

**KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS**  
Jūros technologijų ir gamtos mokslų fakultetas  
Jūrų inžinerijos katedra

Lukas Norkevičius

**ŽVEJYBINIŲ LAIVŲ KORPUSO FORMOS  
OPTIMIZAVIMAS**

Laivų projektavimo ir statybos studijų programos (621H52001) magistro  
baigiamasis darbas

1 tomas (2 tomai)

Klaipėda, 2017

## MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO LYDRAŠTIS

### Pildo magistro baigiamojo darbo autorius

.....  
(magistro baigiamojo darbo autoriaus vardas, pavardė)

.....  
(magistro baigiamojo darbo pavadinimas lietuvių kalba)

.....  
**Patvirtinu, kad magistro baigiamasis darbas parašytas savarankiškai, nepažeidžiant kitiems asmenims priklausančių autorių teisių, visas baigiamasis magistro darbas ar jo dalis nebuvo panaudotas Klaipėdos universitete ir kitose aukštosiose mokyklose.**

.....  
(magistro baigiamojo darbo autoriaus vardas, pavardė ir parašas)

**Sutinku, kad magistro baigiamasis darbas būtų naudojamas neatlygintinai 5 m. Klaipėdos universiteto studijų procese.**

.....  
(magistro baigiamojo darbo autoriaus vardas, pavardė ir parašas)

### Pildo magistro baigiamojo darbo vadovas

**Magistro baigiamąjį darbą ginti** .....

(įrašyti – leidžiu arba neleidžiu)

.....  
(data )

.....  
(magistro baigiamojo darbo vadovo vardas, pavardė ir parašas)

### Pildo Jūrų inžinerijos katedros, kuriojančios studijų programą, administratorius (sekretorius)

Baigiamasis darbas įregistruotas katedroje

.....  
(data)

.....  
(katedros sekretorės vardas, pavardė ir parašas)

### Pildo Jūrų inžinerijos katedros studijų programos vadovas

**Magistro baigiamąjį darbą ginti** .....

(įrašyti – leidžiu arba neleidžiu)

.....  
(data )

.....  
(studijų programos vadovo vardas, pavardė ir parašas)

**Recenzentais skiriu** .....

.....  
(įrašyti recenzento vardą, pavardę)

.....  
(įrašyti recenzento vardą, pavardę)

.....  
(data )

.....  
(studijų programos vadovo vardas, pavardė ir parašas)

Jūrų inžinerijos katedros vedėjas:

.....  
(data )

.....  
(katedros vedėjo vardas, pavardė ir parašas)

## SANTRAUKA

Norkevičius L. *Žvejbinių laivų korpuso formos optimizavimas*. Laivų projektavimo ir statybos magistrantūros studijų programos baigiamasis darbas. Darbo vadovas doc. dr. J. Čerka. Klaipėdos universitetas: Klaipėda: 2017. – 351 p. Iš kurių priedai – 291 p.

*Raktiniai žodžiai: pasipriešinimas, CFD (skaičiuojamoji skysčių dinamika angl. Computational Fluid Dynamics), “Flow 3D”, žvejbinis traleris, optimizacija, borto perėjimas, bulba.*

Šio baigiamojo darbo tikslas sumodeliuoti ir ištirti vandens pasipriešinimo įtaką trijų tipų skirtingomis geometrinėmis charakteristikomis pasižyminčių mažųjų žvejbinių tralerių korpusams.

Pateikiama teorija apie vandens pasipriešinimą laivo korpuso judėjimui. Naudojant automatizuotą laivų korpuso projektavimo programą “*Delftship*” sumodeliuoti trijų tipų mažųjų žvejbinių tralerių korpusai su skirtingais borto perėjimais į laivo dugną. Darbe pateikiami metodai ir rekomendacijos, skirtos teisingam skaičiuojamosios skysčių dinamikos eksperimento tirti vandens pasipriešinimą sudarymui.

Atlikti vandens pasipriešinimo įtakos įvertinimai laivo korpusui, sudarytas eksperimentas programoje “*Flow 3D*”. Palygintos gautos vandens pasipriešinimo skaitinės reikšmės. Naudojant skaičiuojamąją programą “*Autohydro*” įvertintos hidrostatinės tiriamų laivo korpusų charakteristikos. Nustatyta laiviapriekinės bulbos įtaka vandens pasipriešinimui plaukiant laivui. Pateikiamos rekomendacijos ir optimali mažojo žvejbinio tralerio korpuso geometrija.

## SUMMARY

Norkevičius L. Optimization hull form of fishing vessels. Naval Architecture and Marine Engineering studies programme thesis. Klaipėda University: Klaipėda. 351 p.

*Keywords: resistance, CFD (Computational Fluid Dynamics), “Flow 3D”, fishing vessel, optimization, hull chine, bulbous bow.*

Purpose of this thesis is to investigate the impact resistance for three different chine types of small fishing trawlers. Introduced main theory about hull resistance. Using automated ship hull design software “*Delftship*” modeled free different types hulls with different types of chines.

The paper presents the methods and recommendations for modeling the current computational fluid dynamics experiment.

CFD simulation was created with “*Flow 3D*”. A comparison of numerical resistance values was made. Using computational software “*Autohydro*” evaluation of hydrostatic properties was made. Evaluated influence of bulbous bow for hull resistance. Recommendations about optimal fishing trawler chine shape and hull geometry was introduced.



## **Laivų projektavimo ir statybos magistro studijų (621H52001) baigiamasis darbas**

Užduotis studentui: Lukui Norkevičiui

Temos pavadinimas: „ŽVEJYBINIŲ LAIVŲ KORPUSO FORMOS OPTIMIZAVIMAS“

### **Darbo sudėtis**

#### IVADAS

Darbo tikslas ir uždaviniai

#### I. MAŽIEJI ŽVEJYBINIAI TRALERIAI

#### II. LITERATŪROS ANALIZĖ

##### 2.1 Užsienio literatūros analizė

##### 2.2 Mokslinės lietuviškos literatūros analizė

#### III. VANDENS PASIPRIEŠINIMO LAIVO JUDĖJIMUI ANALIZĖ

##### 3.1 Vandens pasipriešinimo laivo judėjimui susidarymas

##### 3.2 Trinties pasipriešinimo susidarymas

##### 3.3 Bangavimo pasipriešinimo susidarymas

##### 3.4 Formos pasipriešinimo susidarymas

##### 3.5 Visas vandens pasipriešinimas

#### IV. VANDENS PASIPRIEŠINIMO SKAIČIAVIMO METODAI

#### V. MAŽŪJŲ ŽVEJYBINIŲ TRALERIŲ KORPUSO FORMOS MODELIAVIMAS

##### 5.1 Modeliuojamų korpusų geometrinių charakteristikų nustatymas

##### 5.2 Trimačių žvejybinių tralerių korpusų modeliavimas „Delfship“ programa

#### VI. LAIVO EIGUMO PRAKTINIO VERTINIMO GALIMYBĖS

##### 6.1 Vandens pasipriešinimo įvertinimas programa „Autopower“

##### 6.2 Vandens pasipriešinimo įvertinimas likusio pasipriešinimo metodu

##### 6.3 Žvejybinių tralerių korpuso tyrimo eksperimento sudarymas programa „Flow 3D“

#### VII. VANDENS PASIPRIEŠINIMO REZULTATŲ ANALIZĖ

##### 7.1 Laivo briaunos įtaka vandens pasipriešinimui

#### VIII. LAIVAPRIEKINIO BULBO ĮTAKA LAIVO EIGUMUI

##### 8.1 Laivaprieikinio bulbo įtakos tyrimas

8.2 Bulbo įtakos vandens pasipriešinimui tyrimo rezultatų analizė

## IX. LAIVO KORPUSO GEOMETRINIŲ IR HIDROSTATINIŲ CHARAKTERISTIKŲ PALYGINIMAS

9.1 Maksimalios svorio centro aplikatės palyginimas

9.2 Žvejybinių tralerių santykinų matmenų palyginimas

9.3 Žvejybinių tralerių santykinės galios palyginimas

## X. LAIVO KORPUSO FORMOS ĮTAKA STOVUMUI

10.1 Oro sąlygų kriterijaus vertinimas pagal IMO stovumo normas

10.2 Laivo supimosi intensyvumo vertinimas

## IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

## LITERATŪRA

Darbo vadovas: doc.dr. Jonas Čerka

(vardas, pavardė, parašas)

