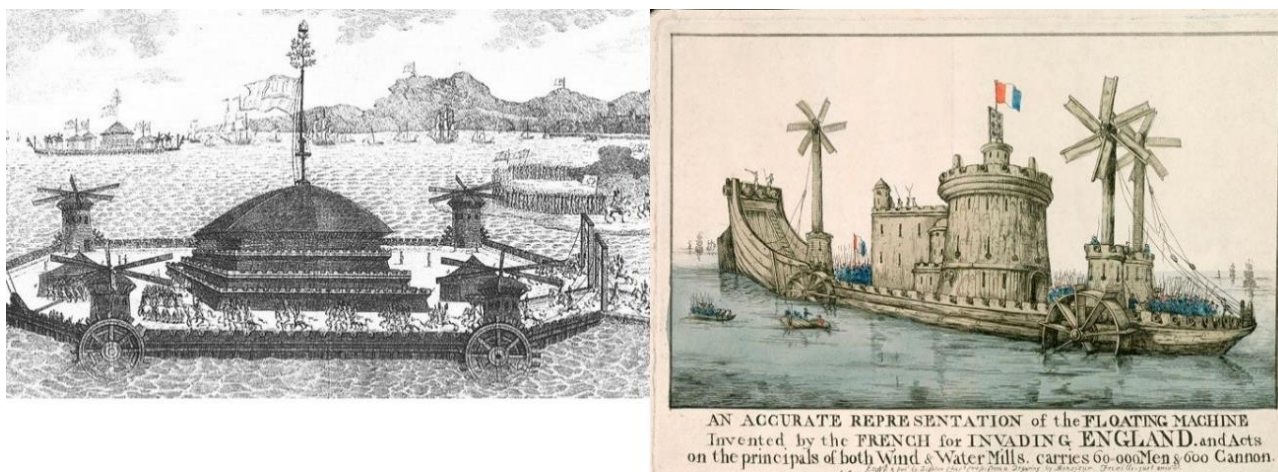


**3 pav.** U. Alertz'o vėju varomo karo vagono modelis [2]

Gerokai vėliau 18 amžiaus pabaigoje (1798 m.) tuometinio Prancūzijos lyderio N. Bonapart'o (angl. *Napoleon Bonaparte*) nurodymu siekiant dar labiau padidinti savo įtaką bei tuo pačiu įbauginti kitas Europos valstybes, buvo išleisti plaukiojančių pilių konceptai (žr. 4 pav.). Kartu su šiais konceptais buvo teigiama, kad šios plaukiančios pilys galėjo perkelti didžiulius kiekius karių (15000-60000) bei patrankų (500-600) siekiant užimti naujas teritorijas. Žinoma, visa tai tebuvo tuometinė propaganda

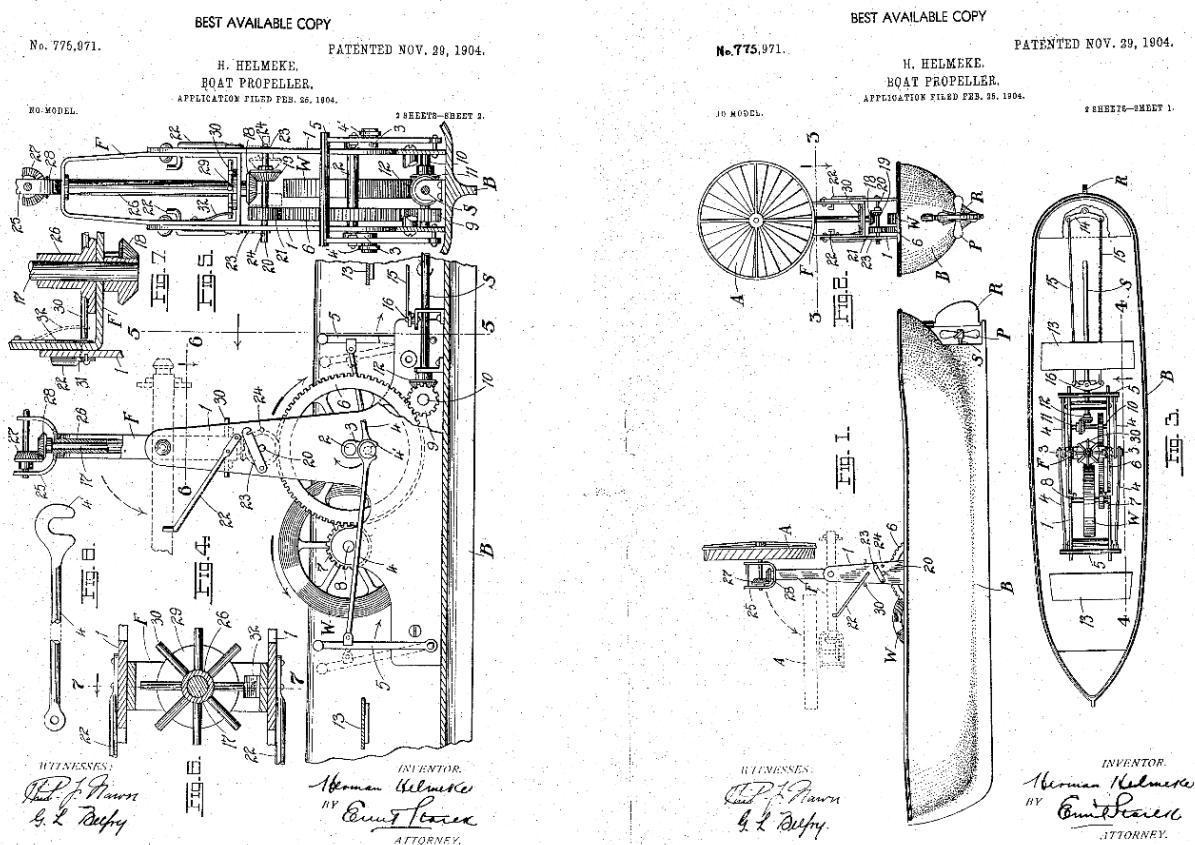


ir tokios plaukiojančios mašinos niekada nebuvo pradėtos gaminti. Sprendžiant iš paveikslo galima matyti, kad pagrindinis energijos šaltinis – vėjo energija, kurią priima orasraigčiai [4, 33].



4 pav. 1798 m. Prancūzijos propaganda siekiant įbauginti priešus [4]

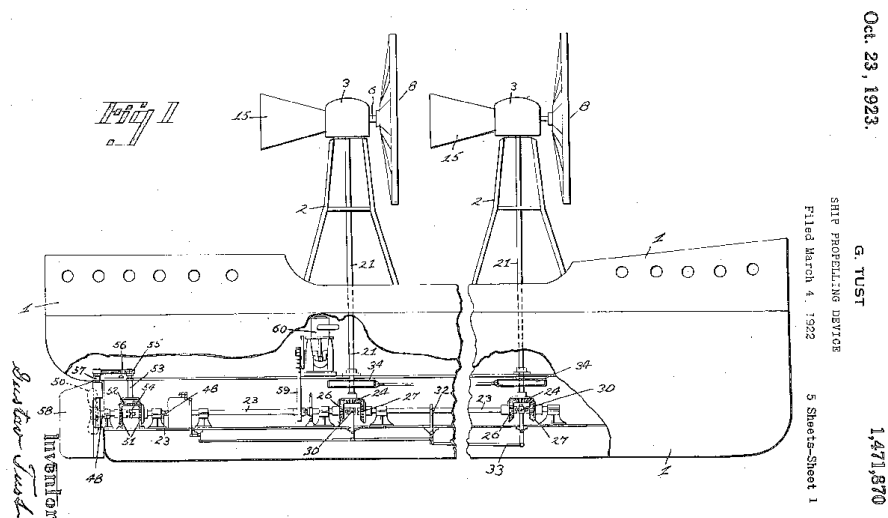
Kiek vėliau 1904 m. H. Helmeke'as (angl. *Herman Helmeke*) patentavo orasraigčių varomą valtį (žr. 5 pav.) Šiame patente orasraigčių ašis esanti horizontalioje pozicijoje galėjo sukis aplink vertikalią ašį, taip leidžiant generuoti energiją įvairiomis kryptimis. [5]



5 pav. H. Helmeke'o orasraigčių varomos valtys patento brėžiniai [5]

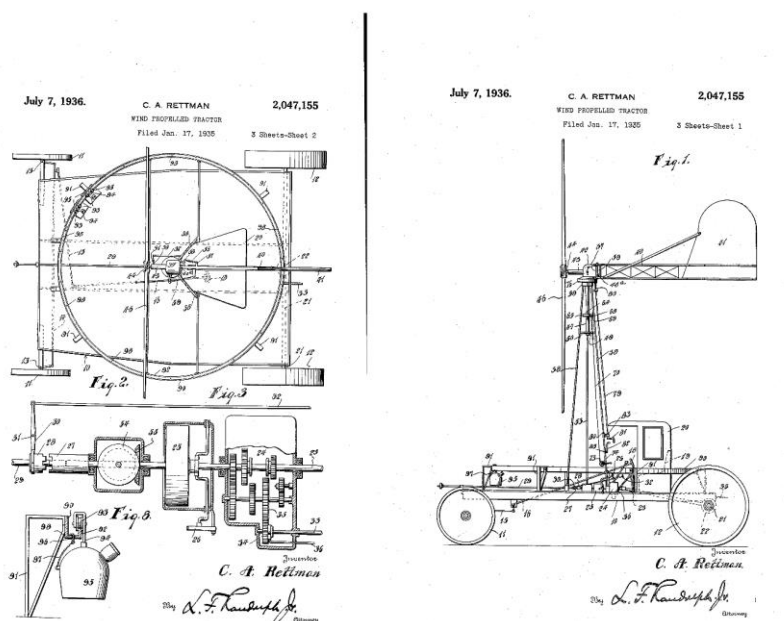
1922 m. kovą G. Tust'as (angl. *Gustav Tust*) patentavo dar vieną propelerių varomą valtį (žr. 6 pav.), šioji turėjo du orasraigčius kurių žingsnis galėjo būti keičiamas, šis patentas įgalino valtį judėti skirtingomis vėjo kryptimis bei efektyviau išnaudoti vėjo energiją, kadangi orasraigčių žingsnis

priklausomai nuo vėjo greičio ir krypties galėjo būti keičiamas į efektyvesnį (judėjimo pradžioje naudojamas mažas žingsnis, o įsibėgėjant didinamas) [6].



6 pav. G. Tust'o propelerių varomos valties brėžinys [6]

1935 m. C. A. Rettman'as (angl. *Carl A. Rettman*) patentavo pirmąjį pasaulyje vėju varomą traktorių (žr. 7 pav.), kuris iš principo laikomas pirmtaku moderniosioms vėju varomoms rotorinėms sausumos transporto priemonėms. Šioje transporto priemonėje orasraigčio ašis turi galimybę sukis aplink vertikalią ašį, todėl judėjimas tiek prieš vėją, tiek pavėjui yra galimas. [7]

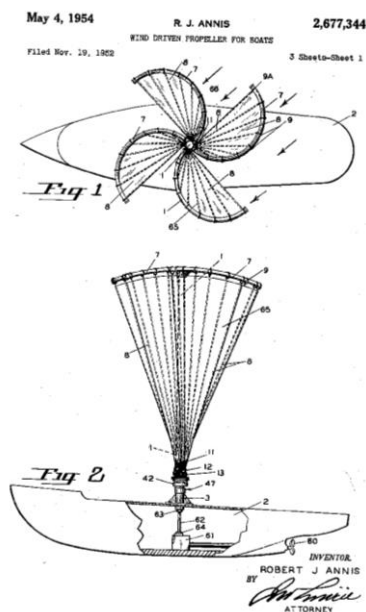


7 pav. C. A. Rettman'o vėju varomo traktoriaus patentas [7]

Vėliau vėju varomų transporto priemonių sektoriuje patentų sparčiai daugėjo, kiekviename iš jų atsiradavo vis modernesnės ir tobulesnės idėjos, skatinančios tokių transporto priemonių detalesnę tyrinėjimą bei vystymąsi.

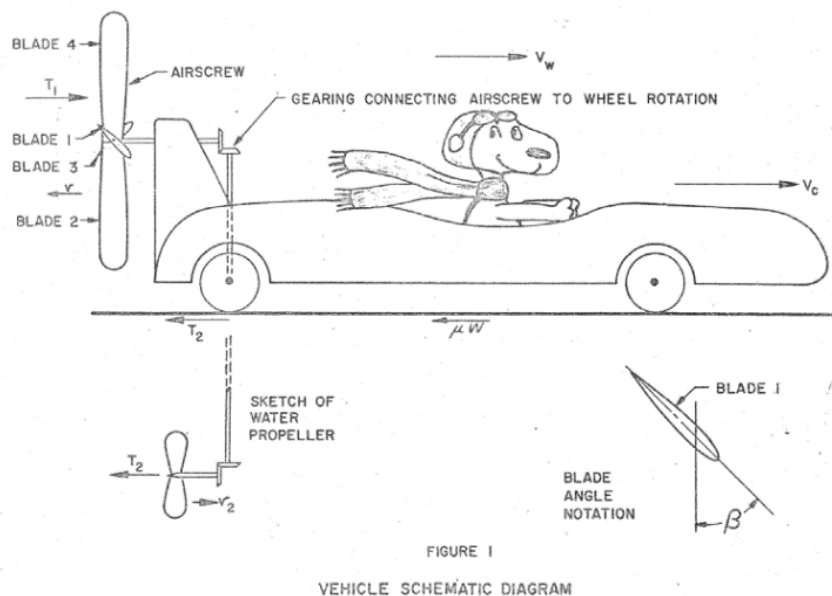


Vienas iš tokių patentų buvo 1952 m. R. J Annis'o (angl. *Robert J Annis*) patentuota vertikalios ašies orasraigčių (iš tikrųjų tai buvo aplink vertikalią ašį besisukančios trikampių formos burės) turinti vandens transporto priemonė (žr. 8 pav.) [8].



8 pav. R. J Annis'o vertikalios ašies propelerį turinčios vandens transporto priemonės brėžinys [8]

Galiausiai 1969 m. A. Bauer'is (angl. *Andrew Bauer*) atliko realius bandymus testuojant jo paties sukurtą vėjo energija varomą rotorinę sausumos transporto priemonę (žr. 9 pav.). Bandymai buvo atliekami tiek pavėjui, tiek prieš vėją, abiem atvejais anot A. Bauer'io transporto priemonė viršijo vėjo greitį. Mokslininkas taip pat išleido dokumentą kuriame aprašė tuo metu jo paties atliktus skaičiavimus ir testus, tiriant tokio tipo transporto priemonę. [9,34].



9 pav. A. Bauer'io vėjo energija varomos sausumos transporto priemonės brėžinys [9]

Bauer'is savo transporto priemonėje naudojo reguliuojamo žingsnio orasraigčius. Važiudamas prieš vėją jis pradėdavo su 45 laipsnių kampo orasraigčio žingsniu, greitėjant transporto priemonei kampą mažino iki 20 laipsnių. Važiuojant pavėjui pradinis orasraigčio žingsnio kampas būdavo -90 laipsnių,

greitėjant transporto priemonei mokslininkas kampa mažino iki -130 laipsnių. Vėlesniuose bandymuose įprastai buvo naudojamas 45 laipsnių orasraigčio žingsnio kampas.

Nuo šios transporto priemonės atsiradimo momento atsirado dar daugiau patentų, kuriuose esminis dalykas tapo nebe tai, kad transporto priemonė gali būti varoma vėjo energija, bet tai, kad transporto priemonė gali būti varoma vėjo energija ir tuo pačiu viršyti esamo vėjo greitį, t.y. buvo siekiama dar efektyviau išnaudoti iš vėjo gaunamą energiją [9].

### 1.3. „Blackbird“ projektas, rekordai

Dvidešimt pirmame mūsų eros amžiuje visi technologijų sektoriai tobulėja kaip niekad greitai, vėju varomų rotorinių transporto priemonių vystymasis taip pat pasiekė dar neregėtas aukštumas. Vienu iš šio sektoriaus technologinių laimėjimų galima pavadinti vėju varomą rotorinę transporto priemonę „Blackbird“ (žr. 10 pav.), kuri buvo sukurta siekiant įrodyti, kad yra galimas judėjimas greitesnis už vėją, naudojantis tik vėjo generuojama momentine energija. Šios transporto priemonės atsiradimas davė didelę paspirtį tolimesniems projektams šiame sektoriuje, tačiau susilaukė daug skepticizmo, susijusio su amžinojo variklio tematika [10].



10 pav. Vėju varoma transporto priemonė „Blackbird“ [12]

2010 m. R. Cavallaro'as (angl. *Rick Cavallaro*) bendradarbiaujant su San Jose Valstijos aviacijos universitetu sukūrė ir atliko eksperimentus su vėju varoma rotorine transporto priemone „Blackbird“. Šis projektas buvo remiamas „Google“, o projekto tikslas įrodyti, kad įmanoma judėti greičiau už vėją naudojantis tik vėjo energija, kuri nekaupiama jokiose baterijose (ar kitokio tipo energijos kaupimo prietaisuose). 2010 m. R. Cavallaro'as testuodamas „Blackbird“ atliko pirmuosius sėkmingus bandymus, kuriuose įrodė, kad ši transporto priemonė važiuodama tiek prieš vėją, tiek pavėjui gali pasiekti didesnę už vėjo greitį [10, 11, 35].

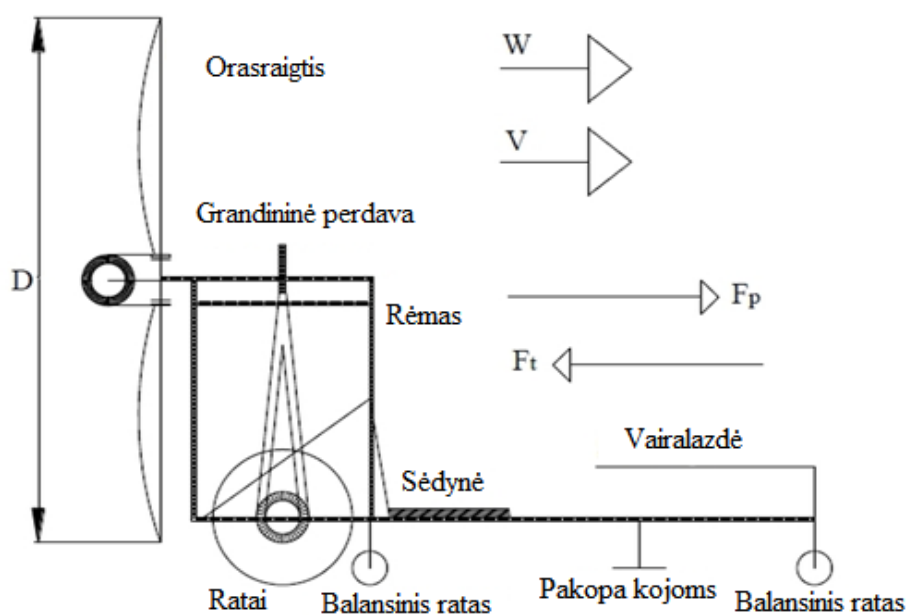
Tais pačiais 2010 m. buvo užfiksuotas pirmasis „Blackbird“ sertifikuotas rekordas važiuojant pavėjui, jo metu nustatyta, kad transporto priemonė pasiekė 2,8 (44,6 km/val.) karto didesnę greitį už ją varančio vėjo greitį (16 km/val.). Vėliau 2011 m. atlikus tam tikrus „Blackbird“ atnaujinimus rekordas buvo pagerintas ir užfiksuotas beveik 3 kartus didesnis už vėją greitis. [10, 11, 35, 40].

2012 m. „Blackbird“ vėl pasiekė rekordą, tačiau šį kartą, priešingai nei 2010 ir 2011 m. transporto priemonės judėjimo kryptis buvo prieš vėją. Transporto priemonė važiuodama prieš vėją pasiekė 2,1 (36,85 km/val.) karto didesnę greitį už ją varančio vėjo greitį (15,93 km/val.), šis rekordas taip pat buvo sertifikuotas [39].

Pagrindiniai „Blackbird“ projekto parametrai apibūdinantys transporto priemonės efektyvumą yra šie:

1. perdavos efektyvumo koeficientas – 95 %;
2. orasraigčio efektyvumas – 85 %;
3. riedėjimo pasipriešinimo koeficientas – 0,02;
4. transporto priemonės masė – 294,835 kg;
5. aerodinaminio pasipriešinimo koeficientas – 0,3;
6. midelio plotas – 1,858 m<sup>2</sup>.

„Blackbird“ projekto schema su pagrindiniais transporto priemonę sudarančiais agregatais bei veikiančiomis jėgomis pateikta 11 paveikslėlyje [10,11,35].