## LENTELIŲ SĄRAŠAS

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 lentelė. Laivo „ <i>Baltika</i> “ pagrindiniai matmenys.....                          | 8  |
| 2 lentelė. Atskiros vandens pasirpiešinimo komponentės.....                             | 14 |
| 3 lentelė. Vandens pasipriešinimo laivo judėjimui dedamosios.....                       | 22 |
| 4 lentelė. „ <i>Autopower</i> “ programos skaičiavimo metodai.....                      | 23 |
| 5 lentelė. Perskaičiuotos žvejybinių tralerių korpusų geometrinės charakteristikos..... | 26 |
| 6 lentelė. Vandens pasipriešinimo rezultatai gauti skirtingais metodais.....            | 37 |
| 7 lentelė. Oro sąlygų vertinimo rezultatai.....                                         | 53 |
| 8 lentelė. Laivo supimosi intensyvumo vertinimo rezultatai.....                         | 56 |

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 pav. Tiriamų žvejybinių tralerių korpusų principinės geometrinės formos.....                           | 5  |
| 2 pav. Mažasis žvejybinis traleris „ <i>Baltika</i> “ .....                                              | 7  |
| 3 pav. a- sklandus aptekėjimas- laminarinis srautas.....                                                 | 15 |
| 4 pav. Pasipriešinimo dedamosios priklausomai nuo Frūdo skaičiaus.....                                   | 15 |
| 5 pav. Trinties pasipriešinimo susidarymas.....                                                          | 16 |
| 6 pav. Laivo korpuso paviršiaus elementą veikiančios jėgos.....                                          | 17 |
| 7 pav. Bangavimo pasipriešinimas.....                                                                    | 19 |
| 8 pav. Skystyje judančio kūno sukeltas slėgis.....                                                       | 20 |
| 9 pav. Formos pasipriešinimo susidarymas ir šio pasipriešinimo dedamosios dalys.....                     | 21 |
| 10 pav. Laivo modelio eigumo bandymas baseine.....                                                       | 23 |
| 11 pav. „ <i>Flow 3D</i> “ vandens pasipriešinimo tyrimas.....                                           | 24 |
| 12 pav. Pradinis „ <i>Delftship</i> “ programos langas.....                                              | 27 |
| 13 pav. A - įvedami španhautai; B – įvedami batoksai; C – įvedamos vaterlinijos.....                     | 28 |
| 14 pav. Importuotos dvimatės teorinio brėžinio projekcijos.....                                          | 28 |
| 15 pav. Kintančių laivo korpuso geometrinių charakteristikų atvaizdavimas.....                           | 29 |
| 16 pav. Sumodeliuoto laivo korpuso geometrinės charakteristikos „ <i>Delftship</i> “ programoje.....     | 30 |
| 17 pav. Laivo korpuso paviršiaus sklandumo patikrinimas.....                                             | 30 |
| 18 pav. Laivo teorinis brėžinys.....                                                                     | 31 |
| 19 pav. Skirtingų tipų žvejybinių tralerių trimačiai modeliai.....                                       | 31 |
| 20 pav. Laivo korpuso geometrinės ir hidrostatinės charakteristikos programoje „ <i>Autopower</i> “..... | 33 |
| 21 pav. A - skaičiavimo metodo parinkimas, B – laivo greičio nustatymas programoje.....                  | 33 |
| 22 pav. Laivo korpuso duomenys vandens pasipriešinimo vertinimui likusio pasipriešinimo metodu.....      | 34 |
| 23 pav. Tinklelių blokų išdėstymas programoje „ <i>Flow 3D</i> “.....                                    | 35 |
| 24 pav. Aproximuota laivo korpuso geometrija.....                                                        | 35 |
| 25 pav. Ekperimento vizualinė erdvė programoje „ <i>Flow 3D</i> “.....                                   | 36 |
| 26 pav. Skysčio srauto tėkmės nusistovėjimo indentifikavimas.....                                        | 37 |
| 27 pav. Vandens pasipriešinimo priklausomybės nuo greičio grafikas.....                                  | 38 |
| 28 pav. Vandens pasipriešinimas laisvosios eigos režimu (10.5 mazgai).....                               | 39 |
| 29 pav. Vandens pasipriešinimas tralavimo režimu (6.0 mazgai).....                                       | 40 |
| 30 pav. Žvejybinių tralerių suvilgyto paviršiaus plotų palyginimas.....                                  | 41 |
| 31 pav. Skysčio srauto greičio pasiskirstymas briaunos rajone.....                                       | 42 |

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 32 pav. A-laivo korpusas su laivapriekine bulba; B- laivapriekinės bulbos pagrindiniai matmenys..... | 43 |
| 33 pav. Vandens pasipriešinimas laisvosios eigos režimu (10.5 mazgai).....                           | 44 |
| 34 pav. Skyčio srauto greitis laivapriekio rajone. 1 - su bulbu, 2 – be bulbo.....                   | 45 |
| 35 pav. Vandens pasipriešinimas tralavimo režimu (6 mazgai).....                                     | 45 |
| 36 pav. Santykinis vandens pasipriešinimo palyginimas.....                                           | 46 |
| 37 pav. MAX VCG skaičiavimo rezultatų palyginimas.....                                               | 47 |
| 38 pav. Santykinio dydžio B/d palyginimas.....                                                       | 48 |
| 39 pav. Santykinio dydžio L/B palyginimas.....                                                       | 48 |
| 40 pav. Santykinio dydžio D/d palyginimas.....                                                       | 49 |
| 41 pav. Žvejbinių tralerių santykinės galios palyginimas.....                                        | 49 |
| 42 pav. Laivo maksimalių statinio stovumo pečių palyginimas.....                                     | 50 |
| 43 pav. Vėjo ir bangų poveikio laivo stovumui įvertinimo pagal IMO grafikas.....                     | 52 |
| 44 pav. Supimosi intensyvumo skaičiavimo rezultatai.....                                             | 54 |
| 45 pav. Jūros ligos kriterijaus vertinimo duomenų skaičiavimo schema.....                            | 55 |



## TURINYS

|                                                                                        |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>IVADAS.....</b>                                                                     | <b>4</b>  |
| <b>I. MAŽIEJI ŽVEJYBINIAI TRALERIAI.....</b>                                           | <b>7</b>  |
| <b>II. LITERATŪROS ANALIZĖ.....</b>                                                    | <b>8</b>  |
| 2.1 Užsienio literatūros analizė.....                                                  | 9         |
| 2.2 Mokslinės lietuviškos literatūros analizė.....                                     | 13        |
| <b>III. VANDENS PASIPRIEŠINIMO TEORIJA LAIVO KORPUSO JUDĖJIMUI.....</b>                | <b>14</b> |
| 3.1 Vandens pasipriešinimo laivo judėjimui susidarymas.....                            | 14        |
| 3.2 Trinties pasipriešinimo susidarymas.....                                           | 16        |
| 3.3 Bangavimo pasipriešinimo susidarymas.....                                          | 19        |
| 3.4 Formos pasipriešinimo susidarymas.....                                             | 21        |
| 3.5 Visas vandens pasipriešinimas.....                                                 | 21        |
| <b>IV. VANDENS PASIPRIEŠINIMO SKAIČIAVIMO METODAI.....</b>                             | <b>22</b> |
| <b>V. MAŽŲJŲ ŽVEJYBINIŲ TRALERIŲ KORPUSO MODELIAVIMAS.....</b>                         | <b>26</b> |
| 5.1 Modeliuojamų korpusų geometrinių charakteristikų nustatymas.....                   | 26        |
| 5.2 Trimačių žvejybinių tralerių korpusų modeliavimas „Delfship“ programa.....         | 27        |
| <b>VI. LAIVO EIGUMO PRAKTINIO VERTINIMO GALIMYBĖS.....</b>                             | <b>32</b> |
| 6.1 Vandens pasipriešinimo įvertinimas programa „Autopower“.....                       | 32        |
| 6.2 Vandens pasipriešinimo įvertinimas likusio pasipriešinimo metodu.....              | 33        |
| 6.3 Žvejybinių tralerių korpuso tyrimo eksperimento sudarymas programa „Flow 3D“.....  | 34        |
| <b>VII. VANDENS PASIPRIEŠINIMO REZULTATŲ ANALIZĖ.....</b>                              | <b>39</b> |
| 7.1 Laivo briaunos įtaka vandens pasipriešinimui.....                                  | 40        |
| <b>VIII. LAIVAPRIEKINIO BULBO ĮTAKA LAIVO EIGUMUI.....</b>                             | <b>43</b> |
| 8.1 Laivapriekinio bulbo įtakos tyrimas.....                                           | 43        |
| 8.2 Bulbos įtakos vandens pasipriešinimui tyrimo rezultatų analizė.....                | 44        |
| <b>IX. LAIVO KORPUSO GEOMETRINIŲ IR HIDROSTATINIŲ CHARAKTERISTIKŲ Palyginimas.....</b> | <b>47</b> |
| 9.1 Maksimalios svorio centro aplikatės palyginimas.....                               | 47        |
| 9.2 Žvejybinių tralerių santykinų matmenų palyginimas.....                             | 48        |
| 9.3 Žvejybinių tralerių santykinės galios palyginimas.....                             | 49        |