**11 pav.** „Blackbird“ schema su pagrindiniais mazgais,  $D$  – propelerio skersmuo;  $W$  – vėjo greitis;  $V$  – transporto priemonės greitis;  $F_p$  – propelerio traukos jėga;  $F_t$  – transporto priemonės riedėjimo pasipriešinimo jėga [12]

Iš schemos matome, kad „Blackbird“ turi visus įprastus sausumos transporto priemonei komponentus ( korpusas, ratai, perdava, vairavimo mechanizmas ir t.t.) bei orasraigčių kurį dažniau sutinkame oro erdvės transporto priemonėse. Schemoje transporto priemonė pavaizduota judanti į dešinę pusę pavėjui, tai galime matyti iš transporto priemonės greičio „ $V$ “ ir vėjo greičio „ $W$ “ vektorių kryptių, atitinkamai pavaizduotos ir dvi pagrindinės veikiančios jėgos, viena iš jų nukreipta prieš judėjimo kryptį – riedėjimo pasipriešinimo jėga „ $F_t$ “, kita, nukreipta judėjimo kryptimi – orasraigčio traukos jėga „ $F_p$ “.

#### 1.4. „The Inventus Ventomobile“

„The Inventus Ventomobile“ vėju varoma rotorinė transporto priemonė (žr. 12 pav.) 2008 m. buvo sukurta vokietijos Stuttgart universiteto studentų grupės, su tikslu dalyvauti „Racing Aeolus“ varžybose kurios tuo metu vyko Olandijoje. Ši transporto priemonė buvo triratė, turėjo 2 metrų orasraigtį, kurį prilaikė anglies pluošto struktūra, transporto priemonės rotorius buvo reguliuojamo žingsnio, taip efektyviau panaudojant vėjo priimamą energiją, mechaninė perdava susidėjo iš dviejų dviračio žvaigždžių bloką ir grandinės [13].



**12 pav.** Studentų sukurta „Inventus Ventomobile“ transporto priemonė „Aeolus Racing“ varžybose [14]

Bendras transporto priemonės svoris siekė vos 130 kilogramų (be vairuotojo), o važiuojant prieš vėją buvo pasiekta 64 procentai transporto priemonę varančio vėjo greičio. Nors šios transporto priemonės dizainas buvo ganėtinai kompliktuotas, tai nesutrukdė komandai triumfuoti tuometinėse varžybose [13].

#### 1.5. „Racing Aeolus“ varžybos

Vokietijoje kiekvienais metais rugpjūčio mėnesį vyksta „Racing Aeolus“ varžybos kuriose varžosi sausumos transporto priemonės naudojančios rotorių ir kurios yra varomos vėjo energija (žr. 13 pav.). Įprastai šiose varžybose varžomasi važiuojant prieš vėją. Dėl pandeminės situacijos varžybos nevyko

2020 ir 2021 m., tačiau 2022 m. planuojama tęsti šių varžybų tradiciją ir pasiekti naujų rekordų. Varžybos šiais metais turėtų vykti 12 kartą, o jų metu dalyviai varžysis tarpusavyje įvairiose kategorijose: maksimalus pasiektas greitis, greičiausiai įveiktas atstumas, didžiausias efektyvumas ir t.t. [15].

Šios varžybos taip pat svarbios tuo, kad varžybų dalyviai siekdami geresnių rezultatų naudoja vis modernesnes medžiagas savo transporto priemonėse, o technologiniu požiūriu pasitelkiami vis modernesni vėjo energijos gavimo būdai, pradedant įprastomis vėjo turbinomis, kurios gali būti horizontalios arba vertikalios ašies, baigiant transporto priemonėmis išnaudojančiomis „venturi“ efektą („venturi“ efektas – skysčių ar dujų judėjimas kai sistemoje yra skirtingi slėgiai) [38].



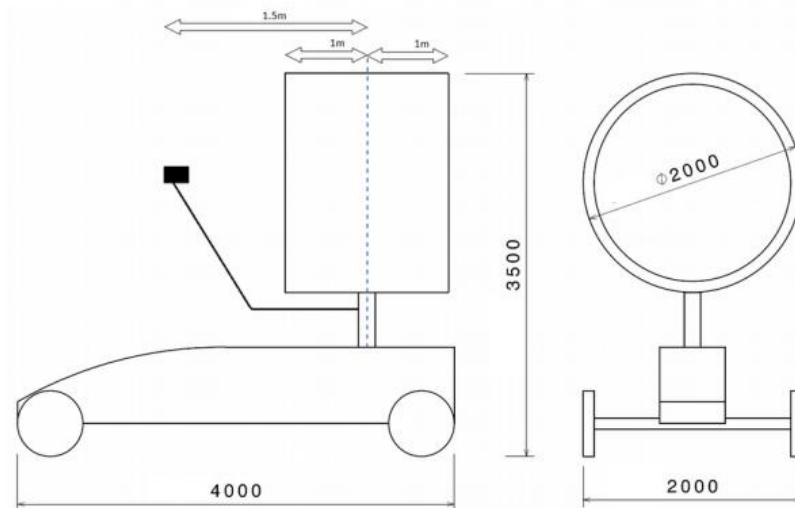
**13 pav.** „Racing Aeolus“ varžybų dalyviai, 2019 metai [15]

Varžybose dalyvauja įvairaus tipo ir konfigūracijų vėju varomos rotorinės transporto priemonės, norint dalyvauti varžybose reikia atsižvelgti į tam tikrus ribojimus ir taisykles, nedidelė dalis jų pateikta toliau [15]:

1. transporto priemonė turi turėti ratus kurie per vairavimo mechanizmą fiziškai valdomi vairuotojo;
2. transporto priemonė turi turėti orasraigį kuris naudoja vėjo energiją ir ją panaudoja judėjimui;
3. energijos kaupimas baterijose šių varžybų metu leidžiamas, tačiau varžomasi atskiroje kategorijoje;
4. minimalus vairuotojo svoris – 65 kg.;
5. būtinos atskiros stabdžių sistemos rotoriumi ir transporto priemonei;
6. maksimaliai leistini matmenys (žr. 14 pav.);



7. transporto priemonė turi turėti ne mažiau 3 ratų;
8. įvairios saugumo taisyklės, avarinio išsilaipinimo galimybė, transporto priemonės stabilumas esant itin dideliam vėjui ir t.t.;
9. minimalus matymo kampas vairuojant transporto priemonę.



**14 pav.** Didžiausi leistini transporto priemonės matmenys milimetrais „Racing Aeolus“ varžybose [15]

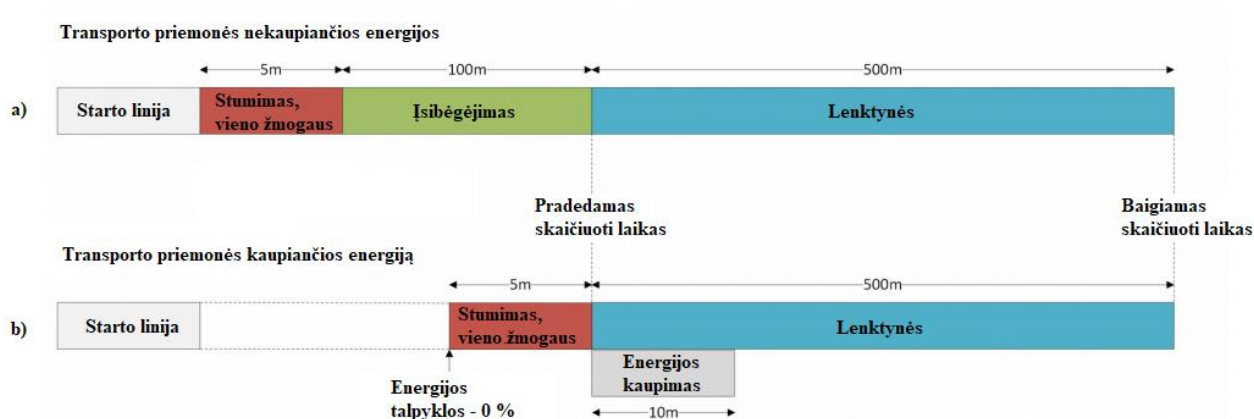
Paskutinės „Racing Aeolus“ varžybos vyko 2019 m. rugpjūtį, jose triumfavo kanadiečių komanda „Chinook 9“ (žr. 15 pav.). Ši komanda jau ne pirmi metai rodo itin gerus rezultatus, 2019 m. varžybose komandai pavyko sutriuškinti ankstesnių metų rekordus, transporto priemonė pasiekė 114,82 % efektyvumo koeficientą, t.y. įveikus 500 metrų varžybų trasą (judant prieš vėją) transporto priemonė vidutiniškai važiavo 1,1482 karto didesniu nei vėjas greičiu, tai dar kartą įrodo, kad vėju varoma rotorinė transporto priemonė gali viršyti ją varančio vėjo greitį [15].



**15 pav.** „Chinook 9“ komanda nugalėjo, „Racing Aeolus“ varžybose 2019 metais [16]

Transporto priemonė taip pat laimėjo „drag racing“ kategorijoje kurioje transporto priemonės turi įveikti 100 metrų atstumą, o inovatyvumo kategorijoje užėmė antrąją vietą [16].

Kadangi varžybose varžomasi skirtingose kategorijose, privalu atitinkamai suskirstyti trasą į sektorius. Pagrindinės varžybų trasos schemas su paaiškinimu pavaizduotos 16 paveikslėlyje.



**16 pav.** „Aeolus Racing“ varžybų trasos schemas. a) – transporto priemonėms nekaupiančioms energijos, b) – transporto priemonėms kurios kaupia energiją [15]

Iš schemų galime matyti, kad varžybose naudojama ta pati trasa, tačiau priklausomai nuo to ar transporto priemonė kaupia energiją ar ne, keičiasi trasos paskirstymas. Abejais atvejais trasoje yra starto linija, 5 metrų atstumas skirtas stumti transporto priemonę (padėti įveikti statinę riedėjimo pasipriešinimo jėgą) vieno žmogaus pagalba, 500 metrų lenktynių tiesioji (laikas fiksuojamas tik 500 metrų atkarpoje), finišo linija. Skirtumas tarp šių dviejų trasos konfigūracijų yra tas, kad transporto priemonės momentaliai naudojančios energiją turi 100 metrų atstumą kurio metu gali išibėgėti (be papildomos žmogaus ar kt. pagalbos), o transporto priemonės kaupiančios energiją turi 10 m atstumą kuriame prieš startuojant gali kaupti energiją, laikas kaupiant energiją yra įskaičiuojamas į bendrą trasos įveikimo laiką.

## 1.6. Pagrindiniai vėju varomos rotorinės transporto priemonės komponentai

Vėju varoma rotorinė transporto priemonė kaip ir kitos transporto priemonės turi tam tikrus būtent joms būdingus projektavimo bruožus, mūsų tiriamu atveju pagrindinės dalys ar bruožai yra itin artimi įprastoms sausumos transporto priemonėms, apart orasraigčio kuris labiau dominuoja oro erdvės transporte. Pagrindinės dalys (mechanizmai) sudarantys vėju varomą rotorinę transporto priemonę:

- rotorius (orasraigtis);
- mechaninė perdava;
- važiuoklė;
- korpusas (kėbulas);
- vairavimo mechanizmas;
- stabdžių sistema.

### 1.6.1. Rotorius (orasraigtis)

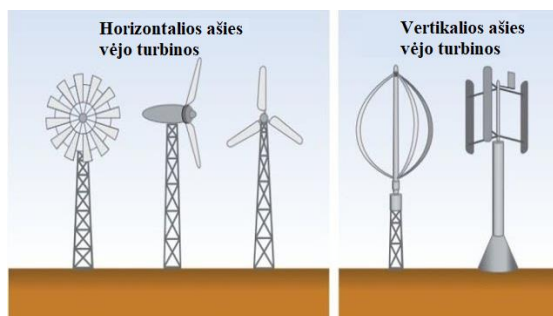
Rotorius (orasraigtis) yra vienas svarbiausių komponentų vėju varomoje rotorinėje transporto priemonėje, kadangi jis atlieka viena iš pagrindinių vaidmenų konvertuojant vėjo energiją į elektros

energiją ar tiesiogiai į mechaninę jėgą. Rotorius (orasraigtis) gali būti su gaubtu aplink save (žr. 17 pav.) arba be jo, šis naudojamas siekiant pagerinti propelerio efektyvumą, dažniausiai sutinkamas ten kur yra ypač didelės propelerio apkrovos bei ribota vieta propeleriams veikti.



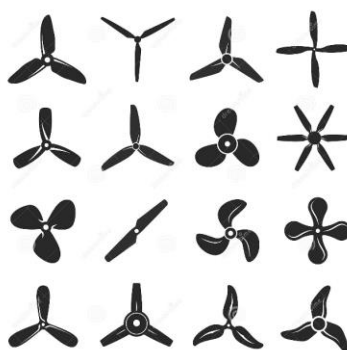
**17 pav.** Transporto priemonė su rotoriumi (orasraigčiu) turinčiu gaubtą [17]

Orasraigčiai pagal savo veikimo ašį įprastai skirstomi į dvi atskiras grupes – horizontalios ir vertikalios ašies orasraigčiai (žr. 18 pav.), šiuo atveju plačiau bus aptarti labiau paplitę horizontalios ašies orasraigčiai.



**18 pav.** Horizontalios ir vertikalios ašies vėjo turbinos [18]

Horizontalios ašies orasraigčiai gali būti įvairių variacijų keičiant menčių skaičių, žingsnį, spindulį, atakos kampą ir t.t. (žr. 19 pav.). Visi šie parametrai tarpusavyje glaudžiai susiję ir įtakoja vienas kitą, dėl šios priežasties tinkamas propelerio parinkimas gali itin stipriai įtakoti projektuojamojo objekto savybes.



**19 pav.** Orasraigčių menčių tipai [19]

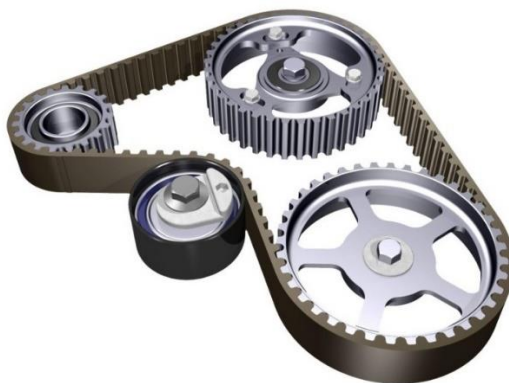
Rotorius (propeleris) taip pat gali būti kryptinis arba statinis, t.y. jei horizontalios ašies orasraigtis sukasi aplink įtvirtintą vertikalią ašį „gaudydamas“ vėją jis yra kryptinis, priešingu atveju jis atsuktas tik į tam tikrą pusę ir nesisuka aplink vertikalią ašį. Kryptiniai orasraigčiai yra pranašesni kadangi gali efektyviau priimti vėjo perduodamą energiją.



### 1.6.2. Mechaninė perdava

Perdavos gali būti įvairių tipų, nuo jų parinkimo gali priklausyti daugelis aspektų, tokių kaip: prarandamos energijos kiekis, vibracijos, sistemos ilgaamžiškumas, kaina ir t.t. Įprastai naudojami šie perdavų tipai:

- **Diržinės perdavos** (žr. 20 pav.)



**20 pav.** Trijų krumpliaračių diržinė perdava su įtempimo guoliu [20]

**Teigiami aspektai:** paprasti ir ekonomiškai, tinka perduodant energiją ilgais atstumais, gali praslysti esant sistemos perkrovai, sugeria smūgius ir vibracijas, tylus darbas, nereikalauja pastovios priežiūros [21, 36].

**Neigiami aspektai:** negali dirbti itin dideliais greičiais, energijos praradimas dėl praslydimų, mažas tarnavimo laikas, didesnės skersinės jėgos perduodamos velenams ir guoliams [21, 36].

- **Grandininės perdavos** (žr. 21 pav.)



**21 pav.** Grandininė perdava su dvejom žvaigždutėm

**Teigiami aspektai:** tolygus greitis, nepraslysta, maži nuostoliai, gali perduoti dideles jėgas, gali būti naudojamos tiek trumpais tiek ilgais energijos perdavimo atstumais, maža apkrova velenams ir guoliams [22, 36].

**Neigiami aspektai:** didelės vibracijos, kaina, pastovi priežiūra, be tinkamo sutepimo greitai susidėvi [22, 36].

- **Krumpliaratinės perdavos** (žr. 22 pav.)



**22 pav.** Kūginių dantračių pora naudota eksperimentiniame modelyje

- **Teigiami aspektai:** galima perduoti judesį per nelygiagrečias ašis, ilgaamžės, mažai priežiūros, gali perduoti dideles jėgas ar sukimo momentą [23, 36].
- **Neigiami aspektai:** nėra tinkamos dideliems greičiams, netinkama perduoti judesį dideliais atstumais, visiškai nelanksčios, sukelia didelį triukšmą [23, 36].

Renkantis perdavos tipą ir perdavų skaičių svarbu atkreipti dėmesį į naudingumo koeficientą, kuo sudėtingesnė perdava, kuo daugiau elementų, tuo naudingumo koeficientas bus mažesnis, o tai ženkliai įtakos bendrą sistemos (mazgo) veikimą.

### 1.6.3. Korpusas (kėbulas) ir važiuoklė

Transporto priemonės korpusas (kėbulas) ir važiuoklė yra pagrindiniai elementai jungiantys visus agregatus į visumą. Modernios sausumos transporto priemonės kėbulas susideda iš variklio, salono bei bagažo sekcijų, kuriose gali būti patikimai montuojami visi transporto priemonės agregatai. Moderniųjų (dabartinių) laikų automobiliuose kėbulas ir važiuoklė gaminami kaip viena dalis o ne kaip atskiri elementai (angl. *unibody*) (žr. 23 pav.) [24].



**23 pav.** „Unibody“ tipo automobilio kėbulas [25]

Šiuo atveju vėju varomoje rotorinėje transporto priemonėje pagrindinis kėbulo aspektas yra jo svoris ir gebėjimas viską sujungti į vieną bendrą objektą, dėl šios priežasties korpusas ir važiuoklės dalys dažnai gaminamos iš lengvų lydinių ar stiklo pluošto audinių.

### 1.6.4. Vairavimo mechanizmas ir stabdžių sistema

Vairavimo mechanizmas ir stabdžių sistema neatsiejami nuo kiekvieno transporto, jie taip pat atitinkamai turi savo skirtingas konfigūracijas ir tipus. Šio darbo metu dėl projektuojamo modelio paprastumo vairavimo mechanizmo ir stabdžių sistemos nebus, todėl tai nebus plačiau analizuojama.

## 2. Tiriamoji dalis

Šiame darbe bus plačiau aptarti „DDFTTW“ (angl. *Direct downwind faster than the wind*) bei „DUFTTW“ (angl. *Direct upwind faster than the wind*) transporto priemonių veikimo principai bei juos veikiančios jėgos, „Solidworks“ ir „GIMP“ programinėmis įrangomis bus atliktas dviejų eksperimentinių modelių aerodinaminio pasipriešinimo jėgų skaitinis tyrimas, o analitinių tyrimų metu bus nustatyti dviejų skirtingų „DDFTTW“ transporto priemonės modelių parametrai bei gebėjimas pasiekti ir viršyti jas varančio vėjo greitį. Skyriaus pabaigoje bus nustatyti pagrindiniai parametrai į kuriuos bus atsižvelgta gaminant du skirtingus vėju varomas rotorinės transporto priemonės modelius. Atliekamų tyrimų objektų izometriniai vaizdai pateikti 24 paveikslėlyje.



24 pav. Natūrinių „DDFTTW“ modelių izometriniai vaizdai, kairėje – pirmas natūrinis modelis, be mechaninės perdavos, dešinėje – antras natūrinis modelis (pilnai surinktas)

### 2.1. Transporto priemonės judėjimo kryptis – pavėjui

Prieš pradėdant atlikti skaitinius ir analitinius tyrimus, svarbu suprasti kodėl vėju varomos rotorinės transporto priemonės gali pasiekti didesnę nei jas varančio vėjo greitį. Šios transporto priemonės turi rotorių kuris per mechanines perdavas yra sujungtas su varančiąja ašimi taip, kad transporto priemonei judant pirmyn propeleris pučia orą atgal t.y. priešinga judėjimo kryptimi. Judėjimas prasideda vėjui pučiant į transporto priemonės korpusą ir orasraigtį, jeigu ši jėga įveikia riedėjimo pasipriešinimo jėgą (statinę, kadangi ji didesnė už dinaminę), transporto priemonė pradės judėti. Svarbu suprasti, kad transporto priemonei pasiekus vėjo greitį, teoriškai, ratai pradeda sukuti orasraigtį, tokiu būdu transporto priemonė įgauna papildomo greičio ir gali viršyti vėjo greitį iki tam tikros reikšmės kuri priklauso nuo naudingumo koeficientų visoje sistemoje.