|                                                                      |           |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>X. LAIVO KORPUSO FORMOS ĮTAKA STOVUMUI.....</b>                   | <b>50</b> |
| 10.1 Oro sąlygų kriterijaus vertinimas pagal IMO stovumo normas..... | 50        |
| 10.2 Laivo supimosi intensyvumo vertinimas.....                      | 53        |
| <b>IŠVADOS.....</b>                                                  | <b>57</b> |
| <b>REKOMENDACIJOS.....</b>                                           | <b>58</b> |
| <b>LITERATŪRA.....</b>                                               | <b>60</b> |

## IVADAS

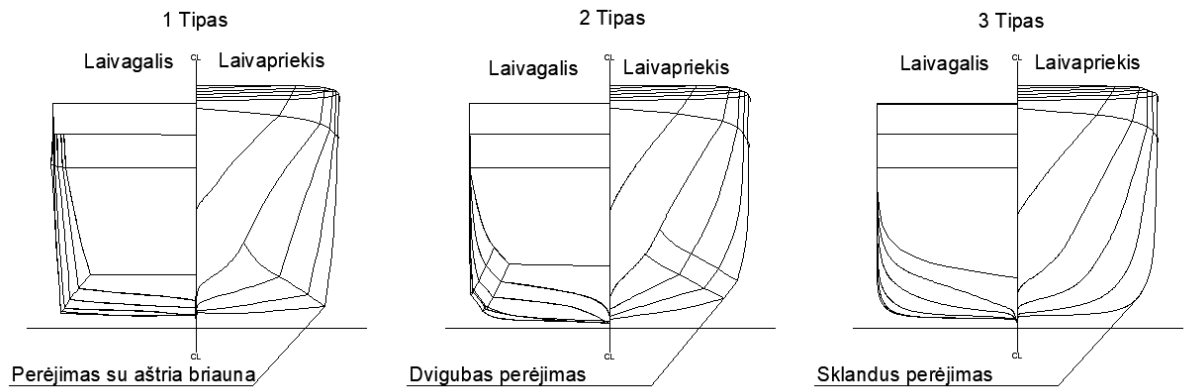
1992-tų metų Lietuvos Respublikos žvejbinių laivų sąrašą sudarė apie 120 žvejbinės paskirties to meto įmonės „Jūra“ ir apie 33 įmonės „Baltija“ laivai. Iš jų apie 38 mažieji žvejbiniai traleriai. Toks užregistruotų žvejbinės paskirties laivų kiekis parodo, kad to meto pajūrio krašte buvo dislokuotas santykinai didelis žvejbinės paskirties laivų kiekis. Tuometinėje Tarybų Sąjungoje žvejybos pramonė Klaipėdos krašto Baltijos jūros regione buvo sparčiai vystoma.

Šiomis dienomis Klaipėdos krašte galima rasti tik mažą dalį išlikusių žvejbinių laivų. Dauguma praityje klestėjusių įmonių užsidarė arba bankrutavo. Laivai buvo parduodami, supjaustomi į metalo laužą. Šiandieną išlikusi tik nedidelė dalis mažųjų žvejbinių tralerių. Iki pat šių dienų dėl ekonominės ir politinės situacijos Lietuvos žvejybos laivynas nėra modernizuojamas arba labai neženkiai: perdažant seno laivo korpusą, pakeičiant korozijos paveiktas detales, remontuojant pavienius įrenginius ir mechanizmus.

Prie žvejybos uosto krantinių prišvartuoti morališkai ir fiziškai pasenę laivai parodo būtinybę modernizuoti žvejybos laivyną. Išlikę dar Tarybų Sąjungoje projektuoti laivai šiandieniniame kontekste yra ekonomiškai nenaudingi dėl didelių kuro ir energijos sąnaudų bei dažnų gedimų. Dižiąją laiko dalį seni žvejbiniai laivai praleidžia remonte, o ne žvejyboje. Atnaujintas laivynas galėtų būti mažesnis, bet dirbti ekonomiškiau ir efektyviau.

Norint atnaujinti žvejybos laivus, reikia nustatyti, kokių geometrinių parametrų laivai optimaliausi Baltijos jūros regiono priekrantės žvejybai. Kokių geometrinių charakteristikų žvejbinius laivus laivų savininkai turėtų įsigyti arba statyti naujus. Panašaus pobūdžio tyrimų kaip optimalios žvejbinių tralerių korpuso formos nustatymas Baltijos jūros regionui, orientuotų į Lietuvos Respublikos žvejybos laivyną nebuvo atlikta, todėl morališkai pasenusių žvejbinių laivų būklė ir atliekamo tyrimo naujumas pabrėžia žvejbinių laivų korpuso optimizavimo temos aktualumą.

Remiantis Kanados mokslininkų rekomendacijomis šiame darbe yra tiriami 39 skirtingomis geometrinėmis charakteristikomis pasižymintis mažųjų žvejbinių tralerių korpusai. Visi tiriami korpusai suskirstyti į 3 grupes ir 13 pogrupių. Esminis šių korpusių geometrijos skirtumas - šoninio laivo borto perėjimo į dugną dalies forma. Tiriamų žvejbinių tralerių principinės geometrinės formos pateikiamos *1 pav.*



1 pav. Tiriamų žvejybinių tralerių korpusų principinės geometrinės formos.

**Tyrimo objektas.** Jūrinių mažųjų žvejybinių laivų korpuso forma.

**Darbo tikslas.** Ištirti vandens pasipriešinimo įtaką skirtingomis geometrinėmis charakteristikomis pasižyminčių žvejybinių tralerių korpuso judėjimui. Remiantis gautais rezultatais pateikti optimalaus mažojo žvejybinio tralerio korpuso geometrinę formą bei suprojektuoto korpuso geometrines ir hidrostazines charakteristikas.

**Tiksliui pasiekti keliami uždaviniai.**

1. Atlikti mokslinės ir metodinės literatūros analizę vandens pasipriešinimo laivo korpusui įvertinimo ir korpuso optimizavimo tematika.
2. Naudojant specializuotą laivų korpusų modeliavimo programą „*Delftship*“, sumodeliuoti skirtingus mažųjų žvejybinių tralerių korpusus, remiantis Kanados mokslininkų ištirtų sumažintų laivų modelių geometrinėmis charakteristikomis.
3. Parinkti vandens pasipriešinimo įvertinimui tinkamą metodiką, kuri būtų priimtina įvertinti vandens pasipriešinimą mažųjų žvejybinių tralerių korpuso judėjimui.
4. Naudojant skaičiuojamosios skysčių dinamikos programą „*Flow 3D*“, sumodeliuoti eksperimentą, kurio tikslas nustatyti vandens pasipriešinimą sumodeliuotų laivų korpusų judėjimui.
5. Įvertinus gautus optimalių laivų pasipriešinimo rezultatus, sumodeliuoti laivapriekines bulbus ir perskaičiuoti vandens pasipriešinimą laivo korpuso judėjimui.
6. Įvertinti geriausiu eigumu pasižyminčių laivų kitas jūrines savybes (stovumą, supimąsi).
7. Pateikti išvadas ir rekomendacijas.

**Tyrimo metodai.** Darbe taikomas mokslinės literatūros analizės metodas. Laivų korpusų projektavimui buvo taikomas automatizuotas laivų korpusų projektavimo metodas - „*Delftship*“ programa. Vandens pasipriešinimui nustatyti taikoma skaičiuojamosios skysčių dinamikos programa

„Flow 3D“. Laivo hidrostatinėms charakteristikoms įvertinti buvo naudojama kompiuterinė skaičiavimo programa „Autohydro“.