### 2.2. Transporto priemonės judėjimo kryptis – prieš vėją

Atlikus tam tikrus pakeitimus mechaninėje perdavoje vėju varoma rotorinė transporto priemonė gali važiuoti ir prieš vėją. Šiuo atveju transporto priemonės orasraigtis veikia turbinos principu, gaunama vėjo energija mechanine perdava perduodama į varančiuosius ratus, šie sukasi tokiu pačiu greičiu kaip ir orasraigtis (turima omenyje, jei perdava yra 1:1 santykio, priešingu atveju orasraigčio ir varančiosios ašies apsisukimų greitis skiriasi). Važiuojant prieš vėją turime daug didesnę vėjo

pasipriešinimą todėl judėjimo pradžia tampa komplikuota kadangi vėjas stumia visą transporto priemonę atgal, kad transporto priemonė pradėtų judėti pirmyn korpusas turi turėti kuo mažesnę aerodinaminį pasipriešinimą, o orasraigtis pradinėje padėtyje turi pradėti sukintis ganėtinai lengvai, t.y. turėti mažą žingsnį.

### 2.3. Bendroji sąlyga

Skaitinių ir analitinių tyrimų pradžioje reikia suprasti ir nusistatyti bendrąją sąlygą, kuria privalu vadovautis viso tolimesnio darbo metu. Kaip ir visos kitos transporto priemonės, mechanizmai ar sistemos taip ir šioji vėju varoma rotorinė transporto priemonė gauna energiją ir ją naudoja atlikti darbui. Šiuo atveju reikia suprasti šešis pagrindinius parametrus, kurie apibūdina energijos mainus „DDFTTW“ sistemoje [26]:

- orasraigčio naudojama jėga „stumiant“ transporto priemonę pirmyn (orasraigčio trauka);
- jėga naudojama įveikti riedėjimo pasipriešinimo jėgą (ratų pasipriešinimas);
- atliktas orasraigčio darbas (energija per atitinkamą laiką) „stumiant“ transporto priemonę pirmyn (orasraigčio galia);
- gautas darbo rezultatas, kuris atsiranda žemei sukant ratus (ratų galia);
- „žemės“ greitis transporto priemonės atžvilgiu
- „oro“ greitis transporto priemonės atžvilgiu

Supaprastinant šiuos 6 parametrus sudaromos dvi lygtys, (25 pav.).

$$\begin{array}{|c|c|} \hline \color{red}{\downarrow} & \text{Orasraigčio galia} \\ \hline \color{green}{\uparrow} & \text{Ratų galia} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline \color{red}{\downarrow} & \text{oro greitis} \\ \hline \color{green}{\uparrow} & \text{žemės greitis} \\ \hline \end{array} \times \begin{array}{|c|c|} \hline \color{green}{\uparrow} & \text{orasraigčio trauka} \\ \hline \color{red}{\downarrow} & \text{ratų pasipriešinimas} \\ \hline \end{array}$$

25 pav. Šešių vėju varomos rotorinės transporto priemonės parametų tarpusavio ryšys [26]

Taigi, kad transporto priemonė viršytų vėjo greitį orasraigčio trauka turi būti didesnė už ratų pasipriešinimo jėgą, o orasraigčio galia turi būti mažesnė už ratų galią ( priešingu atveju gautume amžinąjį variklį), lieka tik du kintamieji iš kurių didesnis turi būti žemės greitis (kas reikštų, kad transporto priemonė turi judėti bent truputį greičiau už vėjo greitį). Remiantis šia bendrąja sąlyga tolimesniuose poskyriuose atliksime skaitinius ir analitinius „DDFTTW“ transporto priemonės modelių tyrimus kuriais bus nustatyti projektuojamųjų transporto priemonės modelių pagrindiniai parametrai [26].

### 2.4. Ratų apsisukimai

Norint parinkti tinkamus propelerio parametrus pradžioje reikia nustatyti koku greičiu transporto priemonės modelio ratai suksis prie tam tikro užsibrėžto greičio. Žinant ratų apsisukimų skaičių per tam tikrą laiką bei įvertinus mechaninės perdavos santykį žinosime vieną iš orasraigčio pagrindinių parametų – minimalų apsisukimų skaičių per atitinkamą laiką (įprastai apsisukimai per minutę). Siekiant atlikti tolimesnius skaičiavimus priimami šie pradiniai parametrai:

1. rato spindulys  $r = 0,06$  m;
2. modelio greitis  $V = 5$  m/s.

Apskaičiuojamas rato perimetras pagal (1) formulę:

$$P = 2\pi r; \quad (1)$$

čia  $P$  – rato perimetras;

$r$  – rato spindulys.

$$P = 2 \cdot \pi \cdot 0,06 = 0,377 \text{ m.} \quad (2)$$

Toliau pagal (3) formulę apskaičiuojamas 1 kilometro atstumui nuvažiuoti reikiamų rato apsisukimų skaičius:

$$n_1 = \frac{1000}{P}; \quad (3)$$

čia  $n_1$  – rato apsisukimų skaičius nuvažiavus 1 kilometro atstumą.

$$n_1 = \frac{1000}{0,377} = 2652,582 \text{ aps.} \quad (4)$$

Apskaičiuojamas ratų apsisukimų skaičius per sekundę norint, kad modelis judėtų 5 m/s (18 km/val.) greičiu pagal (5) formulę:

$$n_2 = \frac{V}{P}; \quad (5)$$

$$n_2 = \frac{5}{0,377} = 13,263 \text{ aps.} \quad (6)$$

čia  $n_2$  – rato apsisukimų skaičius per sekundę, judant 5 m/s greičiu.

Apskaičiuojamas ratų apsisukimų skaičius per minutę norint, kad modelis judėtų 5 m/s greičiu pagal (7) formulę:

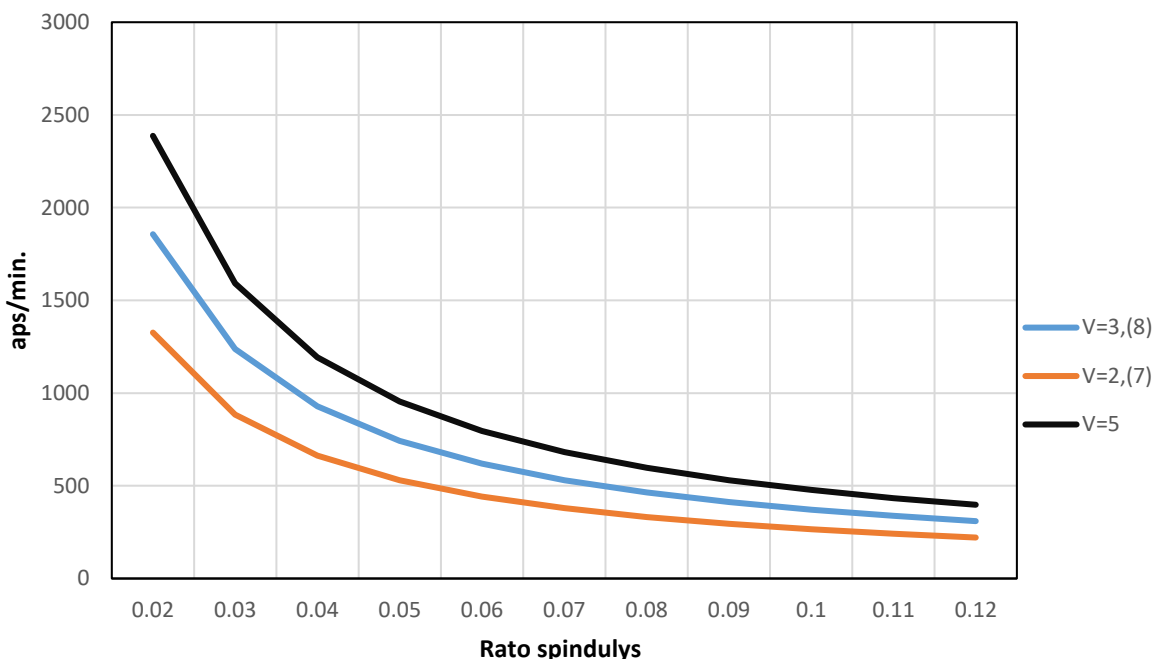
$$n_3 = n_2 \cdot 60; \quad (7)$$

čia  $n_3$  – rato apsisukimų skaičius per minutę, modeliui judant 5 m/s greičiu.

$$n_3 = 13,263 \cdot 60 = 795,775 \text{ aps.} \quad (8)$$

Tam, kad gautume orasraigčio apsisukimų skaičių prie tam tikro greičio turime įvertinti ir perdavos santykį, šiuo atveju pasirinksime perdavą su 1:1 santykiu, taip eliminuojant šį parametą ir supaprastinant tolimesnius skaičiavimus.

Naudojantis „Microsoft Excel“ programa sudarytas grafikas (žr. 26 pav.) su skirtingais rato spinduliais, tarp kurių mažiausias 20 mm, o didžiausias 120 mm, ir ratų apsisukimų skaičiumi, judant 2,(7), 3,(8) bei 5 m/s greičiais.



**26 pav.** Rato spindulio ir apsisukimų skaičiaus priklausomybė judant skirtingais greičiais

Iš grafiko matosi, kad ši funkcija yra netiesinė, esant mažam rato spinduliui apsisukimų skaičius ženkliai auga, o didėjant rato spinduliui apsisukimų skaičius mažėja, tačiau nuožulniai (žr. 26 pav.). Turint šią informaciją išreikštą grafiku tolimesniuose poskyriuose galėsime parinkti orasraigtį atsižvelgiant į turimus ratų spindulius bei eksperimentinio tyrimo metu numatomą vėjo greitį.

## 2.5. Riedėjimo pasipriešinimo jėga

Riedėjimo pasipriešinimo jėga – tai jėga atsirandanti ratiniam objektui judant paviršiumi. Riedėjimo pasipriešinimo jėga yra vienas iš kritinių parametru, kadangi nuo jos dalinai priklauso kokio dydžio ir efektyvumo orasraigtis bus parinktas (kuo didesnė riedėjimo pasipriešinimo jėga, tuo efektyvesnio orasraigčio prireiks projektuojamame modelyje), kokių parametru ratai bus parinkti (riedėjimo koeficientas, kontaktinis plotas, rato spindulys) ir kokią jėgą reikės atsverti norint, kad šio tipo transporto priemonė galėtų viršyti ją varančio vėjo greitį. Siekiant atlikti tolimesnius skaičiavimus priimama, kad pirmojo modelio masė lygi 1,334 kg.

Riedėjimo pasipriešinimo jėga apskaičiuojama pagal (9) formulę [27]:

$$F_t = c \cdot N; \tag{9}$$

čia  $F_t$  – ratų riedėjimo pasipriešinimo jėga;

$c$  – ratų riedėjimo pasipriešinimo koeficientas;

$N$  – svoris.

Remiantis 1 lentelė priimama, kad riedėjimo pasipriešinimo koeficientas  $c$  tolimesniems skaičiavimams yra lygus 0,005 [27].

**1 lentelė.** Riedėjimo pasipriešinimo koeficientai [27]

Riedėjimo pasipriešinimo koeficientas $c$	Kontakto pobūdis	Riedėjimo pasipriešinimo koeficientas $c$	Kontakto pobūdis
0,001 – 0,002	Traukinių plieniniai ratai ant plieninių bėgių	0,008	Dviračio padanga ant nelygaus (seno) asfaltuoto kelio
0,001	Dviračio padanga ant medinio tako	0,01 – 0,015	Automobilio padanga ant betono
0,002 – 0,005	Mažo pasipriešinimo bekamerės padangos	0,02	Automobilio padanga ant asfalto
0,002	Dviračio padanga ant betono	0,02	Nauja automobilio padanga žvyrkelyje
0,004	Dviračio padanga ant asfalto	0,03	Ženkliai susidėvėjusi automobilio padanga žvyrkelyje
0,005	Nešvarūs tramvajaus bėgiai	0,04 – 0,08	Automobilio padanga ant vidutinio kietumo gruntinio kelio
0,006 – 0,01	Sunkvežimio padanga ant asfalto	0,2 – 0,4	Automobilio padanga klampiam smėlyje

Toliau apskaičiuojamas bendras modelio svoris pagal (10) formulę [27]:

$$N = m \cdot g; \quad (10)$$

čia  $N$  – svoris;

$m$  – modelio masė;

$g$  – laisvojo kritimo pagreitis ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ).

$$N = 1,334 \cdot 9,81 = 13,087 \text{ N}. \quad (11)$$

Riedėjimo pasipriešinimo jėga bus lygi (12) [27]:

$$F_t = 0,005 \cdot 13,087 = 0,065 \text{ N}. \quad (12)$$

## 2.6. Aerodinaminis pasipriešinimas

Aerodinaminis pasipriešinimas – tai jėga veikianti priešinga judėjimui kryptimi dujų (oro) atžvilgiu [28]. Aerodinaminis pasipriešinimas yra dar vienas parametras įtakojantis modelio projektavimą tolimesniuose etapuose, nuo jos taip pat kaip ir nuo riedėjimo pasipriešinimo jėgos stipriai priklauso orasraigčio parametrai.

### 2.6.1. Analitinis tyrimas

Aerodinaminis pasipriešinimas apskaičiuojama pagal (13) formulę [29, 32]:

$$F_o = c_o \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2} \cdot A; \quad (13)$$

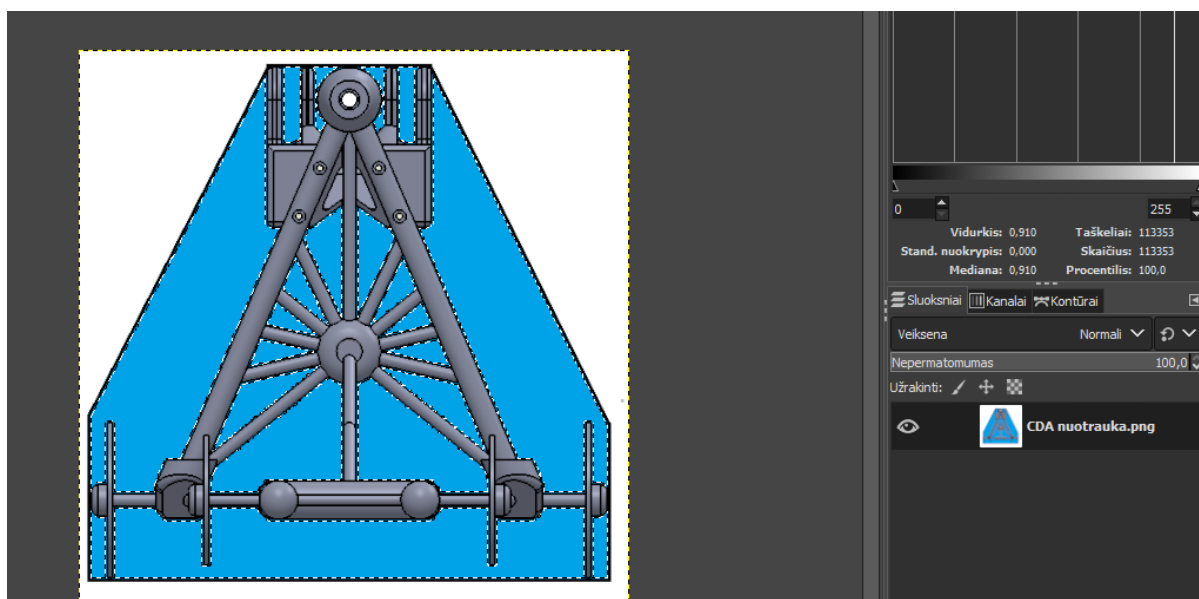
čia  $F_o$  – aerodinaminis pasipriešinimas;

$c_o$  – objekto aerodinaminio pasipriešinimo koeficientas;

$\rho$  – oro tankis (1,25 kg/m<sup>3</sup>);

$A$  – objekto midelio plotas.

Objekto midelio plotas apskaičiuojamas naudojant programą „GIMP“. „GIMP“ – tai programinė įranga skirta sukurti ir redaguoti vaizdus. Šioje programinėje įrangoje yra funkcija gebanti apskaičiuoti tam tikros spalvos taškelių (angl. *pixels*) kiekį paveikslėlyje, naudojantis šia funkcija galima itin tiksliai nustatyti objekto midelio plotą. Pirmiausiai modelio frontalinis vaizdas įkeliamas į programą „GIMP“, pažymimas bendras modelio kontūras juoda spalva, o vietos kuriose yra oro tarpai pažymimos mėlyna spalva (žr. 27 pav.).

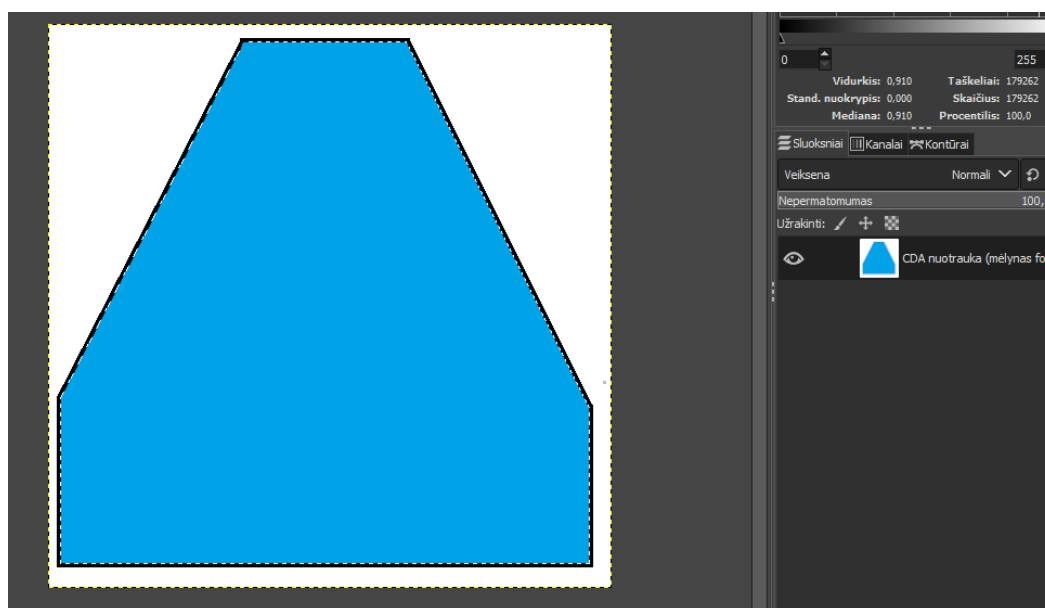


27 pav. Pirmojo modelio mėlyno fono pikselių skaičius programoje „GIMP“

Programa apskaičiuoja mėlynos spalvos taškelių skaičių, jų yra – 113353 (žr. 27 pav.)



Procesas pakartojamas dar kartą tik šį kartą naudojamas paveikslėlis be modelio frontalinio vaizdo, šiuo atveju mėlynos spalvos taškelių skaičius – 179262 (žr. 28 pav.).