**Darbo struktūra.** Magistro baigiamąjį darbą sudaro du tomai. 1 tomą sudaro 60 psl.: santrauka, paveikslų sąrašas, lentelių sąrašas, įvadas, dešimt skyrių, išvados, rekomendacijos, literatūros sąrašas. 2 tomą sudaro 291 psl.: 52 laivų teoriniai brėžiniai, vandens pasipriešinimo skaičiavimo rezultatai, stovumo pečių skaičiavimo rezultatai, maksimalios svorio centro aplikatės skaičiavimo rezultatai.

## I. MAŽIEJI ŽVEJYBINIAI TRALERIAI

Mažieji žvejybiniai traleriai - tai apie 18 - 30 m ilgio laivai, skirti gaudyti žuvį dideliuose vidaus ar išorės vandenų priekrantėse. Tai mažų santykinų matmenų laivai, kadangi žvejybos procesui bei įrangai yra būtinas kuo didesnis laisvojo denio plotas. Dažniausiai tokio tipo laivai žuvies gaudymui naudoja tralus arba tinklus. Dėl savo nedidelių gabaritų, manevringumo ir nedidelių energetinių sąnaudų šie laivai yra itin funkcionalūs ir ekonomiškai naudingesni valstybinių teritorinių vandenų priekrantės verslinei žvejybai nei vidutiniai ar didieji žvejybiniai traleriai.

Labiausiai paplitę laivai Baltijos jūroje buvo 1970-1973 m. statybos „Baltika“ tipo, žvejoję tralais bei tinklais ir „Karelija“ tipo, kurie buvo šiek tiek didesni už „Baltiką“.



2 pav. Mažasis žvejybinis traleris „Baltika“.

„Baltika“ - vienas iš sėkmingiausių mažųjų žvejybinių tralerių projektų. Projektas buvo ruošiamas centriniame konstruktorių biure CKB „Neptūnas“, Maskvoje 1970 m. Žvejybiniai traleriai „Baltika“ pradėti statyti 1971 m., statybos pabaiga 2000 m. Laivai buvo statomi Sosnovkoje (Rusija, Kirovo sritis), Kokuje (Rusija, Čeliabinsko sritis), Tulčioje (Rumunija). Šio tipo laivų serija siekia 380 vnt. Laive eksploatuojama galinė tralavimo schema, kuri suteikia galimybę žvejoti dugniniais, poriniais ir pelagininiais (įvairiagybiais) tralais (Rakov A. 1981).

Laivo „Baltika“ pagrindiniai matmenys pateikiami 1 lentelėje.

*1 lentelė. Laivo „Baltika” pagrindiniai matmenys.*

|                                            |                               |
|--------------------------------------------|-------------------------------|
| <b>Laivo ilgis:</b> 25.50 m.               | <b>Borto aukštis:</b> 3.30 m. |
| <b>Laivo ilgis tarp statmenų:</b> 22.01 m. | <b>Grimzlė:</b> 2.37 m.       |
| <b>Laivo plotis:</b> 6.80 m.               | <b>Vandentalpa:</b> 174 t.    |

“Baltika” serijos laivai buvo itin paplitę Baltijos jūros regione . 1970 m. projektuotas laivas nebuvo orientuotas į mažas kuro sąnaudas ir oro taršą, kadangi tuo laikotarpiu kuras buvo pakankamai pigus. Šiomis dienomis išlikę žvejybiniai traleriai nebeatitinka šiandieninių ekonomiškumo, patikimumo kriterijų. Laivų varikliai dėl bendro nusidėvėjimo nebeišvysto reikiamos galios, pasenusi laivo įranga genda žūklės metu. Šių laivų eksploatacija pasidarė ekonomiškai neefektyvi. Tikslinga atnaujinti Lietuvos Respublikos žvejybos laivyną siekiant padaryti mažesniu, bet ekonomiškai efektyvesniu.

## II. LITERATŪROS ANALIZĖ

Atliekant užsienio literatūros analizę orientuotasi į literatūrą anglų bei dalinai rusų kalbomis. Vandens pasipriešinimo laivo korpuso judėjimui ir tiriamų korpusų optimizavimo tyrimai apima platų diapazoną - nuo skirtingų tyrimo sąlygų iki įvairiausių laivo korpuso modifikacijų. Analizuojamoje literatūroje pateikti ir tokie šaltiniai, kurie nėra tiesiogiai susiję su nagrinėjama tema ir laivo borto perėjimo į laivo dugną modifikacijos įtakos vandens pasipriešinimui tematika. Tačiau tokie literatūros šaltiniai prisideda prie temos bendro supratimo. Analizuojamoje literatūroje gali būti pateikta informacija apie vandens pasipriešinimo teoriją. Tiriamos įvairios laivo korpusų modifikacijos skirtingomis eksploatacijos sąlygomis. Atsižvelgiant į atlikų tyrimų būdus labiausiai orientuotasi į SSD (angl. CFD) metodiką. Informacijos šaltiniai, kuriuose aprašyti vandens pasipriešinimo laivo korpuso tyrimai taikant SSD metodiką įvairiomis sąlygomis yra naudingi, kadangi, norint tyrimą atlikti teisingai, reikia nustatyti, kokias SSD programas, kokį skaičiavimo būdą taikyti tam tikram tyrimui ir jo sąlygoms. Pasirinkus tinkamą SSD programą, būtina žinoti jos veikimo principą, matematinį modelį bei tinkamo sudarymo metodiką. Netinkamai sudarytas tinklėlis gali turėti neigiamos įtakos gautų rezultatų patikimumui.

Atliekant literatūros analizę, naudotasi V Europos konferencijos „Skaičiuojamoji skysčių dinamika“ (V European Conference on Computational Fluid Dynamics ECCOMAS CFD 2010) pateiktais duomenimis ir publikacijomis. Informacija apie tyrimo tematiką buvo paimta iš leidinio Santos T.A „Martine Technology and Engineering 3“, 2016. Taip pat buvo pasinaudota

„Science direct“ platforma, kurioje patalpintos mokslinės publikacijos, knygos, žurnalai bei kitais internetiniais informacijos šaltiniais.

## 2.1 Užsienio literatūros analizė

Strake B. ir Windt J. (2003) pirmojoje savo tiriamojo darbo dalyje siekia parodyti viensraigčio laivo laivagalio modifikavimą konteineriniam laivui, kuris gali turėti įtakos korpuso efektyvumui, naudojant tiek modelio, tiek natūralaus laivo skaičiavimus. Aptariamas mastelinis efektas, palyginamas numatytas ir modelio eksperimentiniu būdu gautas bangų sužadinimo laukas (angl. wake field). Antroje dalyje orientuojamasi į klampaus srauto susidarymą aplink žemsiurbes. Išvadoje pateikiama SSD klampaus srauto tyrimų nauda, optimizuojant viensraigčių laivagalį kroviniuose laivuose. Tiriant žemsiurbes, tyrimo metodai yra kur kas sudėtingesni dėl sudėtingos laivo korpuso formos ir srautų, todėl tikslus srauto nustatymas naudojant SSD yra žymiai sudėtingesnis (Strake B., Windt J. 2003).

Setyawan D. (2010) naudojant SSD skaičiavimo metodiką ištyrė, kokią įtaką turi atstumas tarp žvejybinio katamarano korpusų vandens pasipriešinimui laivo judėjimui. Eksperimento simuliacinė erdvė sudaryta iš trijų tinklelio blokų. Tiriamos keturios korpusų modifikacijos. Eksperimento metu nustatytas procentinis vandens pasipriešinimo sumažėjimas mažinant atstumą tarp katamarano korpusų. Išanalizuotas slėgio pokytis ir vandens srauto pagreitėjimas tarp skirtingu atstumu išdėstytų korpusų. Pateikiamos rekomendacijos, apibrėžiančios, kokį atstumą tarp laivo korpusų yra tikslinga projektuoti skirtingomis geometrinėmis charakteristikomis pasižyminčiam katamaranui (Setyawan D. 2010).

Haase M., Binns J., Giles T. (2012) ir kiti panaudojo OpenFOAM kompiuterinę programą tam, kad atliktų tyrimą ir nustatytų bangų pasipriešinimą ramiaame vandenyje. Tačiau pagrindinis darbo tikslas buvo nustatyti pasipriešinimą, išreikštą viso pasipriešinimo koeficientu. Tinklelis sudarytas iš 1 300 000 dalelių STAR-CCM+ programa. Tyrimo ribos nustatytos, atsižvelgiant į bandymo baseinų matmenis. Taip pat ištirtas srauto atsiskyrimas laivagalyje. Nustatyta, kad vandens srautas atsiskiria nuo tranco pasiekus tam tikrą greitį. Remiantis simuliacijos bandymais, manoma, kad „sausasis“ (skystis atsiskiria tranco kraštuose, už tranco palikdamos chaotiškus skysčio sūkūrius) trancas susidaro, kai  $Fr \geq 0,30$ . Kai Frūdo skaičius didesnis, o laivagalio trancas paniręs, laivagalyje susidaro žemo slėgio zona, kuri gali turėti didelę įtaką laivo diferentui ir nugrimzdimui. Esant tokiomis sąlygomis susidaro stiprios laivagalinės bangos, kurios tarpusavyje sąveikauja. Didėjant Frūdo skaičiui ir jam pasiekus 0,40 reikšmę, tyrimo rezultatų skirtumas, nuo ankstesnių



modelinių bandymų buvo aukštesnis (pasipriešinimo reikšmės mažesnės) dėl laivo nugrimzdimo (angl. squat) (Haase M., Binns J., Giles T. 2012).

Nishikawa T., Yamade Y. Sakuma M. ir kt. (2012) sudarė 32 milijardų elementų LES (Large eddy simulation) eksperimentinį modelį, kuriuo tyrė bandymo baseinuose testuoto modelio dydžio laivą, esant  $(4,6 \cdot 10^6)$  Reynoldso skaičiui. Tyrimo tikslas - ištirti turbulentinius srauto sūkurius pasienio sluoksnyje. Skaičiavimams buvo panaudotas vienas iš galingiausių Japonijos superkompiuterių. Naudota komp. programa FrontFlow/blue (FFB). Ši programa sumodeliuoja turbulentinį srautą LES metodu. Kadangi didensio nei 100 milijonų elementų tinklelio sukurti rankiniu būdu neįmanoma, buvo naudotas metodas, kuris tinklelio elementą skaičiavimo metu automatiškai skaldo į dvi dalis kiekviena kryptimi. Naudotas KVLCC2 korpuso modelis be išsikišančių dalių. Papildomai tirta su grubesniu 62 milijonų dalelių tinkleliu. Laivo midelyje nustatyta apie 50 srauto sūkurių, esant grubiam tinkleliui ir apie 150-200 sūkurių, esant detaliam tinkleliui. Atlikus apskaičiuotų pasipriešinimo duomenų palyginimus su bandymų baseine gautais duomenimis, nustatyta, jog detalaus tinklelio atveju paklaida buvo 0,87%, todėl teigiama, kad toks tinklelio detalumas yra pakankamas skaičiuojant LES metodu. Taip pat galima teigti, kad tinklelio detalumas turi didelę įtaką skaičiavimų rezultatų patikimumui (Nishikawa T. Ir kt., 2012).

Paton I. ir Vassalos D., (2013) moksliniame straipsnyje “Žvegybinio tralerio korpuso optimizavimas” pateikia žvegybinio tralerio skaičiavimo metodiką, kuri remiasi vandens pasipriešinimo skaičiavimu ramiaame vandenyje ir pridėjus bangas. Po kiekvieno atlikto skaičiavimo laivo korpuso forma buvo modifikuojama ir perskaičiuojama, siekiant išgauti mažesnę vandens pasipriešinimą laivo korpusui nustatytomis sąlygomis. Atlikus skaičiavimus ramiaame vandenyje ir pridėjus bangas, gauti rezultatai sudedami (Paton I., Vassalos D., 2013).

Marion C. J., Turnok S.R. ir Hudson D.A (2012), atlikdami laivo korpuso modifikacijas, siekė parodyti, kaip padidinti realiomis sąlygomis eksploatuojamo tanklaivio efektyvumą 10% (angl. retro-fit solutions). Buvo panaudota SSD skaičiavimų programa OpenFOAM (tirta RANS metodu), gauti rezultatai buvo palyginti su aerodinaminiame vamzdyje atliktais tyrimais. Eksperimentas atliekamas Mitchell aerodinaminiame vamzdyje, Southampton universitete. Eksperimento metu gauti duomenys gali neatitikti realybės taip pat ir SSD duomenys, kadangi atliekant bandymą vamzdyje, nėra įvertinamas laisvojo paviršiaus poveikis (t.y. bangų susidarymas). Tyrime pagrindinis dėmesys skiriamas tik korpuso laivagaliui, todėl bandymuose panaudotas modelis buvo sutrumpintas, paliekant pusę galinės laivo korpuso dalies. Sutrumpintas modelis testuotas didesnio mastelio (1:23) 4 metrų ilgio, todėl mastelinis efektas buvo mažesnis nei tiriant visą laivo korpusą. Atlikus tyrimą nustatyta, kad reikiamą galią sumažinus 1%, trikampio formos sparnas atsipirktų per

25 dienas. Preliminarūs rezultatai parodė, kad panaudojus srautą gerinančias movas, naudingumą galima padidinti iki 9 % (Marion C. J. ir kt., 2012) .

Hochkirch K., Bertram V., Mallol B. (2013) atliktame tyrime pateikiami ir aprašomi skirtingi korpuso hidrodinaminų savybių įvertinimo metodai. Aprašomas „Rankine Panel“ metodas, RANSE ir modeliųjų bandymų tyrimai bei pabrėžiami kiekvieno šio metodo privalumai ir trūkumai. Pateikiami skirtingų tyrimų duomenys ir jų aprašymai. Išskiriamos tokios temos kaip korpuso optimizavimas, diferento optimizavimas, išsikišusių dalių optimizavimas. Pateiktose išvadose pabrėžiama, jog optimizuojant korpusą pagal modelio bandymo rezultatus, gauti apie trys ketvirtadaliai pagerėjimo, lyginant su realiu laivu. Pateikiami SSD privalumai, kurie autoriaus teigimu, ateityje tik didės. SSD patogi dėl didėjančio kompiuterinės technikos galingumo, skaitmeninių programų nuolatinio tobulėjimo ir progresavimo. Be to yra galimybė tirti ir nagrinėti ankstesnių skaitmeninių tyrimų duomenis bei koreguoti pačius tyrimus ir atlikti juos iš naujo (Hochkirch K. ir kt., 2013).

Auke van der Ploeg (2014) tyrė tanklaivį, kurio greitis 14 mazgų, ilgis tarp statmenų 94 metrai, plotis 15,4 metro, grimzlė 6 metrai o pilnumo koeficientas 0,786. Frūdo skaičius 0,237. Darbe orientuojamasi į automatinį korpuso formos optimizavimą. Priimama tokia sąlyga, kad laivo vandentalpa negali būti mažesnė, o sraigto vieta bei pagrindiniai laivo matmenys išlieka fiksuoti. Kadangi laivagalyje dažniausiai dominuoja turbulentinis tekėjimas, tyrimui naudotas SSD RANS metodas. Pirmiausia sukurta keletą korpuso formų, kurios išplėstų tyrimo ribas, tada vykdomas jų keitimas ir koregavimas. Eksperimento ribos 0,5 Lpp į priekį nuo laivapriekio, 1,5 Lpp į galą nuo tranco. Kadangi korpusas simetriškas, tiriama tik viena korpuso pusė. Optimizuota korpuso forma 1% sumažina reikiamą galią, o kai įtraukiamas ir bangų pasipriešinimo sumažinimas, reikalinga galia sumažėja 2,2%. Bendras nominalus pasipriešinimas RT pakito tiek, kad reikalinga galia sumažėjo 5,6% (Auke van der Ploeg, 2014; Ašmontas Ž., 2015).

Nikolas O. S. (2015) atliko tyrimą vandens pasipriešinimui įvertinti naudodamas SSD skaičiavimo metodiką. Tyrimas orientuotas į dvisraigčių žvejybinių tralerių korpuso optimizavimą ir vandens pasipriešinimo laivo korpusui sumažinimą. Naudojant SSD skaičiavimų programą STAR CCM+ ir modeliavimo programą CATIA, buvo sudaryta virtuali eksperimento simuliacinė erdvė iš šešių lygių tinklelio blokų. Tinkeliai išdėstyti priartėjimo metodu didinant jų tankį tyrimo objekto kryptimi. Pateikiamos rekomendacijos eksperimento metu naudojamo tinklelių blokų sudarymui dvisraigčiams žvejybiniams traleriams tirti. Panaudotos programos STAR CCM+ vizualinės rezultatų pateikimo galimybės leidžia geriau įvertinti bandymo metu veikiančių fizikinių procesų įtaką vandens pasipriešinimui laivo korpuso judėjimui (Nikolas O. S., 2015).