**28 pav.** Pirmojo modelio bendras mėlyno fono pikselių skaičius programoje „GIMP“

Turint taškelių skaičius galima apskaičiuoti jų santykį remiantis (14) formule:

$$k = \frac{P_1}{P_2}; \quad (14)$$

čia  $k$  – mėlyno fono taškelių santykis;

$P_1$  – mėlynų taškelių skaičius su modelio frontaliu vaizdu;

$P_2$  – mėlynų taškelių skaičius be modelio frontalinio vaizdo.

$$k_1 = \frac{113353}{179262} = 0,6323 = 63,23 \%. \quad (15)$$

Taigi modelio užimamas plotas bus lygus (16):

$$k_2 = 100 - 63,23 = 36,77 \%. \quad (16)$$

Norint rasti aerodinaminio pasipriešinimo jėgą reikia nustatyti koks yra midelio plotas kvadratiniais metrais, tai apskaičiuojame pagal (17,18,19) formules:

Apskaičiuojamas bendras plotas juodame kontūre (stačiakampio ir trapecijos plotas):

$$S = 0,12 \cdot 0,4 + 0,264 \cdot 0,275 = 0,12 \text{ m}^2. \quad (17)$$

Turint bendrą plotą juodame kontūre galime rasti modelio midelio plotą (18)

$$A = S \cdot k; \quad (18)$$

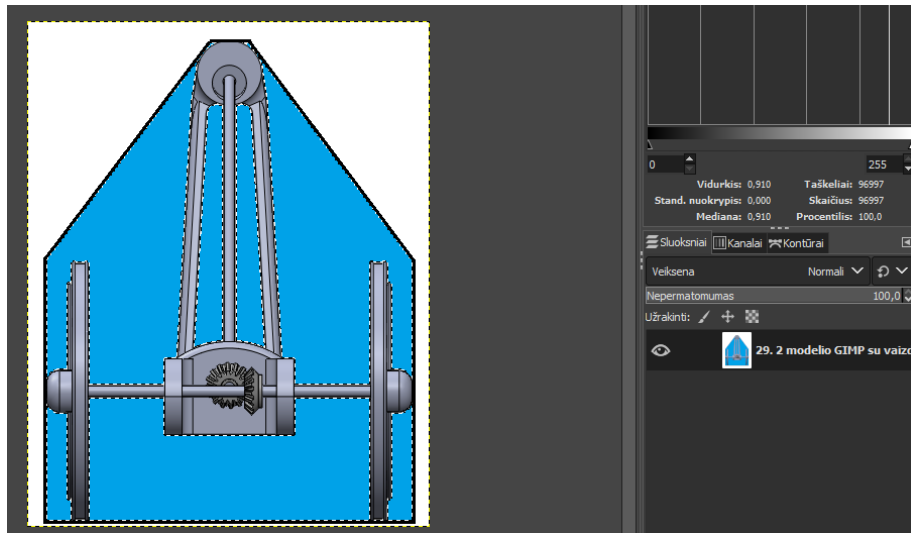
$$A = 0,12 \cdot 0,3677 = 0,044 \text{ m}^2. \quad (19)$$

Kadangi objekto aerodinaminio pasipriešinimo koeficientas yra randamas eksperimentiniu tyrimo metu, arba naudojantis skaitiniais metodais, priimsime, kad oro objekto aerodinaminio pasipriešinimo

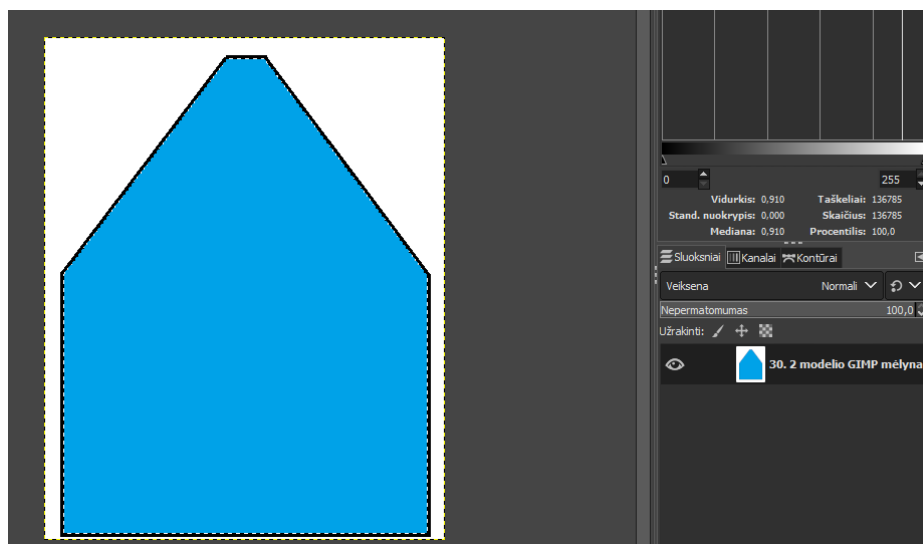
koeficientas  $c_o$  yra lygus 0,906 (remiantis 2.6.2 skyrelio skaitiniu tyrimu). Turint objekto aerodinaminio pasipriešinimo koeficientą galima apskaičiuoti aerodinaminio pasipriešinimo jėgą pagal 13 formulę [29] :

$$F_o = 0,906 \cdot \frac{1,25 \cdot 5^2}{2} \cdot 0,044 = 0,623 \text{ N.} \quad (20)$$

Visi skaičiavimai pakartojami su antruoju modeliu. Mėlynos spalvos taškelių skaičius su modelio frontaliu vaizdu - 96997 (žr. 29 pav.). Mėlynos spalvos taškelių skaičius be modelio frontalinio vaizdo - 136785 (žr. 30 pav.)



29 pav. Antrojo modelio mėlyno fono pikselių skaičius programoje „GIMP“



30 pav. Antrojo modelio bendras mėlyno fono pikselių skaičius programoje „GIMP“

Apskaičiuojamas santykis pagal 14 formulę:

$$k_1 = \frac{96997}{136785} = 0,709 = 70,9 \%. \quad (21)$$

Taigi modelio užimamas plotas bus lygus:

$$k_2 = 100 - 70,9 = 29,1 \%. \quad (22)$$

Nustatomas koks yra videlio plotas kvadratiniais metrais:

Apskaičiuojamas bendras plotas juodame kontūre (stačiakampio ir trapecijos plotas):

$$S = 0,12 \cdot 0,17 + 0,094 \cdot 0,103 = 0,03 \text{ m}^2. \quad (23)$$

Turint bendrą plotą juodame kontūre galime rasti modelio videlio plotą:

$$A = S \cdot k; \quad (24)$$

$$A = 0,03 \cdot 0,291 = 0,0088 \text{ m}^2. \quad (25)$$

Antrojo modelio objekto aerodinaminio pasipriešinimo koeficientas priimamas taip pat kaip ir pirmuoju atveju, remiantis skaitiniu tyrimu 2.6.2 skyrelyje,  $c_o = 0,436$ . Turint objekto aerodinaminio pasipriešinimo koeficientą galima apskaičiuoti aerodinaminio pasipriešinimo jėgą pagal 13 formulę [29] :

$$F_o = 0,436 \cdot \frac{1,25 \cdot 5^2}{2} \cdot 0,0088 = 0,06 \text{ N}. \quad (26)$$

Lyginant pirmojo ir antrojo natūrinio modelio aerodinaminio pasipriešinimo jėgą darytina išvada, kad antrasis modelis yra ženkliai aerodinamiškesnis.

## 2.6.2. Skaitinis tyrimas

Objekto aerodinaminis pasipriešinimas ir koeficientas apskaičiuojami naudojantis programos „Solidworks“ „Flow Simulation“ funkcija. Tyrimas pradamas įkeliant vėju varomos rotorinės transporto priemonės surinkimo failą į programą „Solidworks“.

### Tyrimo nustatymai:

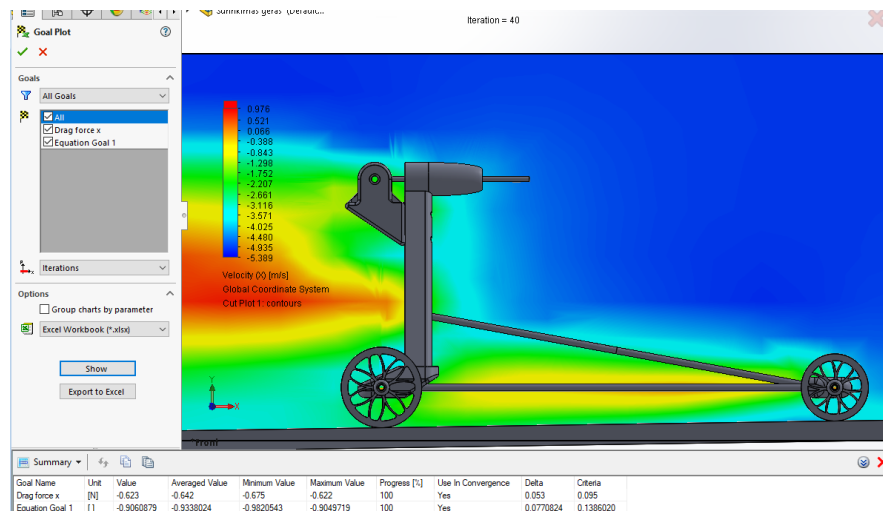
- pasirinkta SI matavimo sistema;
- pasirinktas išorinio „angl. *External*“ tipo analizės metodas;
- pasirinkta aplinka – oras;
- dujų (oro) judėjimas - laminarinis
- įvedamas x ašies greičio argumentas – 5 m/s;
- pasirenkamas ketvirtas baigtinių elementų tikslumo variantas;
- simuliuojama žemė (angl. *Boundary Conditions*).

### Tyrimo eiga:

- pasirenkamas tyrimo tikslas – jėga atitinkamoje ašyje „angl. *Normal force*“
- įvedama tyrimo tikslo formulė, bei jos argumentai „ $F_o = c_o \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot A$ “;
- atliekama simuliacija;

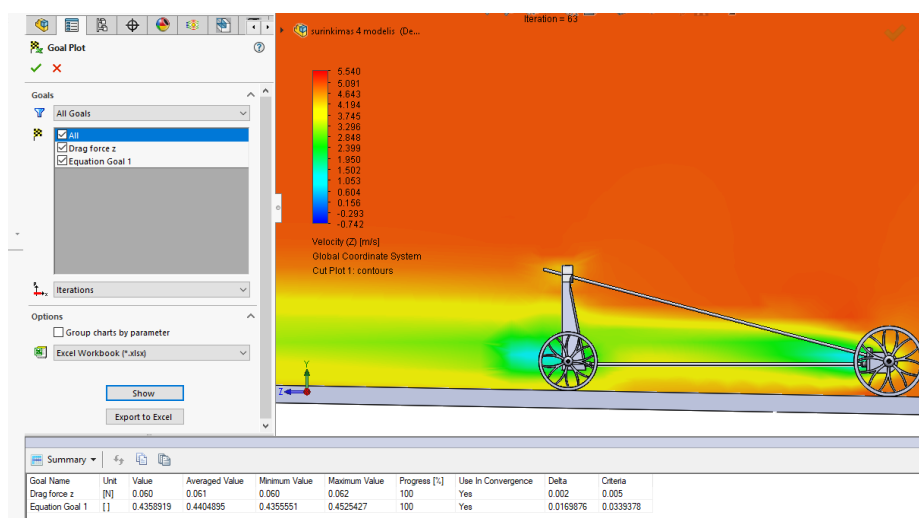
- pasirenkami rezultatai, kuriuos norima matyti (aerodinaminio pasipriešinimo koeficientas bei jėga)

Įvedus visus reikalingus parametrus (oro tankis, oro aptekėjimo kryptis, srauto greitis, aerodinaminio pasipriešinimo koeficiento formulė ir t.t.) atliekama simuliacija, po kurios gaunamas aerodinaminio pasipriešinimo koeficientas, pirmojo modelio atveju jis yra lygus 0,906, o aerodinaminio pasipriešinimo jėga lygi 0,623 N (žr. 31 pav.). Iš paveikslėlio taip pat matome, kad ties orasraigčio ašies tvirtinimo vieta ir perdavos laikikliu yra didelis aerodinaminis pasipriešinimas, tai logiška, nes dėl šių detalių konstrukcijos yra užimamas santykinai (lyginant su likusiu modelio videlio plotu) didelis plotas nukreiptas statmenai judėjimo kryptimi [30].



31 pav. Pirmojo modelio aerodinaminio pasipriešinimo simuliacija programoje „Solidworks“

Antrojo modelio atveju atliekama analogiška simuliacija, tačiau pakeičiamas videlio plotas kuris yra ženkliai mažesnis už pirmojo modelio. Iš 32 paveikslėlio galime matyti, kad aerodinaminio pasipriešinimo koeficientas šiuo atveju yra daugiau nei du kartus mažesnis ir lygus 0,436, bendra aerodinaminio pasipriešinimo jėga taip pat gerokai mažesnė, ji lygi 0,06 N jėgai.



32 pav. Antrojo modelio aerodinaminio pasipriešinimo simuliacija programoje „Solidworks“

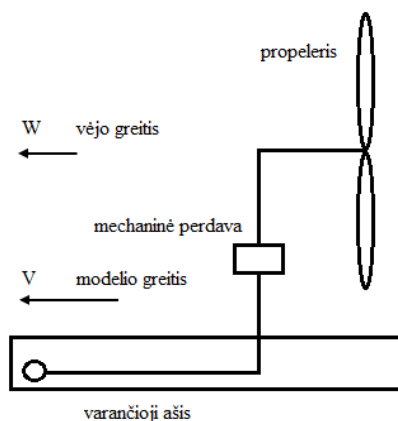
Po atliktų kūnų aerodinaminio pasipriešinimo skaitinių tyrimų darytina išvada, kad pirmasis modelis turi 2,08 karto didesnę aerodinaminio pasipriešinimo koeficientą, o aerodinaminio pasipriešinimo jėga

yra net 10,38 karto mažesnė, rezultatus labiausiai įtakoja tai, kad antrojo modelio midelio plotas yra gerokai mažesnis lyginant su pirmuoju. Darytina išvada, kad antrajam modeliui prireiks mažiau energijos judėjimo metu (ypač pradėdant judėti iš statinės padėties).

## 2.7. DDFTTW (Direct downwind faster than the wind) sąlyga ir detalus analitinis tyrimas

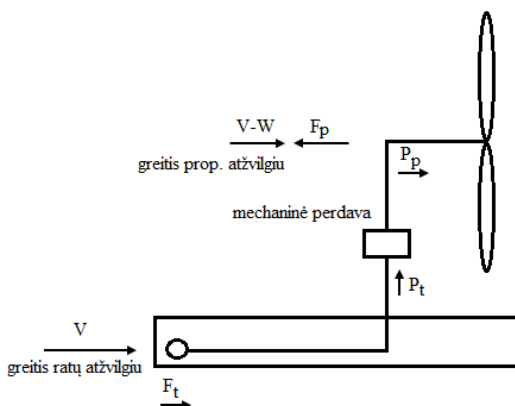
Prieš pradėdant detalesnius „DDFTTW“ transporto priemonės modelio skaičiavimus turime suprasti kokios jėgos veikia modelį žiūrint iš skirtingų perspektyvų. Šioje dalyje bus atiekami analitiniai skaičiavimai, siekiant nustatyti modelį veikiančias jėgas bei įvertinti kokios jėgos reikia siekiant išpildyti „DDFTTW“ sąlygą. Norint įvertinti visas modelį veikiančias jėgas reikalinga schema su jėgų išdėstymu (žr. 33, 34 pav.), vėliau šios jėgos bus įvertinamos tolimesniuose skaičiavimuose.

„DDFTTW“ transporto priemonę sudaro 3 pagrindiniai mazgai – rotorius (orasraigis), mechaninė perdava bei varančioji ašis, žvelgiant į 28 pav. galime matyti, kad iš trečio asmens perspektyvos modelis juda į kairę pusę, vėjo greitis bei modelio greitis taip pat nukreipti į kairę pusę.



33 pav. „DDFTTW“ modelio jėgos ir pagrindiniai komponentai. W- vėjo greitis; V – modelio greitis

Žvelgiant iš modelio perspektyvos tai keičiasi (žr. 34 pav.), šiuo atveju vėjo ir modelio greičiai pakeičia savo kryptį, schemoje taip pat matome kokios jėgos yra generuojamos bei veikia modelį – orasraigčio perduodama jėga velene, galia varančiojoje ašyje, riedėjimo pasipriešinimo jėga.



34 pav. DDFTTW modelį veikiančios jėgos iš propelerio ir modelio perspektyvos. V-W – greitis propelerio atžvilgiu; V – greitis ratų atžvilgiu;  $P_p$  – propelerio jėga velene;  $P_t$  – galia varančiojoje ašyje;  $F_t$  – riedėjimo pasipriešinimo jėga

Varančiųjų ratų galia ašyje, įvertinus ratų praslydimo koeficientą, apskaičiuojama pagal (27) formulę [41]:

$$P_t = F_t \cdot V \cdot \eta_t; \quad (27)$$

čia  $P_t$  – varančiųjų ratų galia, ašyje;

$V$  – modelio greitis;

$\eta_t$  – ratų praslydimo koeficientas ( $\eta_t = 1$ , jei ratai nepraslysta).

$$P_t = 0,065 \cdot 5 \cdot 1 = 0,327 \text{ Nm/s} \quad (28)$$

Propelerio galia ašyje, įvertinus propelerio efektyvumo koeficientą apskaičiuojama pagal (29) formulę [41]:

$$P_p = F_p \cdot \frac{(V-W)}{\eta_p}; \quad (29)$$

čia  $P_p$  – propelerio galia, ašyje;

$F_p$  – propelerio traukos jėga;

$W$  – vėjo greitis;

$\eta_p$  – propelerio efektyvumo koeficientas.

Įvertinamas modelio mechaninių perdavų efektyvumas remiantis (30) formule [41]:

$$P_p = P_t \cdot \eta_g; \quad (30)$$

čia  $\eta_g$  – mechaninių perdavų efektyvumo koeficientas.

$$P_p = 0,327 \cdot 0,922 = 0,302 \text{ Nm/s}; \quad (31)$$

Taigi įstačius (27, 29) formules į (30) formulę gauname tokią išraišką (32), ją pertvarkę gauname propelerio traukos jėgai apskaičiuoti reikalingą formulę (33) [41]:

$$F_p \cdot \frac{(V-W)}{\eta_p} = F_t \cdot V \cdot \eta_t \cdot \eta_g; \quad (32)$$

$$F_p = F_t \cdot \frac{V}{V-W} \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_p; \quad (33)$$

$$F_p = 0,065 \cdot \frac{5}{5-3,8} \cdot 1 \cdot 0,9217 \cdot 0,6 = 0,163 \text{ N}. \quad (34)$$

Grynoji traukos jėga, kuri lieka po modelio riedėjimo ir aerodinaminio pasipriešinimo jėgų kompensavimo apskaičiuojama pagal (35) formulę [41]:

$$F_{net} = F_p - F_t = F_t \cdot \left( \frac{V}{V-W} \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_p - 1 \right); \quad (35)$$

čia  $F_{net}$  – grynoji traukos jėga.

Grynoji traukos jėga gali būti teigiama tik šiuo atveju (36), teigiama grynoji traukos jėga iš principo yra pagrindinis DDFTTW modelio reikalavimas [41]:

$$\frac{v}{v-w} \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_p > 1; \quad (36)$$

Tiriamu atveju gauname (37):

$$\frac{5}{5-3,(8)} \cdot 1 \cdot 0,922 \cdot 0,6 = 2,489 > 1; \quad (37)$$

Pertvarkius (35) formulę gauname aiškesnę šios formulės išraišką, kuria galime apskaičiuoti grynąją traukos jėgą (38) [41]:

$$F_{net} = F_p \left\{ 1 + \left[ \frac{v}{v-w} \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_p - 1 \right]^{-1} \right\}^{-1}; \quad (38)$$

$$F_{net} = 0,163 \left\{ 1 + \left[ \frac{5}{5-3,(8)} \cdot 1 \cdot 0,922 \cdot 0,6 - 1 \right]^{-1} \right\}^{-1} = 0,0974 \text{ N}. \quad (39)$$

Šio skyriaus skaičiavimai pakartojami su antruoju modeliu, formulės ir atsakymai pateikti 2 priede.

## 2.8. Propelerio efektyvumas

Orasraigčio efektyvumo koeficientas parodo orasraigčio naudojamos galios ir sukuriamos traukos santykį, pagal tai galime spręsti kaip efektyviai orasraigtis panaudoja gaunamą vėjo energiją. Propelerio efektyvumo koeficientą galima išskaidyti į dvi dedamąsias, naudojant (40) formulę [41]:

$$\eta_p = \eta_i \cdot \eta_v; \quad (40)$$

čia  $\eta_i$  – indukuotasis orasraigčio koeficientas;

$\eta_v$  – orasraigčio klampumo koeficientas;

Orasraigčio klampumo koeficientas apskaičiuojamas pagal (41) formulę [41]:

$$\eta_i = \frac{2}{1 + \left( 1 + \frac{2F_p}{\rho(V-w)^2 \cdot A_p \cdot \eta_{swirl}} \right)^{\frac{1}{2}}}; \quad (41)$$

čia  $\rho$  – oro tankis;

$A_p$  – propelerio disko plotas;

$\eta_{swirl}$  – propelerio „swirl“ efektyvumo koeficientas (priimamas 0,95 koeficientas).

Orasraigčio disko plotas apskaičiuojamas pagal (42) formulę, priimame, tolimesniuose skaičiavimuose priimame, kad propelerio spindulys yra lygus 0,2 m.

$$A_p = \pi \cdot r_p^2; \quad (42)$$

čia  $r_p$  – orasraigčio spindulys.

$$A_p = \pi \cdot 0,2^2 = 0,1257 \text{ m}^2. \quad (43)$$

$$\eta_i = \frac{2}{1 + \left(1 + \frac{2 \cdot 0,163}{1,25 \cdot (5-3, (8))^2 \cdot 0,1257} \cdot \frac{1}{0,95}\right)^{\frac{1}{2}}} = 0,751; \quad (44)$$

Įstačius (41) formulę į (40) formulę gauname tokią 38 formulės išraišką (45), ši išraiška yra tobulesnė už (38) formulėje nurodytą todėl, kad „ $\eta_p$ “ reikšmė išskaidoma į dvi lengviau nustatomas dedamąsias, o tai ženkliai padidina skaičiavimo tikslumą [41].

$$F_{net} = F_p \left\{ 1 + \left[ \frac{2V \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_v}{(V-W) + ((V-W)^2 + \frac{2F_p \cdot 1}{\rho \cdot A_p \cdot \eta_{swirl}})^{\frac{1}{2}}} - 1 \right]^{-1} \right\}^{-1}; \quad (45)$$

$$F_{net} = 0,163 \left\{ 1 + \left[ \frac{2 \cdot 5 \cdot 1 \cdot 0,922 \cdot 0,8}{(5-3, (8)) + ((5-3, (8))^2 + \frac{2 \cdot 0,163}{1,25 \cdot 0,1257} \cdot \frac{1}{0,95})^{\frac{1}{2}}} - 1 \right]^{-1} \right\}^{-1} = 0,097 \text{ N}. \quad (46)$$

Šio skyriaus skaičiavimai pakartojami su antruoju modeliu, formulės ir atsakymai pateikti 2 priede.

## 2.9. Grynoji traukos jėga modelio greičiui pasiekus vėjo greitį

Transporto priemonei kertant vėjo greičio ribą vėjo ir transporto priemonės greitis orasraigčio atžvilgiu priartėja prie 0, tai reiškia, kad orasraigčiai dirba „sklandymo“ režimu. Dėl šios priežasties grynoji traukos jėga prie šios sąlygos turi būti perskaičiuota, kadangi „ $\frac{2F_p}{\rho A_p}$ “ reikšmė absoliučiai dominuoja „V-W“ reikšmę (žr. 45 formulę) [41].

Taigi grynosios traukos jėgos formulė transporto priemonei priartėjus prie vėjo greičio įgauna tokią išraišką (47) [41]:

$$F_{net} = F_p \left\{ 1 + \left[ V \cdot r_p \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_v \cdot \left( \frac{2\pi\rho}{F_p} \cdot \eta_{swirl} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right]^{-1} \right\}^{-1}; \quad (47)$$

$$F_{net} = 0,163 \left\{ 1 + \left[ 5 \cdot 0,2 \cdot 0,922 \cdot 0,8 \cdot \left( \frac{2\pi \cdot 1,25}{0,163} \cdot 0,95 \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right]^{-1} \right\}^{-1} = 0,131 \text{ N}. \quad (48)$$

Šio skyriaus skaičiavimai pakartojami su antruoju modeliu, formulės ir atsakymai pateikti 2 priede.

## 2.10. DDFTTW transporto priemonės optimizavimo parametrai

Projektuojant tam tikrą mechanizmą, sistemą, transporto priemonę ar bet kokią kitą objektą dažnai susiduriama su tam tikrais parametru suderinimo sunkumais, kad juos būtų lengviau išspręsti paranku įsivesti optimizavimo parametrus, kuriuos derinant tarpusavyje ganėtinai paprasta suprasti kurioje vietoje yra silpnoji projekto vieta. Siekiant maksimaliai suderinti „DDFTTW“ transporto priemonės modelio veikimą bus įvedami trys bedimensiniai parametrai, su kuriais toliau tirsime ir optimizuosime projektuojamą modelį [41]:



Traukos jėgų santykis (49):

$$\mathcal{F} = \frac{F_{net}}{F_p}; \quad (49)$$

$$\mathcal{F} = \frac{0,097}{0,163} = 0,598. \quad (50)$$

Greičių santykis (51):

$$Z = \frac{V-W}{V}; \quad (51)$$

$$Z = \frac{5-3,8}{5} = 0,24. \quad (52)$$

Modifikuotos propelerio traukos koeficientas (53):

$$C'_{T} = \frac{2F_p}{\rho \cdot V^2 \cdot A_p}; \quad (53)$$

$$C'_{T} = \frac{2 \cdot 0,163}{1,25 \cdot 5^2 \cdot 0,1257} = 0,083. \quad (54)$$

Pritaikius šiuos santykius ir koeficientą bei naudodamiesi (45) formule gauname dar vieną bedimensę išraišką (55), kuria paranku naudotis siekiant optimizuoti DDFTTW rotorinę vėju varomą transporto priemonę [41]:

$$\mathcal{F} = \left\{ 1 + \left[ \frac{2 \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_v}{Z + \left( Z^2 + \frac{C'_{T}}{\eta_{swirl}} \right)^{\frac{1}{2}}} - 1 \right]^{-1} \right\}^{-1}; \quad (55)$$

Šio skyriaus skaičiavimai pakartojami su antruoju modeliu, formulės ir atsakymai pateikti 2 priede.

## 2.11. Grynosios traukos jėgos ir pasipriešinimo jėgų balansas

Į lygtis įvedant papildomas reikšmes  $C_r$  (riedėjimo pasipriešinimo jėga) bei  $CDA$  (midelio ploto ir oro pasipriešinimo koeficiento sandauga) gauname dar 2 naujas formules (53,54) [41]:

$$F_{net} = W \cdot C_r + \frac{1}{2} \rho (V - W)^2 \cdot CDA; \frac{V}{W} \quad (53)$$

$$\mathcal{F} = \frac{W}{F_p} \cdot C_r + Z^2 \cdot \frac{1}{C'_{T}} \cdot \frac{CDA}{A_p}; \quad (54)$$

Įstačius (54) formulę į (52) formulę gauname lygtį (55) [41]:

$$\frac{W}{F_p} \cdot C_r + Z^2 \cdot \frac{1}{C'_{T}} \cdot \frac{CDA}{A_p} = \left\{ 1 + \left[ \frac{2 \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_v}{Z + \left( Z^2 + \frac{C'_{T}}{\eta_{swirl}} \right)^{\frac{1}{2}}} - 1 \right]^{-1} \right\}^{-1}; \quad (55)$$

$$\frac{3,8}{0,163} \cdot 0,005 + Z^2 \cdot \frac{1}{0,083} \cdot \frac{0,039}{0,126} = \left\{ 1 + \left[ \frac{2 \cdot 1 \cdot 0,922 \cdot 0,8}{Z + \left( Z^2 + \frac{0,083}{0,95} \right)^{\frac{1}{2}}} - 1 \right]^{-1} \right\}^{-1} \rightarrow Z = 0,21036 \quad (56)$$

Iš šios formulės turint visas reikšmes, galime rasti nežinomąjį „Z“, nustačius šią reikšmę galima lengvai rasti galimą maksimalų modelio greičio ir vėjo greičio santykį naudojantis (57) formule [41]:

$$\frac{V}{W} = \frac{1}{1-Z}; \quad (57)$$

$$\frac{V}{W} = \frac{1}{1-0,21036} = 1,266. \quad (58)$$

Šio skyriaus skaičiavimai pakartojami su antruoju modeliu, formulės ir atsakymai pateikti 2 priede.

## 2.12. DDFTTW transporto priemonės maksimalus greitis

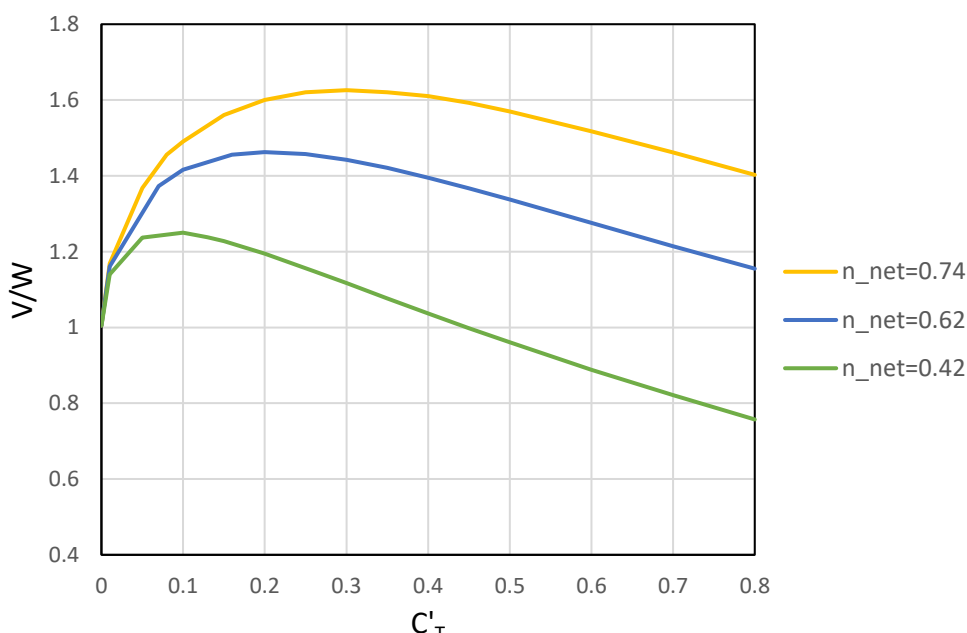
Prieš tai gautos 55 ir 57 formulės gali nustatyti vėjo ir transporto priemonės greičių santykį kaip tam tikrą šių parametrų (59,60,61) funkciją [41]:

$$\frac{V}{W} = f(C'_T, \eta_{net}, \eta_{swirl}, C'_r, CDA'); \quad (59)$$

$$C'_r = \frac{W}{F_p} \cdot C_r; \quad (60)$$

$$CDA' = \frac{CDA}{A_p}; \quad (61)$$

Naudojantis 59,60,61 išraiškomis nubraižomas  $\frac{V}{W}$  ir  $C'_T$  reikšmių priklausomybės grafikas esant skirtingoms  $\eta_{net}$  reikšmėms (žr. 35 pav.). Šis grafikas tampa esminiu įrankiu projektuojant DDFTTW transporto priemonę, kadangi juo remiantis galime matyti kokį santykinį maksimalų greitį bus galima pasiekti prie atitinkamų naudingumo koeficientų. Grafiko sudarymo metu  $\eta_{swirl}$ ,  $C'_r$ ,  $CDA'$  reikšmės buvo nekeičiamos [41].

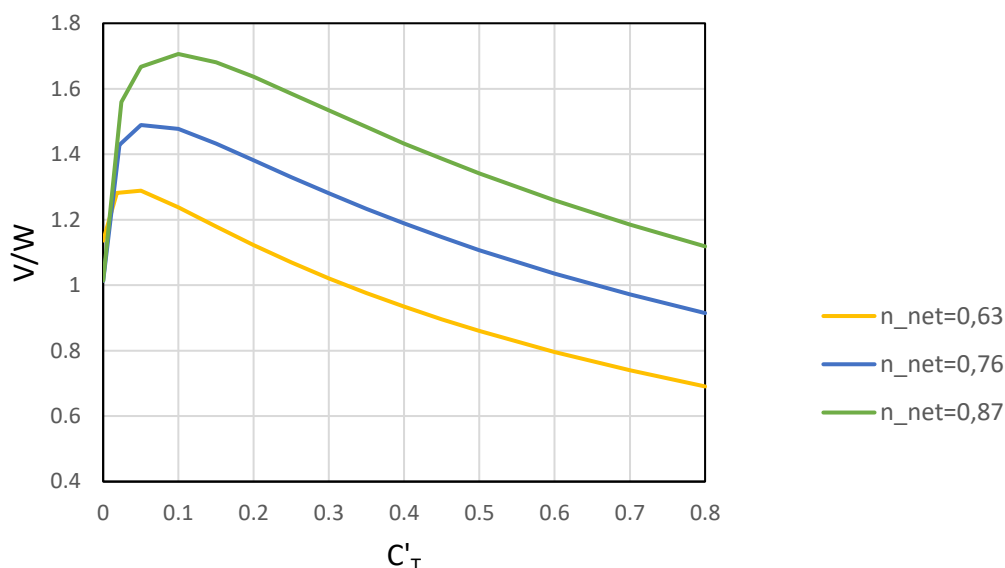


35 pav. Pirmojo modelio santykinio greičio  $\frac{V}{W}$  priklausomybė nuo  $C'_T, \eta_{net}, \eta_{swirl}, C'_r, CDA'$

Iš grafiko galime matyti, kad efektyvumo koeficientas smarkiai įtakoja transporto priemonės pasiekiamą maksimalų santykinį greitį  $\frac{V}{W}$ , dėl šios priežasties mechaninės perdavos bei orasraigčio

efektyvumas turi itin didelę reikšmę DDFTTW transporto priemonės projektavimo metu. Taip pat galima pastebėti, kad grafikui slenkant į dešinę santykinis greitis palaipsniui mažėja.

Siekiant palyginti pirmojo ir antrojo eksperimentinio modelio savybes sudaromas dar vienas grafikas (žr. 36 pav.) apibūdinantis antrojo eksperimentinio modelio santykinio greičio greičio  $\frac{V}{W}$  priklausomybę nuo  $C'_T, \eta_{net}, \eta_{swirl}, C'_r, CDA'$  parametrų:



**36 pav.** Antrojo modelio santykinio greičio  $\frac{V}{W}$  priklausomybė nuo  $C'_T, \eta_{net}, \eta_{swirl}, C'_r, CDA'$

Pirmojo ir antrojo modelio grafikai sudaryti esant skirtingiems naudingumo koeficientams, todėl tiesiogiai grafikų lyginti negalima, tačiau galima išvelgti bendruosius bruožus apibūdinančius šiuos grafikus. Pirmajame grafike su 0,74 efektyvumo koeficientu maksimalus santykinis greitis lygus 1,63, o su 0,62 koeficientu pasiekiamas 1,46 santykinis greitis, antrajame grafike su artimiausiais naudingumo koeficientais 0,76 ir 0,63 atitinkamai pasiekiami 1,71 ir 1,49 maksimalūs santykiniai greičiai. Remiantis rezultatais galima daryti išvadą, kad pirmojo ir antrojo modelio pasiekiami maksimalūs greičiai skiriasi neženkliai (iki 5 %), tačiau grafikuose išsiskiria kreivės, antrojo modelio atveju kreivės grafiko pradžioje daug statesnės, tai reiškia, kad šiuo atveju didesni greičiai pasiekiami prie mažesnio modifikuoto orasraigčio traukos koeficiento (lyginant su pirmuoju eksperimentiniu modeliu).

### 2.13. Supaprastintas skaičiavimas, siekiant išpildyti DDWFTTW sąlygą.

Projektuojant transporto priemonę kuri galėtų pasiekti didesnę už vėjo greitį galima naudotis supaprastinta DDFTTW sąlygos formule (62). Ši formulė nustato mažiausią propelerio kėlimo ir pasipriešinimo jėgos santykį reikalingą tokio tipo transporto priemonei viršyti vėjo greitį. Šioje formulėje nevertinamas riedėjimo pasipriešinimo koeficientas ir nuostoliai atsirandantys perdavoje. [31].

$$LD_{min} > \left(\frac{R_{sc}}{R_{rato}}\right) \cdot \left(\frac{N_{rato}}{N_{prop}}\right); \quad (62)$$

čia  $LD_{min}$  – minimalus propelerio kėlimo ir pasipriešinimo jėgos santykis,, kad transporto priemonė viršytų vėjo greitį;

$R_{sc}$  – propelerio slėgio centro spindulys (apytiksliai  $\frac{3}{4}$  propelerio spindulio);

$R_{rato}$  – rato spindulys;

$N_{rato}$  – varančiosios ašies dantračio krumplių skaičius;

$N_{prop}$  – propelerio ašies dantračio krumplių skaičius.

Remiantis 62 formule bus nustatytas mažiausias propelerio kėlimo ir pasipriešinimo santykis naudojant skirtingo skersmens varančiuosius ratus ir propelerius (2,3,4,5,6 lentelės):

**2 lentelė.** Minimali  $LD_{min}$  reikšmė naudojant 30 mm spindulio ratus ir skirtingų ilgių orasraigčius

$Prop_D$ , mm	$R_{sc}$ , mm	$R_{rato}$ , mm	$N_{rato}$	$N_{prop}$	$LD_{min}$
304,8	114,3	30	13	13	3,81
330,2	123,825	30	13	13	4,1275
355,6	133,35	30	13	13	4,445
381	142,875	30	13	13	4,7625
406,4	152,4	30	13	13	5,08
431,8	161,925	30	13	13	5,3975

**3 lentelė.** Minimali  $LD_{min}$  reikšmė naudojant 40 mm spindulio ratus ir skirtingų ilgių orasraigčius

$Prop_D$ , mm	$R_{sc}$ , mm	$R_{rato}$ , mm	$N_{rato}$	$N_{prop}$	$LD_{min}$
304,8	114,3	40	13	13	2,8575
330,2	123,825	40	13	13	3,095625
355,6	133,35	40	13	13	3,33375
381	142,875	40	13	13	3,571875
406,4	152,4	40	13	13	3,81
431,8	161,925	40	13	13	4,048125

**4 lentelė.** Minimali  $LD_{min}$  reikšmė naudojant 50 mm spindulio ratus ir skirtingų ilgių orasraigčius

$Prop_D$ , mm	$R_{sc}$ , mm	$R_{rato}$ , mm	$N_{rato}$	$N_{prop}$	$LD_{min}$
304,8	114,3	50	13	13	2,286
330,2	123,825	50	13	13	2,4765
355,6	133,35	50	13	13	2,667
381	142,875	50	13	13	2,8575
406,4	152,4	50	13	13	3,048
431,8	161,925	50	13	13	3,2385

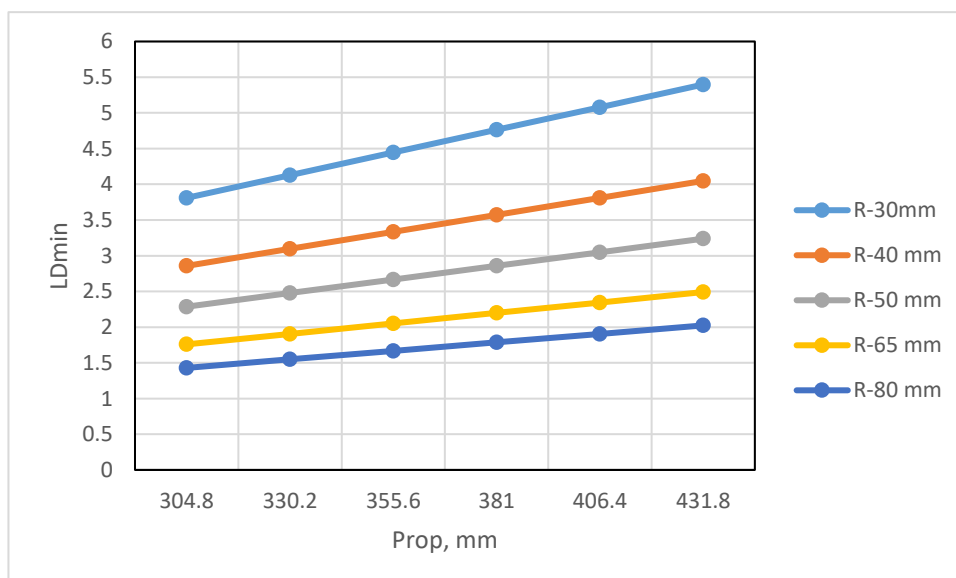
**5 lentelė.** Minimali  $LD_{min}$  reikšmė naudojant 65 mm spindulio ratus ir skirtingų ilgių orasraigčius

$Prop_D$ , mm	$R_{sc}$ , mm	$R_{rato}$ , mm	$N_{rato}$	$N_{prop}$	$LD_{min}$
304,8	114,3	65	13	13	1,758462
330,2	123,825	65	13	13	1,905
355,6	133,35	65	13	13	2,051538
381	142,875	65	13	13	2,198077
406,4	152,4	65	13	13	2,344615
431,8	161,925	65	13	13	2,491154

**6 lentelė.** Minimali  $LD_{min}$  reikšmė naudojant 80 mm spindulio ratus ir skirtingų ilgių orasraigčius

$Prop_D$ , mm	$R_{sc}$ , mm	$R_{rato}$ , mm	$N_{rato}$	$N_{prop}$	$LD_{min}$
304,8	114,3	80	13	13	1,42875
330,2	123,825	80	13	13	1,547813
355,6	133,35	80	13	13	1,666875
381	142,875	80	13	13	1,785938
406,4	152,4	80	13	13	1,905
431,8	161,925	80	13	13	2,024063

Siekiant palyginti lentelių duomenis sudaroma diagrama (žr. 37 pav.).



**37 pav.**  $LD_{min}$  priklausomybė nuo propelerio diametro ir rato spindulio

Iš diagramos matoma, kad  $LD_{min}$ , propelerio diametro ir rato spindulio priklausomybė yra tiesinė funkcija.  $LD_{min}$  santykis didėja kartu su orasraigčio diameteru bei rato spindulio augimu. Atsižvelgiant

į šios diagramos rezultatus būtina parinkti atitinkamus orasraigčio ir ratų dydžius, priešingu atveju DDFTTW transporto priemonė negalės viršyti vėjo greičio.

$LD_{min}$  argumentas yra svarbus, kadangi nuo jo priklauso orasraigčio sukuriama traukos jėga. Įvertinant 36 pav. grafiko duomenis galima daryti išvadą, kad kuo didesnis ratų spindulys ir kuo mažesnis orasraigčio spindulys tuo mažesnio orasraigčio kėlimo ir pasipriešinimo santykio reikės.

## 2.14. Rato perimetro ir orasraigčio žingsnio santykis

Dar vienas paprastas būdas gauti pradinius DDFTTW transporto priemonės parametrus galimas panaudojus rato perimetro ir orasraigčio žingsnio santykį [37].

Transporto priemonės greičio santykis (angl. *Vehicle speed ratio*) apskaičiuojamas pagal (63) formulę [37]:

$$VSR = \frac{O_z}{R_p}, \quad (64)$$

čia:  $VSR$  – transporto priemonės rato perimetro ir orasraigčio žingsnio santykis.

$R_p$  – rato perimetras;

$O_z$  – orasraigčio žingsnis.