Kleppesto K., (2015) leidinyje „Empirinis vandens pasipriešinimo žvejybinio laivo korpusui nustatymas“ apžvelgia empirinius metodus, matematinius modelius vandens pasipriešinimui žvejybinio laivo korpusui nustatyti. Nuosekliai pateikiami metodai ir modeliai, tinkantys skirtingų geometrinių charakteristikų žvejybiniam laivams. Smulkiai aprašomas ir detalizuojamas Holtropo metodas, pateikiamas Harvado grafinis metodas. Kiekvienas pateikiamas metodas analizuojamas ir priartinamas prie būdingas geometrines charakteristikas turinčio žvejybinio laivo korpuso (Kleppesto K., 2015).

Chao L., Jihua C. (2016) ištyrė 3 skirtingas laivapriekines bulbas, skirtas 49 m ilgio žvejybiniam traleriui. Tyrimas atliekamas virtualioje eksperimentinėje erdvėje taikant SSD metodiką. Sudaryti trys skirtingo tankio tinklelių blokai: vienas bendras ir du didesnio tankio laivapriekinėje ir laivagalinėje dalyse. Gauti tyrimo rezultatai atskleidžia, kokią įtaką vandens pasipriešinimui laivo korpuso judėjimui turi skirtingų geometrinių charakteristikų laivapriekinė bulba. Kokiomis laivo eksploatavimo sąlygomis bulbos modifikacija turi didžiausią naudingumo koeficientą (Chao L., Jihua C., 2016).

Labanti J. (2016) atliko tyrimą, kurio tikslas nustatyti vandens pasipriešinimą ROPAX tipo laivui plaukiant skirtinga grimzle ir diferento kampu. Tyimui pasirinktas OpenFOAM metodas. Eksperimentas modeliuojamas ramaus vandens sąlygomis (ang. still water). Pirmas eksperimentas buvo atliekamas, kai laivas plaukia didžiausia projektine grimzle, o Fūdo skaičius  $Fr = 2$ . Antrą kartą ekperimentas buvo atliekamas užduodant tokias pačias sąlygas, tik pasirinktas RANS skaičiavimo metodas. Sekantys eskperimentai atliekami didinant Frūdo skaičių. Buvo atliktas gautų rezultatų palyginimas ir pateiktos remomendacijos eksperimento modeliavimui abiem metodais. Procentine išraiška nustatyta ROPAX tipo laivo grimzlės ir diferento įtaka vandens pasipriešinimui laivo korpuso judėjimui (Labanti J., 2016).

Atlikus užsienio literatūros analizę, galima teigti, kad dauguma tyrimų buvo atlikta naudojant SSD pagrindu veikiančiomis skaičiavimo programomis. Reiškiniams, susijusiems su skysčio klampumu ir susidariusiais sūkuriais tirti, dažniausiai naudojamas RANS arba RANSE SSD metodas.

SSD tyrimų, tiesiogiai susijusių su žvejybinių tralerių korpuso optimizavimu modifikuojant borto perėją į laivo dugną, nepavyko rasti, išskyrus Kanados mokslininkų pateiktą metodiką, kuri publikuojama leidinyje “Twenty-Third American Towing Tank Conference” 1993 m. Dauguma tokio pobūdžio tyrimų skirti greitaeigių laivų ir katerių korpusų tyrimams.

## 2.2 Mokslinės lietuviškos literatūros analizė

Čerka J. (2005) apibrėžė laivo eigumo sąvoką: laivo savybę išvystyti reikiamą greitį tam eikvojant kuo mažesnes energijos sąnaudas. Anot autoriaus, laivo eigumas priklauso nuo trijų tarpusavyje susijusių faktorių: 1 - vandens pasipriešinimo laivo korpuso judėjimui, 2 - laivo varytuvų, 3 – laivo eigos variklio. Knygoje išsamiai paaiškinama apie vandens pasipriešinimo susidarymą ir jo mažinimo būdus. Nagrinėjami įvairaus tipo laivo varytuvai bei jų veikimo principai. Pateikiamos rekomendacijos laivo varytuvų optimizavimo tematika (Čerka J., 2005).

Stonkauskas V. (2006) knygoje „Laivo teorija“ apžvelgiamos laivo jūrinės savybės. Apžvelgiama laivo stovumo, plūdrumo teorija, pateikiami skaičiavimo pavyzdžiai. Nagrinėjama laivo stovumo ir plūdrumo priklausomybė nuo krovimo tipo ir jo vietos laive. Knygoje taip pat pateikiami laivo eigumo pagrindai. Apžvelgiamas trinties, formos ir bangavimo pasipriešinimas laivo korpuso judėjimui. Pateikiama laivo korpuso optimizavimo pavyzdžių (Stonkauskas V., 2006).

Ašmontas Ž. (2015) magistrantūros studijų baigiamajame darbe atliko mokslinių tyrimų laivo „Mintis“ skego tyrimą. Tyrimui buvo sudarytas eksperimentas naudojant skaičiuojamosios skysčių dinamikos programą „Flow 3D“. Remiantis programos kūrėjų rekomendacijomis, iš kelių kintančio tikslumo tinklelių blokų sudarytas pakankamo tikslumo tinklėlis, kuris suteikė galimybę gauti patikimus rezultatus. Remiantis gautais skaičiavimo rezultatais, kurie apima vandens pasipriešinimą, sūkurių susidarymą, slėgio jėgos veikimą į laivo korpusą bei vandens srautų greičius, buvo pasiūlytos kelios alternatyvios vibraciją mažinančios mokslinių tyrimų laivo „Mintis“ skego modifikacijos (Ašmontas Ž., 2015).

Atlikus lietuviškos literatūros analizę vandens pasipriešinimo laivo korpuso judėjimui tematika, galime teigti, kad informacijos kiekis nėra didelis. Literatūroje pateikiama tik apibendrinta informacija apie laivo jūrines savybes, vandens pasipriešinimo teoriją. Ž. Ašmonto atliktas tyrimas vienas iš informatyviausių ir pasižymintis šiuolaikinių skaičiuojamosios skysčių dinamikos programų panaudojimu, tiriant vandens srautus bei jų poveikį laivo korpusui. Laivo inžinerijos studijų programa dėstoma Klaipėdos universitete sparčiai tobulėja, todėl tikimasi daugiau tokio pobūdžio darbų sulaukti ateityje.

### III. VANDENS PASIPRIEŠINIMO LAIVO JUDĖJIMUI ANALIZĖ

Laivo eigumas - tai savybė pasiekti reikiamą greitį tam eikvojant kuo mažesnes energijos sąnaudas. Laivo eigumas priklauso nuo trijų tarpusavyje susijusių faktorių: susidariusio vandens pasipriešinimo, laivo varytuvų bei laivo variklio. Bendras laivo vandens pasipriešinimas susideda iš kelių dalių: susidariusio bangavimo pasipriešinimo  $R_w$ , paviršiaus trinties pasipriešinimo  $R_F$ , nuo skysčio klampumo susidariusio slėgio pasipriešinimo  $R_{VP}$ , oro pasipriešinimo  $R_{AA}$ , laivo išsikišančių dalių pasipriešinimo  $R_{AP}$ . Vandens pasipriešinimą sudarančios komponentės gali būti skaidomos ir nagrinėjamos atskirai, tačiau jos visos tarpusavyje saveikauja ir yra susijusios. Atskiros pasipriešinimo komponentės pateikiamos 2 lentelėje.