Remiantis šia formule apskaičiuojamas antrojo eksperimentinio modelio santykis visiems turimiems orasraigčiams ir ratams:

7 lentelė. VSR apskaičiavimas

		Orasraigčio žingsnis, mm				
		114	102	152	203	97
Rato r, mm	40	0,45359159	0,4058451	0,60478878	0,80771134	0,38595074
	50	0,36287327	0,32467608	0,48383103	0,64616907	0,30876059
	55	0,32988479	0,29516008	0,43984639	0,58742643	0,28069145
	60	0,30239439	0,2705634	0,40319252	0,53847422	0,25730049
	70	0,25919519	0,23191149	0,34559359	0,46154933	0,22054328

Iš gautų rezultatų matome, kad maksimali VSR reikšmė gauta naudojant 203 mm žingsnio orasraigčių ir 40 mm spindulio ratus, o mažiausia VSR reikšmė gauta naudojant 97 mm žingsnio orasraigčių ir 70 mm spindulio ratus. Tam, kad DDFTTW transporto priemonė galėtų viršyti vėjo greitį, VSR turi būti didesnis už 0,7, šią sąlygą atitinka 24 iš 25 lentelėje matomų rato spindulio ir orasraigčio žingsnio kombinacijų [37].

### 3. Natūrinių modelių gamyba

Šiame skyriuje bus aptariamas dvejų skirtingų vėju varomų rotorinių transporto priemonių modelių surinkimas, naudotos medžiagos, įrankiai bei palyginti jų skirtumai ir privalumai.

#### 3.1. Pirmasis modelis

Pirmasis eksperimentinio tyrimo modelis buvo pagamintas naudojantis 3D spausdintuvu „Creality“ „Ender 5 plus“ bei panaudojant kitas standartines detales (ašelės, tvirtinimo detalės, guoliai, dantračiai, grandinė ir t.t.). Spausdintos detalės projektuotos naudojantis programa „Solidworks“, o spausdinimo funkcijoms parinkti buvo naudota „Ultimaker Cura“ programinė įranga. Spausdintos detalės gamybos metu buvo orientuotas taip, kad turėtų didesnę stiprumą iš tos krypties kurioje yra labiau apkrautos, detalių užpildas – 20 %. Bendra modelio masė – 1334 g. Pagrindiniai pirmojo eksperimentinio modelio parametrai pateikti 8 lentelėje.

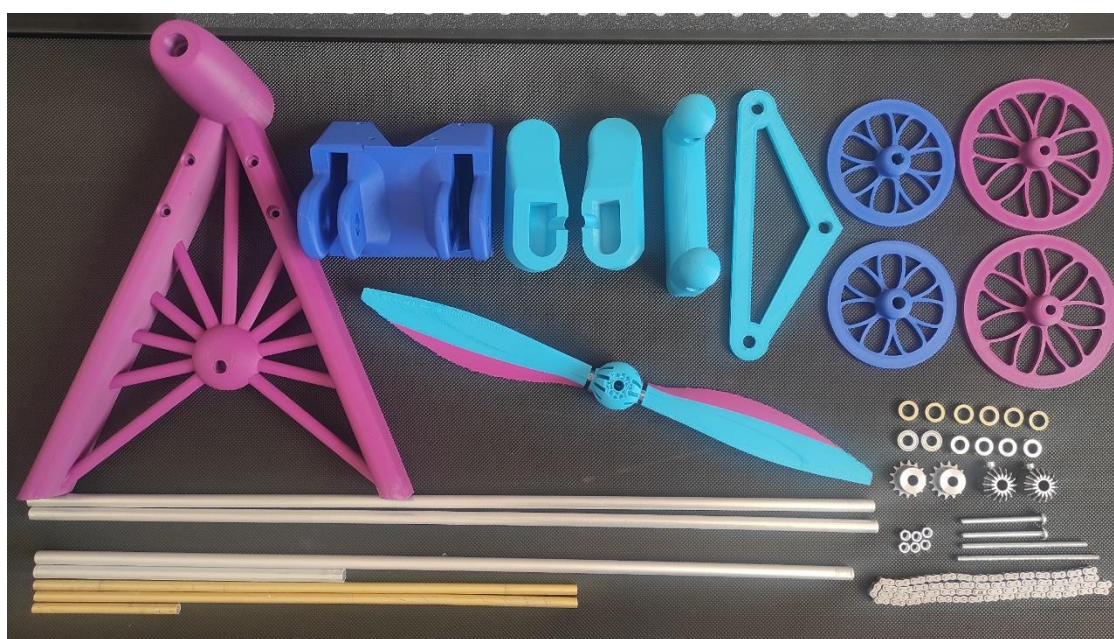
**8 lentelė.** Pirmojo eksperimentinio modelio pagrindiniai parametrai

Apibūdinimas	Reikšmė/parametras	Pastabos
Ilgis	785 mm	Su 120 mm skersmens galiniais ratais ir 100 mm skersmens priekiniais ratais
Plotis	400 mm	
Aukštis (be propelerio)	395 mm	Su 120 mm skersmens galiniais ratais ir 100 mm skersmens priekiniais ratais
Masė	1334 g	
Surinkimo komponentų skaičius	45 vnt.	Įskaitant tvirtinimo detales
Perdavos tipas	Kūginė krumpliaratinė ir grandininė	
Varančioji ašis	galinė	Galimybė keisti judėjimo kryptį – taip.
Pasipriešinimo koeficientas	0,234	

Modeliui surinkti panaudoti 45 komponentai, surinkimo procese nenaudotos jokios papildomos tvirtinimo detalės. Modelis pasižymi itin stipria rėmo konstrukcija, kurioje prie 14 km/val. greičio neįsijaučiamos vibracijos. Bendras mechaninės perdavos koeficientas siekia net 92,2 % , tačiau dėl naudotos kūginės krumpliaratių poros modelis sukelia ganėtinai didelį triukšmą prie didesnių greičių. Taip pat dėl ganėtinai sudėtingos mechaninės perdavos yra sudėtinga sureguliuoti visą mechanizmą taip, kad būtų pasiekta mažiausia įmanoma trintis. Toliau, 9 lentelėje pateikiama detali modelio detalių informacija, o 38 pav. matome išsklotinę iš kurios lengviau suprasti iš ko šis eksperimentinis modelis buvo surinktas.

**9 lentelė.** Pirmojo eksperimentinio modelio išsami detalių informacija

Objektas	Vnt.	Bendra masė g.	Pastabos
Žvaigždutė	2	48	04B z=14
Kūginis krumpliaratis	2	82	M1.5-1:1 z=16
Guolis 15x10x4	2	6	
Guolis 16x8x4	6	12	
Laikančioji rėmo dalis	1	312	Pagaminta 3D spausdintuvu
Perdavų laikiklis	1	158	Pagaminta 3D spausdintuvu
grandinė	1	99	04B (700 mm)
Galinės ašies laikikliai	2	108	Pagaminta 3D spausdintuvu
Priekinės ašies laikiklis	1	80	Pagaminta 3D spausdintuvu
Rėmą sustiprinantis trikampis	1	28	Pagaminta 3D spausdintuvu
Aliumininis vamzdelis 10x8	4	156	Skirtingų ilgių
Aliumininis vamzdelis 8x6	3	37	Skirtingų ilgių
Ratai 100 mm	2	35	Pagaminta 3D spausdintuvu
Ratai 120 mm	2	41	Pagaminta 3D spausdintuvu
Ašelių laikikliai	4	22	8 mm ašelėms
Tvirtinimo detalės	8	45	Varžtai, veržlės
Propeleris	1	65	Pagaminta 3D spausdintuvu bei apdirbta rankiniu būdu.

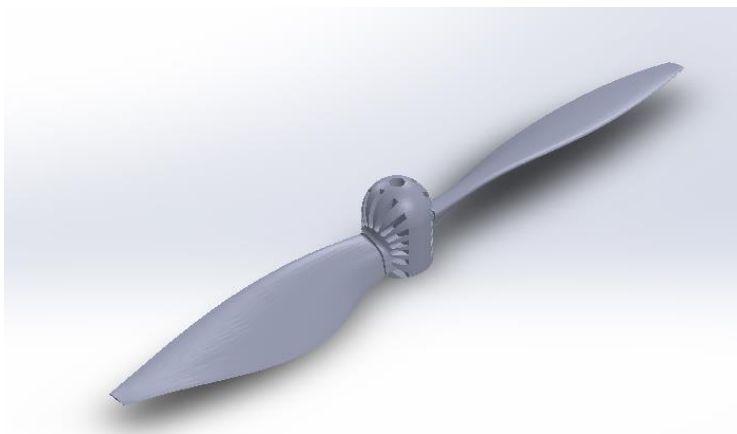


**38 pav.** Pirmojo eksperimentinio modelio detalių išsklotinė



### 3.1.1. Pirmojo modelio reguliuojamo žingsnio orasraigtis

Orasraigtis šiame projekte yra vienas iš svariausių komponentų, nuo jo priklauso kokia trauka bus generuojama ir kaip kis apsisukimų skaičius modeliui greitėjant. Tam, kad efektyviau išnaudoti turimas medžiagas ir laiką orasraigtis bus projektuojamas taip, kad galėtų keisti savo žingsnį (žr. 39 pav.), taip įgalinant atlikti daugiau eksperimentų kuriais bus nustatomas šio modelio gebėjimas judėti greičiau už vėją.



**39 pav.** Reguliuojamo žingsnio orasraigtis su fiksavimo vietomis „Solidworks“ programoje

Propelerio sparnai ir rotorius kaip ir prieš tai minėtos detalės bus pagamintas 3D spausdintuvu. Orasraigčio sparnų vidinėje pusėje (vieta kuri liečiasi su rotoriumi) bus sriegta M5 skylė, lygiai tokia pati skylė bus ir rotoriaus abejose pusėse (žr. 40 pav.).



**40 pav.** Reguliuojamo žingsnio orasraigtis pagamintas 3D spausdintuvu

Toks orasraigčio dizainas leis kiekvieną sparną individualiai pasukti tam tikru kampu aplink rotorius, o nuo to keisis bendras orasraigčio žingsnis. Sparnai papildomai galuose turės po fiksavimo skylutę, tam, kad orasraigčiui besisukant neatsipalaiduotų tvirtinimo detalės ir nepasikeistų žingsnis.

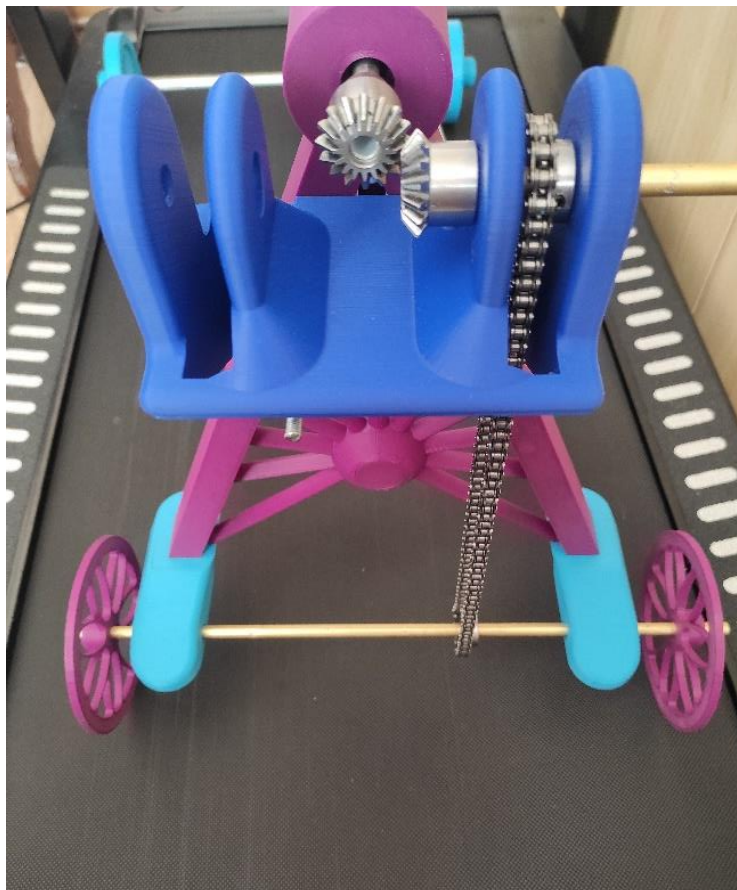
### 3.1.2. Pirmojo modelio mechaninė perdava

Pirmojo modelio mechaninę perdavą sudaro grandininė ir krumplinė pavara. Šių perdavų efektyvumo koeficientas yra lygus (42):

$$\eta_g = 0,98 \cdot 0,95 \cdot 0,99 = 0,92169; \quad (65)$$

Kūginės krumpliaratinės perdavos naudingumo koeficientas – 0,98. Grandininės perdavos naudingumo koeficientas – 0,95. Guolių naudingumo koeficientas – 0,99.

Šios mechaninės perdavos pasirinkimas pagrįstas tuo, kad orasraigčio ašis ir ratų varančioji ašis yra statmena viena kitai bei skirtingose plokštumose, todėl reikia pakeisti jėgos kryptį bei įveikti atstumą tarp plokštumų (žr. 41 pav.).



41 pav. Pirmojo natūrinio modelio mechaninė perdava

Taip pat grandininė ir kūginė krumpliaratinė perdava turi itin aukštą naudingumo koeficientą kas reiškia, kad bus prarandama tik maža dalis perduodamos energijos, vis dėlto šis perdavos pasirinkimas reiškia, kad sistemoje atsiranda sąlyginai nemažas papildomas svoris įtakojantis bendrą modelio veikimą.

### 3.2. Antrasis modelis

Antrasis eksperimentinio tyrimo modelis buvo pagamintas naudojant tą patį 3D spausdintuvą kaip ir pirmuoju atveju. Pagrindinis skirtumas tarp pirmojo ir šio modelio yra masė, nes šio modelio masė siekia tik – 280 g. Taip pat antrajame modelyje naudojama kitokia mechaninė perdava, joje liko tik kūginiai krumpliaraičiai, grandininė perdava buvo eliminuota taip sumažinant nuostolius bei bendrą modelio svorį. Pasikeitė ir varančiųjų ratų ašis, šiame modelyje varantieji ratai yra priekyje, tai įgalina supaprastinti visą konstrukciją, kadangi perdavos laikiklis tampa nebereklingas. Šiame modelyje itin svarbus kūginių krumpliaraičių poros pozicionavimas, tarp jų turi būti kuo mažesnis tarpas, priešingu atveju atsiras galios nuostoliai visoje sistemoje. Antrasis eksperimentinis modelis skiriasi nuo pirmojo ir propelerio pozicija, pirmajame modelyje propelerio ašis buvo horizontali, šiame modelyje

ji pakreipta kampu, dėl to propelerio sukuriama traukos jėga bus perduodama dvejais skirtingų krypčių vektoriais, tai sumažina galią horizontalėje, tačiau padidina modelio prispaudimo jėgą. Antrojo eksperimentinio modelio pagrindiniai parametrai pateikti 10 lentelėje.

**10 lentelė.** Antrojo eksperimentinio modelio pagrindiniai parametrai

Apibūdinimas	Reikšmė/parametras	Pastabos
Ilgis	650 mm	Su 100 mm skersmens ratais
Plotis	166 mm	
Aukštis (be propelerio)	220 mm	Su 100 mm skersmens ratais
Masė	280 g	
Surinkimo komponentų skaičius	23 vnt.	
Perdavos tipas	Kūginė krumpliaratinė	
Varančioji ašis	Priekinė	Galimybė keisti judėjimo kryptį – taip.
Pasipriešinimo koeficientas	0,516	

11 lentelėje pateikta antrojo eksperimentinio modelio detalių informacija. Esminiai pakeitimai lyginant su pirmuoju modeliu yra tai, kad naudojamos mažesnio spindulio ašelės ir vamzdeliai ir ženkliai sumažintas bendras detalių skaičius.

**11 lentelė.** Antrojo eksperimentinio modelio išsami detalių informacija

Objektas	Vnt.	Bendra masė g.	Pastabos
Kūginis krumpliaratis	2	6	1:1
Guolis 16x5x4	6	15	
Laikančioji rėmo dalis	1	49	Pagaminta 3D spausdintuvu
Priekinės ašies laikiklis	1	27	Pagaminta 3D spausdintuvu
Aliumininis vamzdelis 5x4 mm	4	30	Skirtingų ilgių
Aliumininis strypas 5 mm	1	43	Skirtingų ilgių
Ratai 100 mm	4	52	Pagaminta 3D spausdintuvu
Ašelių laikikliai	3	30	8 mm ašelėms
Propeleris	1	28	Pagaminta 3D spausdintuvu bei apdirbta rankiniu būdu.

### 3.2.1. Antrojo modelio orasraigčiai

Antrajame modelyje bus naudojami keli skirtingo tipo orasraigčiai (žr. 42 pav.). Orasraigčiai buvo parinkti įvertinant 2 skyriaus skaičiavimuose nustatytus parametrus, o jų matmenys pateikti 12 lentelėje.

**12 lentelė.** Antrojo eksperimentinio modelio orasraigčių parametrai

	Orasraigtis nr. 1	Orasraigtis nr. 2	Orasraigtis nr. 3	Orasraigtis nr. 4	Orasraigtis nr. 5
Matmenys (diametras x žingsnis)	279x114	330x102	356x152	406x203	422x97
Pastabos	Gaminta 3D spausdintuvu	Gaminta 3D spausdintuvu	Pritaikytas dideliems apsisukimų skaičiams	Pritaikytas mažiems apsisukimų skaičiams	Pritaikytas mažiems apsisukimų skaičiams



**42 pav.** Antrojo natūrinio modelio propeleriai naudoti eksperimentinio tyrimo metu

Naudojant šiuos 5 skirtingus orasraigčius bus atliekami eksperimentai. Kiekvienas orasraigtis bus komponuojamas su skirtingomis ratų poromis (skirsis ratų spindulys) (žr. 43 pav.).



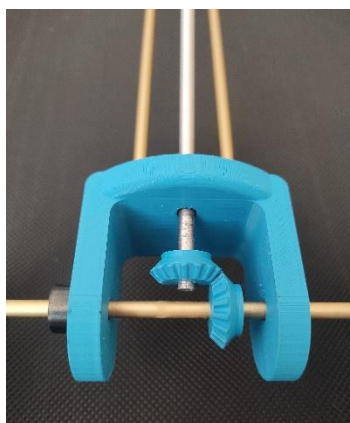
**43 pav.** Eksperimentinio tyrimo metu naudotos ratų poros (rato spinduliai - 40, 50, 55, 60, 70 mm.)

Atliekant eksperimentus bus vertinamas vėjo greičio viršijimo faktas naudojant skirtingas orasraigčių ir ratų porų kombinacijas.



### 3.2.2. Antrojo modelio mechaninė perdava

Antrajame modelyje perdava pasirinkta daug paprastesnė lyginant su pirmuoju modeliu. Šiuo atveju perdavą sudaro tik kūginių krumpliaraičių pora ir ašelės (žr. 44 pav.).



**44 pav.** Antrojo natūrinio modelio mechaninė perdava

Kūginiai krumpliaraičiai plastikiniai, taip dar labiau sumažinant bendrą modelio svorį, tačiau naudingumo koeficientas sumažėja dėl mažesnio detalės tikslumo. Šiuo atveju modelio propelerio ašis yra įstrižoje pozicijoje, būtent tai ir leidžia supaprastinti sistemos mechaninę perdavą eliminuojant grandinę su žvaigždutėmis. Supaprastintos perdavos neigiamybė yra tai, kad propelerio ašis yra įstriža, o tai reiškia, kad propelerio sukuriama traukos jėga perduodama dviemis vektoriais iš kurių vienas energiją perduoda statmenai žemyn, taip sukuriant didesnę sukibimo jėgą tarp ratų ir kontaktinio paviršiaus, tačiau prarandant dalį jėgos horizontalėje.

#### 4. Eksperimentinis tyrimas

Eksperimentinio tyrimo tikslas – nustatyti suprojektuotų modelių gebėjimą pasiekti ir viršyti vėjo greitį. Eksperimentui įgyvendinti bus pasitelktas įprastinis sportinis bėgimo takelis, kuris imituos vėją modelių atžvilgiu.

##### 4.1. Eksperimentinio tyrimo sąlygos:

Atliekant eksperimentinį tyrimą svarbu įvertinti aplinkos sąlygas veikiančias tiriamąjį objektą – šiuo atveju transporto priemonės modelius. Aplinkos sąlygos turi skirtingą įtaką eksperimentui, vienos iš jų įtakoja eksperimento eigą ir rezultatus nežymiai, o kitos priešingai – turi didelę įtaką, kuri gali kardinaliai pakeisti eksperimento rezultatus. Atsižvelgiant į tai suskirstysime veiksnius turinčius mažai ir daug įtakos šio eksperimento rezultatams.

Sąlygos turinčios mažai įtakos tyrimo rezultatams:

1. oro temperatūra;
2. oro slėgis;
3. bėgimo takelio nusidėvėjimas.

Sąlygos turinčios daug įtakos tyrimo rezultatams:

1. maksimalus greitis (bėgimo takelio);
2. modelio surinkimo kokybė;
3. bėgimo takelio posvyrio kampas.

Eksperimentinio tyrimo metu naudotas bėgimo takelis „BT14“, kurio pagrindinės charakteristikos aktualios šiam eksperimentui pateiktos 13 lentelėje.

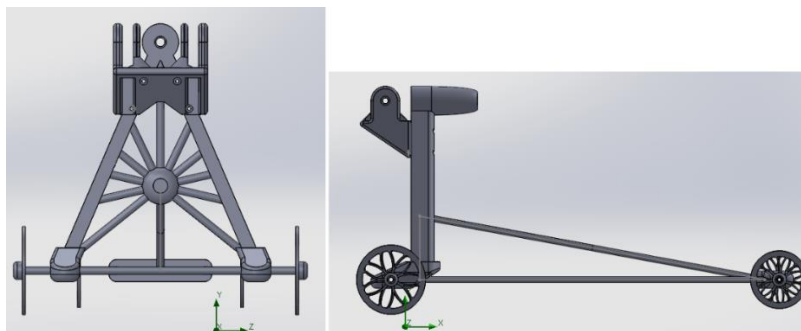
**13 lentelė.** „BT14“ bėgimo takelio charakteristikos

Bėgimo takelio paviršius	130x48
Greičio diapazonas	1-14 km/val
Įkalnė	0-12%
Maksimalus leistinas svoris	120 kg
Bėgimo takelio svoris	53 kg

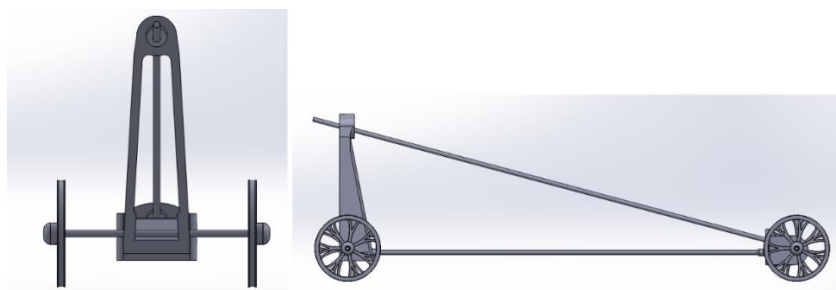
Papildomai išmatuotas bėgimo takelio pradinis pokrypio kampas, nustatyta, kad takelis turi 4 laipsnių įkalnę pradinėje padėtyje, todėl bėgimo takelis buvo išlygintas naudojant du skirtingus prietaisus (mobiliojo telefono gulsčiukas ir statybinis gulsčiukas. Abiejų prietaisų rodmenys sutapo, todėl galima daryti prielaidą, kad bėgimo takelis eksperimentui buvo paruoštas tinkamai, o pokrypio kampas įtakos eksperimentinio tyrimo rezultatus nežymiai (kadangi paklaida egzistuoja vis tiek).

## 4.2. Eksperimentinio tyrimo objektas

Eksperimentinio tyrimo objektas – 3D spausdintuvu pagaminti modeliai (žr. 45, 46 pav.) varomi tik vėjo energijos. Eksperimento metu bus tiriamas dviejų skirtingų modelių gebėjimas pasiekti ir viršyti vėjo greitį.



45 pav. Pirmojo modelio vaizdai iš galo ir šono (be orasraigčio)



46 pav. Antrojo modelio vaizdai iš galo ir šono (be orasraigčio)

## 4.3. Eksperimento eiga

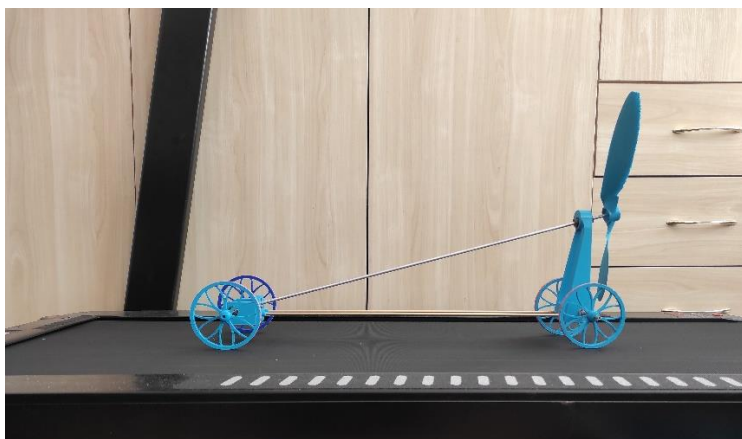
Bėgimo takelio eksperimentas – tai eksperimentas kurio metu galima patikrinti ar vėju varomas modelis iš tikrųjų gali pasiekti didesnę už vėjo greitį. Eksperimento natūriniai objektai pavaizduoti (47, 48 pav.).



47 pav. Pirmasis natūrinis modelis eksperimento metu

Eksperimento tikslas – įsitikinti, kad modelis bėgimo takelio atžvilgiu juda į priekį, tai reikštų, kad modelis juda greitesniu už vėją greičiu. Priešingu atveju modelis juda lėčiau už vėją, arba modeliui

nekeičiant pozicijos bėgimo takelio atžvilgiu – vėjo greičiu. Eksperimentai kartojami po 3 kartus ir fiksuojamas faktas, kuris patvirtina arba paneigia judėjimą didesniu už vėją greičiu.



48 pav. Antrasis natūrinis modelis eksperimento metu

#### Pirmojo modelio eksperimentų rezultatai:

Keičiant eksperimentinio modelio ratų spindulius ir orasraigčio žingsnį buvo atlikti 12 eksperimentų. Visų 12 eksperimentų metu modelis riedėjo atgal, t.y. nepasiekė vėjo greičio. Eksperimento metu buvo naudoti du skirtingi ratų spinduliai – 50, 60 mm bei 6 skirtingos propelerio žingsnio opcijos.

#### Antrojo modelio eksperimentų rezultatai:

Keičiant eksperimentinio modelio ratus ir orasraigčius buvo atlikti 25 eksperimentai, rezultatai pateikti 14 lentelėje.

14 lentelė Skirtingų orasraigčių ir ratų porų komponuočių eksperimentinių tyrimų rezultatai

	Pirmasis orasraigtis 279x114 mm	Antrasis orasraigtis 330x102 mm	Trečiasis orasraigtis 356x152 mm	Ketvirtasis orasraigtis 406x203 mm	Penktasis orasraigtis 422x97 mm
40 mm	V<W	V<W	V<W	V<W	V<W
50 mm	V<W	V<W	V<W	V<W	V=W
55 mm	V<W	V<W	V<W	V<W	V>W
60 mm	V<W	V<W	V<W	V<W	V>W
70 mm	V<W	V<W	V<W	V<W	V<W

Eksperimentų metu nustatyta, kad tik su vienu orasraigčiu ir atitinkamais ratų spinduliais antrasis eksperimentinis modelis pasiekė ir viršijo vėjo greitį, t.y. bėgimo takelio atžvilgiu judėjo pirmyn. Naudojant 422x97 mm orasraigčių pagamintą 3D spausdintuvu dvejais atvejais buvo nepasiektas vėjo greitis (transporto priemonė judėjo atgal), vienu atveju greitis buvo lygus vėjo greičiui (transporto priemonė akivaizdžiai nejudėjo nei pirmyn nei atgal) ir dar dvejais atvejais vėjo greitis buvo viršytas (transporto priemonė judėjo pirmyn).



## Išvados

1. Atlikta vėju varomų rotorinių transporto priemonių vystymosi raidos, jų tipų, patentų bei tendencijų analizė, apžvelgti tokio tipo transporto priemonių pagrindiniai parametrai bei rekordai, aptartos didžiausios šių transporto priemonių varžybos, nustatyta, kad dabartiniai rekordai yra šie: pavėjui – 3 kartai greičiau už vėjo greitį, prieš vėją – 2,1 karto greičiau už vėjo greitį.
2. Atlikti vėju varomos rotorinės transporto priemonės analitiniai ir skaitiniai tyrimai. Skaitinio tyrimo metu nustatytas aerodinaminis pasipriešinimo koeficientas ir jėga, pirmojo modelio aerodinaminis pasipriešinimo koeficientas lygus 0,906, jėga 0,623 N, antrojo modelio atveju koeficientas lygus 0,436, jėga 0,06 N. Analitinio tyrimo metu apskaičiuota riedėjimo pasipriešinimo jėga, pirmajam modeliui – 0,065 N, antrajam – 0,014 N. Atlikta propelerio efektyvumo analizė. Atlikti du supaprastinti „DDFTTW“ transporto priemonės skaičiavimai, kuriais nustatyti pradiniai transporto priemonių parametrai. Analitiniais metodais sudaryti V/W priklausomybės nuo transporto priemonės parametrų grafikai, nustatyta, kad abiejų modelių atveju judėjimas didesniu už vėją greičiu yra galimas.
3. Pagaminti du natūriniai vėju varomos rotorinės transporto priemonės modeliai. Modeliai palyginti tarpusavyje, aptartos naudotos detalės bei pagrindiniai parametrai. Nustatyta, kad pirmajame modelyje perdavos naudingumo koeficientas yra 0,92169, o antrajame 0,9702. Pirmajam modeliui suprojektuotas ir pagamintas reguliuojamo žingsnio orasraigtis, antrajam modeliui parinkti 5 skirtingų tipų orasraigčiai.
4. Atlikti eksperimentiniai vėju varomos rotorinės transporto priemonės modelių tyrimai. Tyrimų metu nustatyta, kad pirmasis modelis nepasiekė ir neviršijo vėjo greičio atlikus 12 skirtingų eksperimentų, kurių metu buvo naudojamos dvi skirtingos ratų poros ir reguliuojamo žingsnio orasraigtis. Antrojo modelio atveju atlikti 25 eksperimentai, naudojant orasraigčius nr. 1-4 nei vieno eksperimento metu nebuvo pasiektas ar viršytas vėjo greitis. Naudojant orasraigtį nr. 5 (422x97 mm) kuris pagamintas 3D spausdintuvu dvejais atvejais vėjo greitis nebuvo pasiektas, vienu atveju modelio greitis buvo lygus vėjo greičiui ir dar dvejais atvejais vėjo greitis buvo viršytas.

## Literatūros sąrašas

1. Vėju varoma rotorinė transporto priemonė „Racing Aeolus“ varžybose [žiūrėta: 2022-04-28]. Prieiga per: [http://www.windenergyevents.com/wp-content/uploads/2012/11/IMG\\_0001-49.jpg](http://www.windenergyevents.com/wp-content/uploads/2012/11/IMG_0001-49.jpg)
2. No tech magazine, Guido Vigevano's Wind Car (1335) [žiūrėta: 2022-04-28]. Prieiga per: <https://www.notechmagazine.com/2009/07/guido-vigevanos-wind-car-1335.html>
3. Guido van Vigevano mechanizmo brėžiniai [žiūrėta: 2022-05-02]. Prieiga per: <http://dmd.mpiwg-berlin.mpg.de/author/dmd/database/resultpage?-table=ded&format=resultpage&theauthor=Guido%20da%20Vigevano&theyear=1335>
4. The weird arms race between Napoleon and England [žiūrėta: 2022-04-28]. Prieiga per: <https://www.wearethemighty.com/articles/the-weird-arms-race-between-napoleon-and-england/>
5. Herman Helmeke patentas Nr. US775971A [žiūrėta: 2022-04-28]. Prieiga per: <https://patents.google.com/patent/US775971A/en>
6. Gustav Tust patentas Nr. US1471870A [žiūrėta: 2022-04-28]. Prieiga per: <https://patents.google.com/patent/US1471870>
7. Carl A Rettman patentas Nr. US2047155A [žiūrėta: 2022-04-28]. Prieiga per: <https://patents.google.com/patent/US2047155A/en>
8. Robert J Annis patentas Nr. US2677344A [žiūrėta: 2022-04-28]. Prieiga per: <https://patents.google.com/patent/US2677344A/en>
9. Faster than the wind, Andrew B. Bauer and associates, Orange, California [žiūrėta: 2022-04-28]. Prieiga per: <https://projects.m-qp-m.us/donkeypuss/wp-content/uploads/2009/06/Bauer-Faster-Than-The-Wind-The-Ancient-Interface.pdf>
10. The Blackbird Wind Rover: The Most Counterintuitive Machine That Actually Works [žiūrėta: 2022-04-28]. Prieiga per: <https://www.hotcars.com/the-blackbird-wind-rover-the-most-counterintuitive-machine-that-actually-works/>
11. Direct Upwind and Downwind Record Attempts [žiūrėta: 2022-04-28]. Prieiga per: <http://www.nalsa.org/DownWind.html>
12. DDFTTW transporto priemonė ir schema su paaikškinimu [žiūrėta: 2022-05-02]. Prieiga per: <https://www.lockhaven.edu/~dsimanek/museum/ddwfttw.htm>
13. ScienceDaily, 2008 m. rugpjūčio 28 d. leidinys [žiūrėta: 2022-04-28]. Prieiga per: <https://www.sciencedaily.com/releases/2008/08/080827104702.htm>
14. „Inventus Ventomobile“ transporto priemonė „Aeolus Racing“ varžybose, 2008 m. [žiūrėta: 2022-05-02]. Prieiga per: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/90/AeolusRace2008-2.png>
15. Racing Aeolus varžybų puslapis [žiūrėta: 2022-04-28]. Prieiga per: <https://www.racingaeolus.online/>
16. „Chinook 9“ komandos laimėjimas „Aeolus Racing“ varžybose, 2019 m. [žiūrėta: 2022-05-03]. Prieiga per: <https://www.etsmtl.ca/en/news/2019/chinook-vainqueur-racing-aeolus-den-helder/>
17. Vėju varoma rotorinė transporto priemonė turinti orasraigčio gaubtą [žiūrėta: 2022-04-29]. Prieiga per: [http://www.change-climate.com/Transport\\_Land\\_Sea\\_Sustainable/Assisted\\_Ships\\_Sails\\_Solar\\_Projects\\_Marine\\_Pollution/Pictures\\_Wind\\_Solar\\_Assisted\\_Ships\\_Boats\\_Low\\_Carbon/Rotor-Sail-Elfwegentocht.jpg](http://www.change-climate.com/Transport_Land_Sea_Sustainable/Assisted_Ships_Sails_Solar_Projects_Marine_Pollution/Pictures_Wind_Solar_Assisted_Ships_Boats_Low_Carbon/Rotor-Sail-Elfwegentocht.jpg)
18. Orasraigčių tipai [žiūrėta: 2022-04-29]. Prieiga per: <https://i.ytimg.com/vi/60onEs-QH68/sddefault.jpg>

19. Orasraigčių menčių tipai [žiūrėta: 2022-05-03]. Prieiga per: <https://thumbs.dreamstime.com/z/propeller-screw-icon-set-engine-motor-image-propeller-screw-icon-set-engine-motor-image-type-fan-to-produce-thrust-151799355.jpg>
20. Diržinės perdavos [žiūrėta: 2022-05-03]. Prieiga per: <https://www.mrosupply.com/blog/belt-drives/>
21. Belt Drive – Types, Advantages And Disadvantages [žiūrėta: 2022-04-28]. Prieiga per: <https://www.mecholic.com/2015/11/belt-drive-advantage-and-disadvantage.html>.
22. What Is Chain Drive? Advantages and Disadvantages of chain drive over Belt and Rope Drive [žiūrėta: 2022-04-28]. Prieiga per: <https://www.mecholic.com/2018/10/what-is-chain-drive-advantages.html>
23. Advantages and Disadvantages of gears [žiūrėta: 2022-04-28]. Prieiga per: <https://www.polytechnichub.com/advantages-disadvantages-gears/>.
24. Automotive design [žiūrėta: 2022-04-28]. Prieiga per: <https://www.britannica.com/technology/automobile/Chassis>.
25. Unibody tipo kėbulas [žiūrėta: 2022-05-04]. Prieiga per: <https://cfx-wp-images.imgix.net/2020/05/Unibody-car-frame-scaled.jpg?auto=compress%2Cformat&fit=scale&h=658&ixlib=php-3.3.0&w=1024&wpsize=large&s=be4da17728f12348dc4173c47b6091ce>
26. Downwind faster than the wind [žiūrėta: 2022-04-16]. Prieiga per: <http://dwfttw.blogspot.com/#4>
27. Rolling friction and rolling resistance [žiūrėta: 2022-04-25]. Prieiga per: [https://www.engineeringtoolbox.com/rolling-friction-resistance-d\\_1303.html](https://www.engineeringtoolbox.com/rolling-friction-resistance-d_1303.html)
28. The physics of air resistance [žiūrėta: 2022-04-28]. Prieiga per: <https://aapt.scitation.org/doi/abs/10.1119/1.2340979>
29. The Drag Equation [žiūrėta: 2022-05-03]. Prieiga per: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/drageq.html>
30. Finding Drag Coefficient using Solidworks Flow Simulation [žiūrėta: 2022-05-02]. Prieiga per: <https://bayanbox.ir/view/2473205862948929892/Drag-coefficient-of-sphere-Solidworks-flow-simulation-tutorial.pdf>
31. Simple DDWFTTW Minimum L/D Calculator [žiūrėta: 2022-05-01]. Prieiga per: [https://jmrware.com/misc/ddwfttw\\_min\\_ld.html](https://jmrware.com/misc/ddwfttw_min_ld.html)
32. Drag quation calculator [žiūrėta: 2022-05-02]. Prieiga per: <https://www.omnicalculator.com/physics/drag-equation>
33. Counterintuitive Performance of Land and Sea Yachts, Kirk T. McDonald, 2021 liepos 22 d. [žiūrėta: 2022-04-28]. Prieiga per: <http://kirkmcd.princeton.edu/examples/yacht.pdf>
34. A. Bauer Winc Machine 1969 [žiūrėta: 2022-04-29]. Prieiga per: [https://www.youtube.com/watch?v=yFPomTq\\_PRU&ab\\_channel=piratewoodleg](https://www.youtube.com/watch?v=yFPomTq_PRU&ab_channel=piratewoodleg)
35. Wind-driven veicle sets a speed record [žiūrėta: 2022-05-02]. Prieiga per: <https://www.electronicdesign.com/technologies/alternative-energy/article/21194906/winddriven-vehicle-sets-a-speed-record>
36. Mašinų mechanikos pagrindai. Krumpliniai mechanizmai. Kinmatinė analizė [Žiūrėta: 2022-05-03]. Prieiga per: <https://www.ebooks.ktu.lt/eb/1375/masinu-mechanikos-pagrindai-krumpliniai-mechanizmai-kinematine-analize/>

37. Building the Vehicle Physicists Called Impossible [žiūrēta: 2022-04-27]. Prieiga per: [https://www.youtube.com/watch?v=VUgajGv4Aok&ab\\_channel=XylaFoxlin](https://www.youtube.com/watch?v=VUgajGv4Aok&ab_channel=XylaFoxlin)
38. One of the world's largest sustainability races [žiūrēta: 2022-05-08]. Prieiga per: <https://www.windenergyevents.com/the-race/>
39. Report for the Submission of Data Supporting World Record Runs in the Category Dead Upwind Vehicle [žiūrēta: 2022-05-16]. Prieiga per: <https://www.nalsa.org/BlackBirdDDWSR/UpwindSubmissionReportNALSA.pdf>
40. Report for the Submission of Data Supporting World Record Runs in the Dead Downwind Vehicle Category [žiūrēta 2022-05-16]. Prieiga per: <http://www.nalsa.org/BlackBirdDDWSR/NALSA%20Submission%20report.pdf>
41. Dead-Downwind Faster Than The Wind (DDWFTTW) Analysis [žiūrēta: 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.boatdesign.net/attachments/ddw2-pdf.28167/>