2 lentelė. Atskiros vandens pasipriešinimo komponentės.

| Visas vandens pasipriešinimas        |                                     |                                             |
|--------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------|
| Slėgio pasipriešinimas               | Paviršiaus trinties pasipriešinimas |                                             |
| Bangų pasipriešinimas                | Korpuso paviršiaus pasipriešinimas  | Išsikišančių dalių trinties pasipriešinimas |
| Bulbo, transo, visas pasipriešinimas | Formos pasipriešinimas              |                                             |
| Bangų susidarymo pasipriešinimas     | Klampuso pasipriešinimas            |                                             |

#### 3.1 Vandens pasipriešinimo laivo judėjimui susidarymas

Bendroji hidrodinamikos teorija teigia, kad neklampiuose skystyje giliai panardintas kūnas nėra veikiamas vandens pasipriešinimo jėgos. Nėra svarbu kaip skystis aptekės kūną, jis vis vien grįš į savo pradinę padėtį. Skystyje aplink panardintą objektą susidaro slėgio zonos kai srautas iškreipiamas ir vandens dalelių greičiai apie panardintą kūną yra skirtingi. Bernulio teorema teigia, kad padidėję skysčio srauto greičiai yra siejami su slėgio sumažėjimu. Panardintas kūnas yra veikiamas jėgų, bet šios jėgos viena kitą kompensuoja.

Realybėje klampiuose skystuose giliai panardintas kūnas bus veikiamas vandens pasipriešinimo jėgos. Judančiam kūnui pasiekus laisvąjį paviršių, slėgio skirtumas pasireiškia skysčio paviršiaus iškilimais ir įdubimais. Tai įtakoja bangų susidarymą. Šis reiškinys sudaro slėgio jėgas, veikiančias kūną, dėl kurių susidaro vilkimo (pasipriešinimo) jėga. Šios jėgos dydis priklauso nuo sukiamų bangų sistemos energijos.

Laivo eigumo uždavinyje dažnai yra nagrinėjamas atvirkštinis judėjimas. Laivui stovint vietoje, jį apteka vandens srautas tokiu greičiu, kuris lygus laivo plaukimo greičiui. Dėl vandens

klampumo arti laivo korpuso esančios vandens dalelės juda lėčiau nei tos, kurios yra toli nuo laivo korpuso. Arti laivo susidaro vandens sluoksnis, kuriame vandens dalelių greičiais yra mažesni. Pagal srauto santykinę greitį, kuris vertinamas Reinoldso skaičiumi  $Re$ :

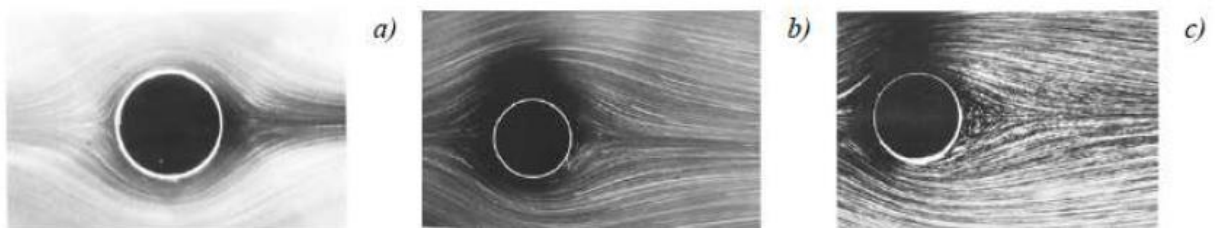
$$Re = \frac{v \cdot L}{\nu}, \quad (1)$$

$L$ - laivo ilgis,  $m$ ;

$v$ - laivo greitis,  $m/s$ ;

$\nu$ - vandens kinematinis klampumo koeficientas.

Pasienio sluoksnyje gali susidaryti laminarinis arba turbulentinis tekėjimo režimas, pavaizduotas 3 pav.



3 pav. a - sklandus aptekėjimas - laminarinis srautas; b - turbulentinis aptekėjimas pasienio sluoksnyje; c - pasienio sluoksnio atitrūkimas ir sūkurių susidarymas (Čerka J. 2005. 9p.).

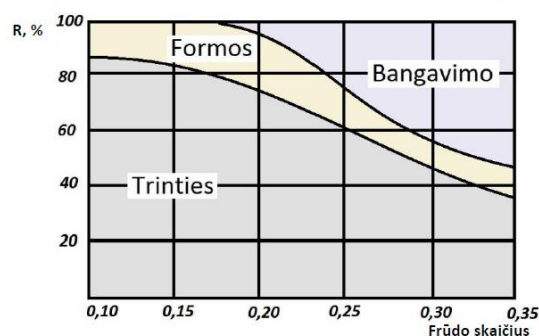
Eigumo uždaviniuose laivo greitaeigiškumas vertinamas ne pagal absoliutų greitį, o pagal santykinę Frūdo skaičių  $Fr$ :

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}}, \quad (2)$$

$v$ - laivo greitis,  $m/s$ ;

$L$ - laivo ilgis,  $m$ ;

$g$ - laisvojo kritimo pagreitis,  $m/s^2$ .



4 pav. Pasipriešinimo dedamosios priklausomai nuo Frūdo skaičiaus.

Skirtingos viso pasipriešinimo dalys pasireiškia skirtingai kintant Frūdo skaičiui. Kai laivo greitis mažiausias, didžiausią įtaką turi trinties pasipriešinimas, o formos pasipriešinimas lieka antras pagal sukliamą pasipriešinimą. Greičiui didėjant, trinties ir formos pasipriešinimas ženkliai sumažėja, kadangi pradeda susidaryti laivinės bangos, kurios pasiekus 0,35 Frūdo skaičių, sudaro didžiąją dalį viso pasipriešinimo. Todėl, projektuojant laivą, priklausomai nuo jo greičio ir dominuojančios pasipriešinimo dedamosios, laivo korpuso forma turėtų būti atitinkama.

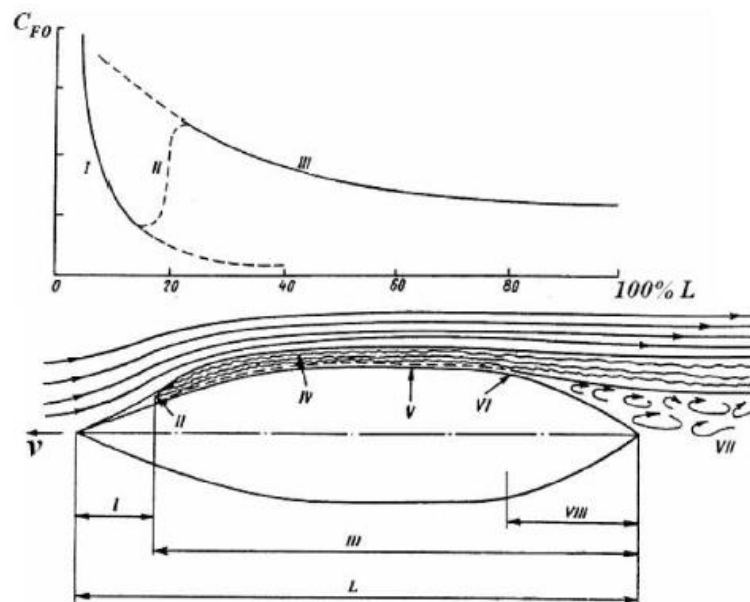
### 3.2 Trinties pasipriešinimo susidarymas

Pasienio sluoksnyje arti laivo korpuso dėl vandens klampumo susidaro tangentiniai įtempiai tarp atskirų vandens dalelių, judančių skirtingais greičiais (5 pav.). Šių įtempių atsojamosios projekcija į laivo judėjimo kryptį pasireiškia kaip trinties pasipriešinimas  $R_F$ :

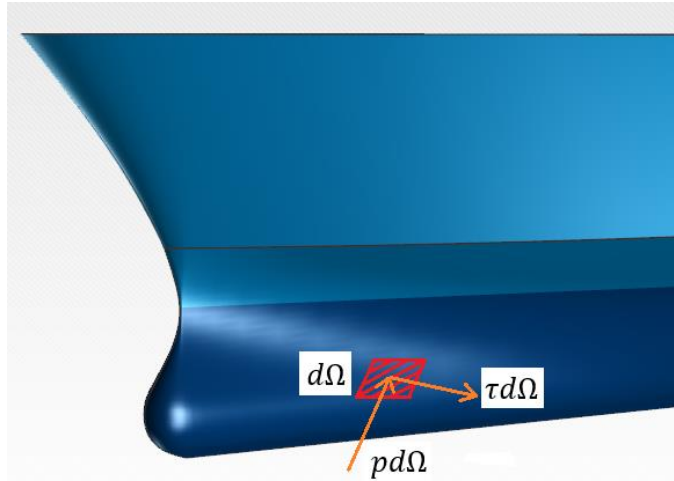
$$R_F = \int_{\Omega} \tau \cos(\tau, v) d\Omega, \quad (3)$$

$\tau$ - elementari trinties jėga, veikianti paviršiaus plote  $d\Omega$ , N;

$v$ - srauto greitis, m/s.