## Priedai

### 1 priedas. Pirmojo modelio analitiniai skaičiavimai „Microsoft Excel“ programoje

Analitiniai skaičiavimai (1 modelis)									
Argumentas	Pavadinimas	Skaitinė reikšmė	Pastabos	Matavimo vnt.	Formulė	Atsakymas		Atsakymas	
V	Transporto priemonės greitis;	5,000	Priimamas 18km/h	m/s	$P_t = F_t \cdot V \cdot \eta_t$	0,327			
W	Vėjo greitis	3,889	Priimamas 14 km/h	m/s	$P_p = F_p \cdot \frac{V - W}{\eta_p}$	0,302	$\mathcal{F} = \frac{F_{net}}{F_p}$	0,598	
F <sub>t</sub>	Ratų riedėjimo pasipriešinimo jėga	0,065		N			$Z = \frac{V - W}{V}$	0,222	
F <sub>p</sub>	Propelerio traukos jėga	0,163		N	$P_p = P_t \cdot \eta_g$	0,302			
P <sub>t</sub>	Varančiųjų ratų sukuriama galia, ašyje	0,327		Nm/s	$F_p = F_t \cdot \frac{V}{V - W} \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_p$	0,163	$C'_T = \frac{2F_p}{\rho \cdot V^2 \cdot A_p}$	0,083	
P <sub>p</sub>	propelerio sukuriama galia, ašyje	0,302		Nm/s					
A <sub>p</sub>	Propelerio disko plotas	0,126		m^2	$F_{net} = F_p - F_t = F_t \cdot \left( \frac{V}{V - W} \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_p - 1 \right)$	0,097	$\mathcal{F} = \left\{ 1 + \left[ \frac{2 \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_p}{Z + (Z^2 + \frac{C'_T}{\eta_{swirl}})^{\frac{1}{2}}} - 1 \right]^{-1} \right\}^{-1}$	0,598	
ρ	Oro tankis	1,250		kg/m^3					
η <sub>t</sub>	riedėjimo efektyvumo koeficientas	1,000	1, jei nepraslysta ratai	Bedimensis	$\frac{V}{V - W} \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_p > 1$	2,489			
η <sub>g</sub>	mechaninių perdavų efektyvumo koeficientas	0,922		Bedimensis			$F_{net} = W \cdot C_r + \frac{1}{2} \rho (V - W)^2 \cdot CDA$	0,050	
η <sub>p</sub>	propelerio efektyvumo koeficientas	0,600		Bedimensis	$F_{net} = F_p \left\{ 1 + \left[ \frac{V}{V - W} \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_p - 1 \right]^{-1} \right\}^{-1}$	0,097			
η <sub>i</sub>	Propelerio inducēt efektyvumo koeficientas	0,751		Bedimensis			$\mathcal{F} = \frac{W}{F_p} \cdot C_r + Z^2 \cdot \frac{1}{C'_T} \cdot \frac{CDA}{A_p}$	0,289	
η <sub>v</sub>	propelerio profilio efektyvumo koeficientas	0,799		Bedimensis	$\eta_p = \eta_i \cdot \eta_v$				
η <sub>swirl</sub>	Propelerio swirl efektyvumo koeficientas	0,950	Priimtas 0,95	Bedimensis	$\eta_i = \frac{2}{1 + \left( 1 + \frac{2F_p}{\rho(V - W)^2 \cdot A_p} \cdot \frac{1}{\eta_{swirl}} \right)^{\frac{1}{2}}}$	0,751	$\frac{W}{F_p} \cdot C_r + Z^2 \cdot \frac{1}{C'_T} \cdot \frac{CDA}{A_p} = \left\{ 1 + \left[ \frac{2 \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_p}{Z + (Z^2 + \frac{C'_T}{\eta_{swirl}})^{\frac{1}{2}}} - 1 \right]^{-1} \right\}^{-1}$	0,210	
N	Svoris	13,087		N					
m	Masė	1,334		kg					
g	Laisvojo kritimo pagreitis	9,810		m/s^2	$F_{net} = F_p \left\{ 1 + \left[ \frac{2V \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_p}{(V - W) + ((V - W)^2 + \frac{2F_p}{\rho \cdot A_p} \cdot \frac{1}{\eta_{swirl}})^{\frac{1}{2}}} - 1 \right]^{-1} \right\}^{-1}$	0,097	$\frac{V}{W} = \frac{1}{1 - Z}$	1,266	
r <sub>p</sub>	Propelerio spindulys	0,200		m					
C <sub>r</sub>	Riedėjimo pasipriešinimo koeficientas	0,005	Priimtas 0,005	Bedimensis	$F_{net} = F_p \left\{ 1 + \left[ V \cdot R_p \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_p \cdot \left( \frac{2\pi\rho}{F_p} \cdot \eta_{swirl} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right]^{-1} \right\}^{-1}$	0,131			
c <sub>o</sub>	Oro pasipriešinimo koeficientas	0,906	Apskaičiuotas Solidworks	Bedimensis					
A	Midelio plotas	0,044		m^2	$A_p = \pi \cdot r_p^2$	0,126			
F <sub>o</sub>	oro pasipriešinimo jėga	0,623		N	$F_t = c \cdot N$	0,065			
η <sub>net</sub>	riedėjimo, propelerio, propelerio profilio efektyvumų sandauga	0,737		Bedimensis	$N = m \cdot g$	13,087			
C <sub>r</sub> '	Modifikuotas riedėjimo pasipriešinimas	0,119		Bedimensis					
CDA	midelio ploto ir oro pasipriešinimo koeficiento sandauga	0,040		Bedimensis					

## 2 priedas. Antrojo modelio analitiniai skaičiavimai „Microsoft Excel“ programoje

Analitiniai skaičiavimai (2 modelis)								
Argumentas	Pavadinimas	Skaitinė reikšmė	Pastabos	Matavimo vnt.	Formulė	Atsakymas		Atsakymas
V	Transporto priemonės greitis;	5,000	Priimamas 18km/h	m/s	$P_t = F_t \cdot V \cdot \eta_t$	0,069	$\mathcal{F} = \frac{F_{net}}{F_p}$	0,618
W	Vėjo greitis	3,889	Priimamas 14 km/h	m/s	$P_p = F_p \cdot \frac{V - W}{\eta_p}$	0,067		
F <sub>t</sub>	Ratų riedėjimo pasipriešinimo jėga	0,014		N		0,067	$Z = \frac{V - W}{V}$	0,222
F <sub>p</sub>	Propelerio traukos jėga	0,036		N	$P_p = P_t \cdot \eta_g$	0,036	$C'_T = \frac{2F_p}{\rho \cdot V^2 \cdot A_p}$	0,018
P <sub>t</sub>	Varančiųjų ratų sukuriama galia, ašyje	0,069		Nm/s		0,036	$F_{net} = F_p - F_t = F_t \cdot \left( \frac{V}{V - W} \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_p - 1 \right)$	0,022
P <sub>p</sub>	propelerio sukuriama galia, ašyje	0,067		Nm/s	$F_p = F_t \cdot \frac{V}{V - W} \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_p$	0,036		
A <sub>p</sub>	Propelerio disko plotas	0,126		m <sup>2</sup>		0,022	$\mathcal{F} = \left\{ 1 + \left[ \frac{2 \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_p}{Z + (Z^2 + \frac{C'_T}{\eta_{swirl}})^{\frac{1}{2}}} - 1 \right]^{-1} \right\}^{-1}$	0,635
ρ	Oro tankis	1,250		kg/m <sup>3</sup>		0,022		
η <sub>t</sub>	riedėjimo efektyvumo koeficientas	1,000	1, jei nepraslysta ratai	Bedimensis	$\frac{V}{V - W} \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_p > 1$	2,620	$F_{net} = W \cdot C_r + \frac{1}{2} \rho (V - W)^2 \cdot CDA$	0,022
η <sub>g</sub>	mechaninių perdavų efektyvumo koefici	0,970		Bedimensis		0,022	$\mathcal{F} = \frac{W}{F_p} \cdot C_r + Z^2 \cdot \frac{1}{C'_T} \cdot \frac{CDA}{A_p}$	0,614
η <sub>p</sub>	propelerio efektyvumo koeficientas	0,600		Bedimensis	$F_{net} = F_p \left\{ 1 + \left[ \frac{V}{V - W} \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_p - 1 \right]^{-1} \right\}^{-1}$	0,022		
η <sub>i</sub>	Propelerio induced efektyvumo koeficientas	0,918		Bedimensis	$\eta_p = \eta_i \cdot \eta_v$		$\frac{W}{F_p} \cdot C_r + Z^2 \cdot \frac{1}{C'_T} \cdot \frac{CDA}{A_p} = \left\{ 1 + \left[ \frac{2 \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_p}{Z + (Z^2 + \frac{C'_T}{\eta_{swirl}})^{\frac{1}{2}}} - 1 \right]^{-1} \right\}^{-1}$	0,210
η <sub>v</sub>	propelerio profilio efektyvumo koeficientas	0,654		Bedimensis				
η <sub>swirl</sub>	Propelerio swirl efektyvumo koeficientas	0,950	Priimtas 0,95	Bedimensis	$\eta_i = \frac{2}{1 + \left( 1 + \frac{2F_p}{\rho(V - W)^2 \cdot A_p} \cdot \frac{1}{\eta_{swirl}} \right)^{\frac{1}{2}}}$	0,918	$\frac{V}{W} = \frac{1}{1 - Z}$	1,266
N	Svoris	2,747		N		0,022		
m	Masė	0,280		kg		0,032		
g	Laisvojo kritimo pagreitis	9,810		m/s <sup>2</sup>	$F_{net} = F_p \left\{ 1 + \left[ \frac{2V \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_p}{(V - W) + ((V - W)^2 + \frac{2F_p}{\rho \cdot A_p} \cdot \frac{1}{\eta_{swirl}})^{\frac{1}{2}}} - 1 \right]^{-1} \right\}^{-1}$	0,032		
r <sub>p</sub>	Propelerio spindulys	0,200		m		0,032		
C <sub>r</sub>	Riedėjimo pasipriešinimo koeficientas	0,005	Priimtas 0,005	Bedimensis	$F_{net} = F_p \left\{ 1 + \left[ V \cdot R_p \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_p \cdot \left( \frac{2\pi\rho}{F_p} \cdot \eta_{swirl} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right]^{-1} \right\}^{-1}$	0,032		
C <sub>o</sub>	Oro pasipriešinimo koeficientas	0,436	Apskaičiuotas Solidworks	Bedimensis		0,126		
A	Midelio plotas	0,009		m <sup>2</sup>	$A_p = \pi \cdot r_p^2$	0,014		
F <sub>o</sub>	oro pasipriešinimo jėga	0,060		N	$F_t = c \cdot N$	2,747		
η <sub>net</sub>	riedėjimo, propelerio, propelerio profilio efektyvumų sandauga	0,634		Bedimensis	$N = m \cdot g$			
C <sub>r</sub>	Modifikuotas riedėjimo pasipriešinimas	0,540		Bedimensis				
CDA	midelio ploto ir oro pasipriešinimo koeficiento sandauga	0,004		Bedimensis				

### 3 priedas. Pirmojo modelio analitiniai skaičiavimai „Microsoft Excel“ programoje, grafiko sudarymui

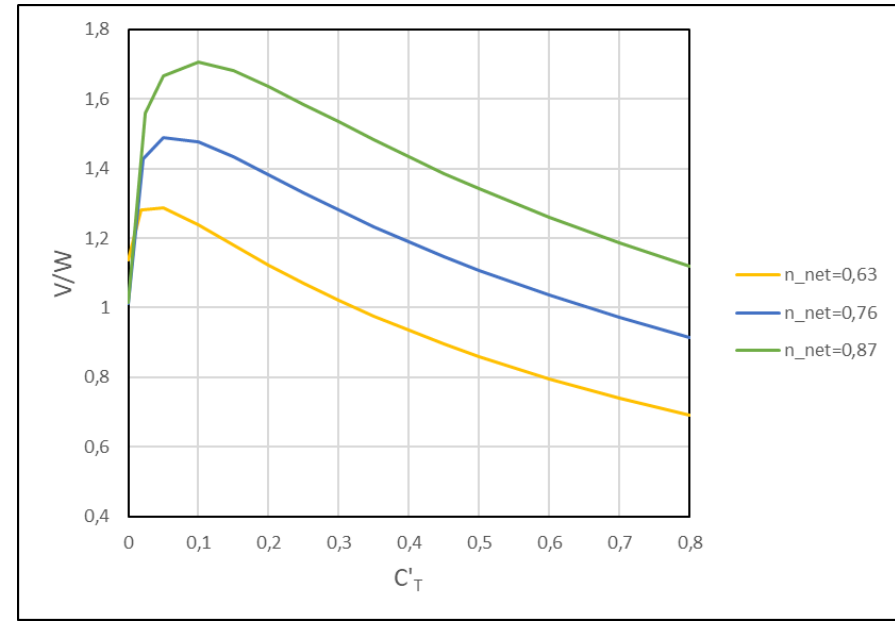
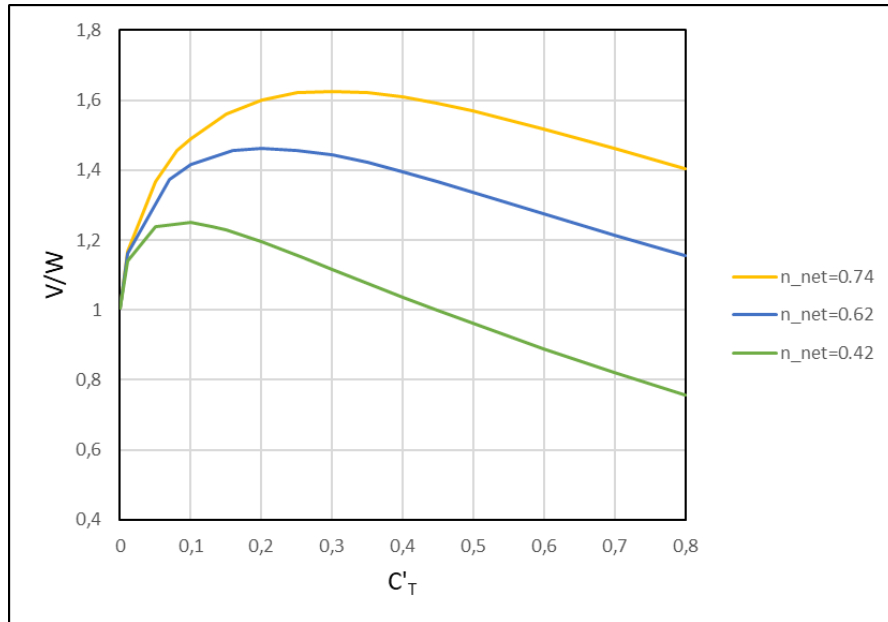
$\eta_{net}$	0,74		$\eta_{net}$	0,62		$\eta_{net}$	0,42	
$C'_T$	z	$\frac{V}{W}$	$C'_T$	z	$\frac{V}{W}$	$C'_T$	z	$\frac{V}{W}$
0,00001	0,005245	1,005273	0,00001	0,005186	1,005213	0,00001	0,005	1,005025
0,01	0,14448	1,16888	0,01	0,13885	1,161238	0,01	0,123	1,140251
0,05	0,269	1,367989	0,07	0,27165	1,372966	0,05	0,1918	1,237317
0,08	0,313	1,455604	0,1	0,2936	1,415629	0,1	0,2	1,25
0,1	0,329	1,490313	0,16	0,3131	1,455816	0,13	0,19233	1,238129
0,15	0,359	1,560062	0,2	0,31627	1,462566	0,15	0,1855	1,227747
0,2	0,375	1,6	0,25	0,31387	1,45745	0,2	0,163	1,194743
0,25	0,383	1,620746	0,3	0,30671	1,442398	0,26	0,129	1,148106
0,3	0,385	1,626016	0,35	0,29623	1,420919	0,3	0,10459	1,116807
0,35	0,383	1,620746	0,4	0,2833	1,395284	0,35	0,07103	1,076461
0,4	0,379	1,610306	0,45	0,26848	1,367017	0,4	0,03535	1,036645
0,45	0,372	1,592357	0,5	0,25217	1,337202	0,45	-0,002	0,998004
0,5	0,363	1,569859	0,6	0,21607	1,275624	0,5	-0,041	0,960615
0,6	0,341	1,517451	0,7	0,17642	1,214211	0,6	-0,1256	0,888415
0,7	0,316	1,461988	0,8	0,13401	1,154748	0,7	-0,2179	0,821085
0,8	0,287	1,402525				0,8	-0,3207	0,757174

4 priedas. Antrojo modelio analitiniai skaičiavimai „Microsoft Excel“ programoje, grafiko sudarymui

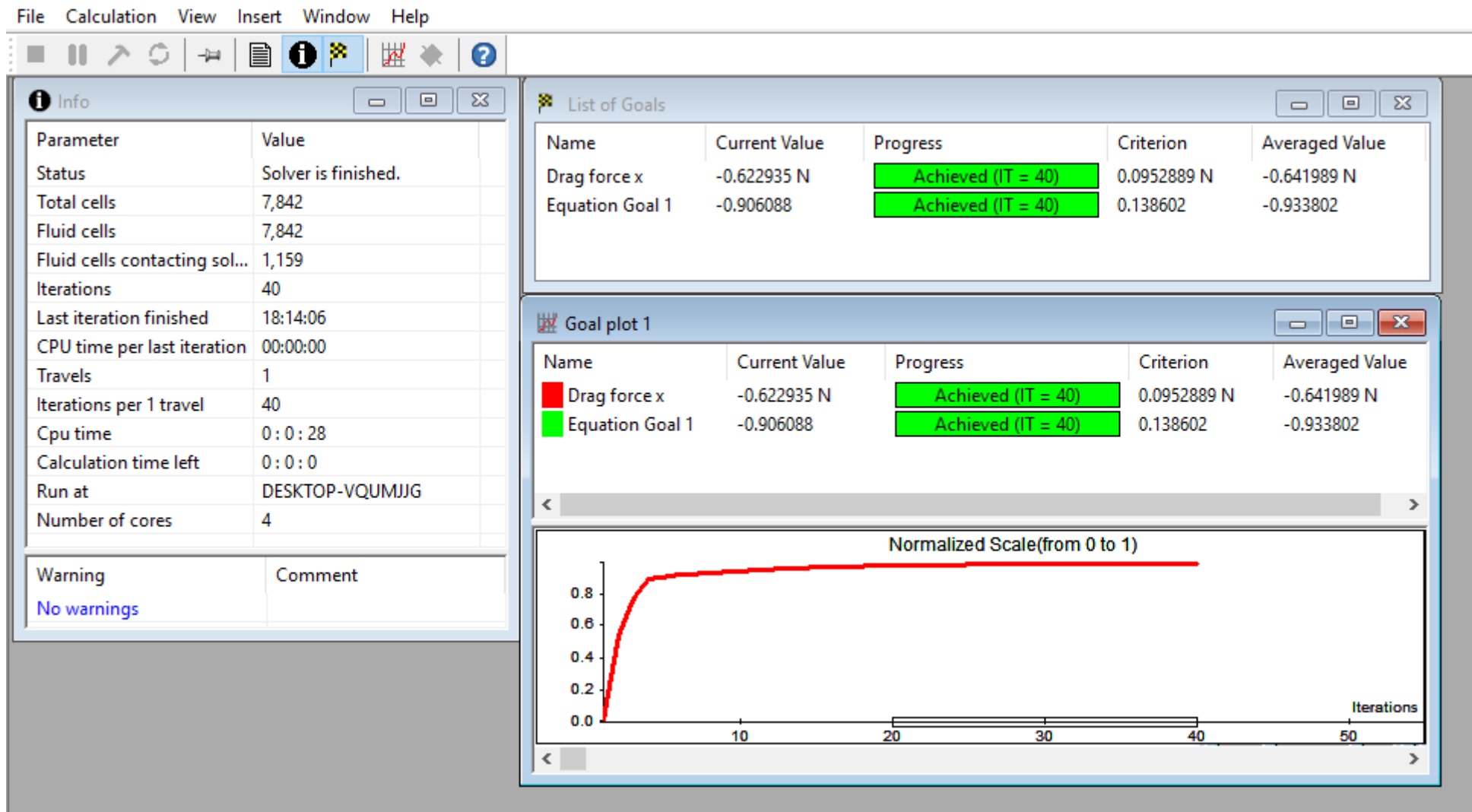
$\eta_{net}$	0,63		$\eta_{net}$	0,76		$\eta_{net}$	0,87	
$C'_T$	z	$\frac{V}{W}$	$C'_T$	z	$\frac{V}{W}$	$C'_T$	z	$\frac{V}{W}$
0,00001	0,12	1,136364	0,00001	0,013	1,013171	0,00001	0,01376	1,013952
0,0183	0,22	1,282051	0,0217	0,3	1,428571	0,024	0,3586	1,559089
0,05	0,224	1,28866	0,05	0,3285	1,489203	0,05	0,4	1,666667
0,1	0,192	1,237624	0,1	0,3231	1,477323	0,1	0,4139	1,706193
0,15	0,1516	1,178689	0,15	0,302	1,432665	0,15	0,405	1,680672
0,2	0,1089	1,122209	0,2	0,276	1,381215	0,2	0,3889	1,636393
0,25	0,065	1,069519	0,25	0,2482	1,330141	0,25	0,369	1,584786
0,3	0,0205	1,020929	0,3	0,219	1,28041	0,3	0,348	1,533742
0,35	-0,0246	0,975991	0,35	0,1891	1,233198	0,35	0,326	1,48368
0,4	-0,0703	0,934317	0,4	0,1587	1,188637	0,4	0,302	1,432665
0,45	-0,1163	0,895817	0,45	0,128	1,146789	0,45	0,2787	1,386386
0,5	-0,1626	0,860141	0,5	0,0968	1,107174	0,5	0,2547	1,341742
0,6	-0,2564	0,795925	0,6	0,034	1,035197	0,6	0,2058	1,259129
0,7	-0,3515	0,739919	0,7	-0,02933	0,971506	0,7	0,1562	1,185115
0,8	-0,448	0,690608	0,8	-0,0933	0,914662	0,8	0,106	1,118568



## 5 priedas. Pirmojo ir antrojo modelio santykinio greičio priklausomybės grafikai



## 6 priedas. Pirmojo modelio skaitinio tyrimo rezultatai



## 7 priedas. Antrojo modelio skaitinio tyrimo rezultatai