5 pav. Trinties pasipriešinimo susidarymas: I-laminarinis, II- pereinamasis, III- turbulentinis tekėjimo režimas pasienio sluoksnyje; IV- pasienio sluoksnio riba; V-laminarinis posluoksnis; VI- pasienio sluoksnio riba; VII- hidrodinaminis pėdsakas; VIII- sūkurių zona. (Čerka J. 2005. 9p.)



6 pav. Laivo korpuso paviršiaus elementą veikiančios jėgos (  $d\Omega$ - paviršiaus elemento plotas,  $pd\Omega$ - elementarus slėgis,  $\tau d\Omega$ - elementari trinties jėga).

Skaičiavimuose dažnai reali laivo korpuso povandeninė dalis pakeičiama ekvivalentine techniškai lygia plokšte. Šios plokštės plotas yra lygus laivo suvilgyto paviršiaus plotui, o paviršiaus nelygumai tokie, kad paviršiaus gludinimas neturi įtakos trinties pasipriešinimo dydžiui. Realybėje laivo korpusas yra nelygus. Jo eksploatacijos eigoje šie nelygumai tik didėja dėl įvairių deformacijų, korozijos ir paviršiaus apaugimo. Paviršiaus nelygumai vertinami kvadratinio nelygumų aukščiu  $k_\delta$ .

$$k_\delta = \sqrt{\frac{\sum k_i^2}{n}}, \quad (4)$$

$k_i$  – i-tojo nelygumo aukštis,  $\mu m$ ;

$n$  – bendras nelygumų skaičius.

Trinties pasipriešinimui įtakos turi ir laivo korpuso paviršiaus kreivumas. Paviršiaus kreivumo įtaka nėra didelė, ji sudaro apie 2-5% ir vertinama kreivumo įtakos koeficientu  $k_{kr}$  :

$$k_{kr} = 1 + 0,01 \left( \frac{11,25 - \frac{L}{B}}{5} \right) \cdot \left( 1,3 - \frac{B}{10d} \right) \cdot (0,35 + \varphi), \quad (5)$$

$\varphi$  - išilginio pilnumo koeficientas.

Visas trinties pasipriešinimo koeficientas  $C_F$  lygus:

$$C_F = C_{F0} \cdot k_{kr} + C_A, \quad (6)$$

$C_F$  - laivo korpuso trinties pasipriešinimo koeficientas;

$C_{F0}$  – techniškai lygios plokštės trinties pasipriešinimo koeficientas;

$C_A$  – nelygumų įtakos trinčiai koeficientas.



Techniškai lygios plokštės trinties pasipriešinimo koeficientas  $C_{F0}$  skaičiuojamas pagal Prandtlis ir Šlichtingo formulę:

$$C_{F0} = \frac{0.455}{(\lg Re)^{2.58}}, \quad (7)$$

Jei tekėjimo režimas yra laminarinis, tai atskirus paviršiaus nelygumus srautas apteka sklandžiai, o jei turbulentinis, srautui net ir esant labai arti paviršiaus, susidaro laminarinis posluoksnis, kurio storis Reinoldso skaičiui didėjant (t.y. didėjant srauto greičiui) mažėja. Taigi didesni nelygumai pradeda išlįsti iš šio posluoksnio, kol galų gale visai atsiduria turbuliantiniame sraute, ir greitis nebeturi pastebimos įtakos trinties pasipriešinimui.

Perėjimas iš laminarinio į turbulentinį tekėjimą yra srauto pastovumo reiškinys. Esant mažiems Reinoldso skaičiams skysčio susidrumstimas išnyksta ir srautas pasidaro stabilus. Esant kritinei Reinoldso reikšmei, laminarinis tekėjimas pasidaro nestabilus ir menkiausias sutrikdymas sukelia turbulenciją.

Turbulentinio tekėjimo režimu skysčio dalelės, esančios greta kūno paviršiaus, yra ramybės būsenoje kūno atžvilgiu. Tai parodo, jog yra laminarinis pasluoksnis, kuris yra ypač plonas. Svarbu, kad kūnas būtų pakankamai lygus ir jo nelygumai neišsikištų iš šio posluoksnio. Toks kūnas bus hidrauliškai lygus, o jo pasipriešinimas priklausomas nuo Reinoldso skaičiaus.

Praktiniais tikslais laivo, esančio jūroje, visas pasienio sluoksnis gali būti laikomas kaip turbulentinis. Dėl pasipriešinimo skirtumo tarp skirtingų pasienio sluoksnių (tekėjimo režimų) padidėjęs šiurkštumas praeityje susidarė nemažai nepastovių eksperimentinių duomenų atliekant bandymus baseinuose, todėl dauguma bandymų baseinų laboratorijų pradėjo dirbtinai sudaryti turbulentinio tekėjimo sąlygas tam, kad užtikrinti tikslesnį realių sąlygų ir reiškinių sukūrimą. Naudojami keli skirtingi būdai sudaryti turbulentiniam tekėjimui, tačiau dažniausiai naudojamos smeigių eilės modelio korpuse išdėstytos nedideliu atstumu nuo laivapriekio (Čerka J. 2005).

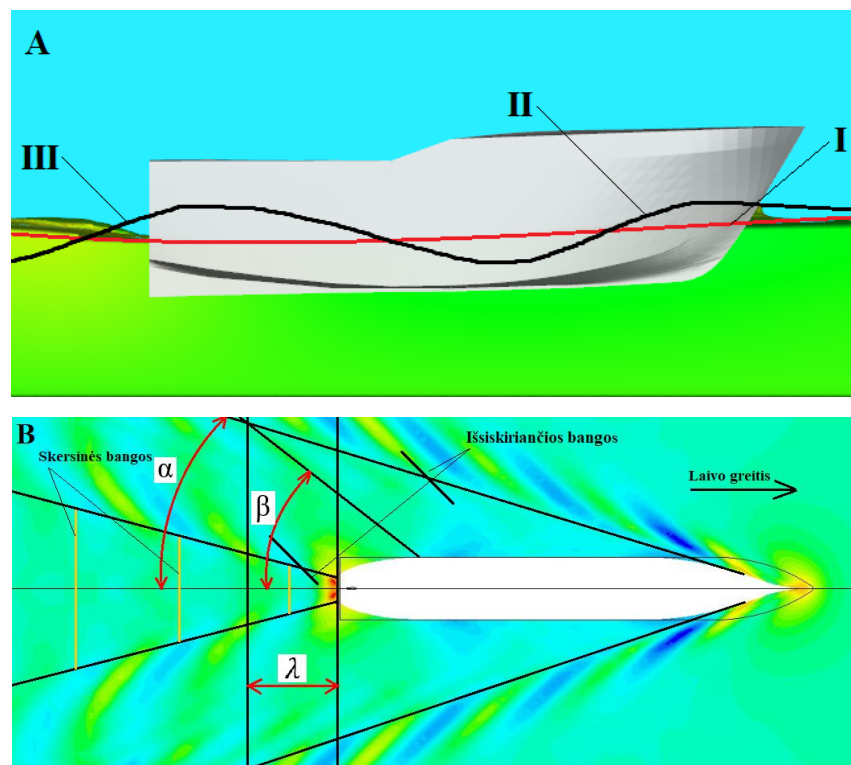
Vandens pasipriešinimas laivo korpusui priklauso nuo daugybės veiksnių, tokių kaip korpuso apkalos nelygumai, suvirinimo siūlės bei gofrai, susidarę gamybos ar eksploatavimo metu. Šiurkštumas ir nelygumai nuolatos didėja eksploatacijos metu dėl vandens ir apkrovų poveikio. Dažų plėvelės nusidėvi ir galiausiai prasideda korozija. Taip pat daugelyje plaukiojimo rajonų korpusas apauga vandens organizmais.

### 3.3 Bangavimo pasipriešinimo susidarymas

Laivui plaukiant susidaro laivinės bangos, kurios pakeičia vandens dalelių greičius sraute. Laivinių bangų susidarymas susietas su tuo, kad laivui plaukiant arti laivo korpuso vandenyje slėgis pakinta (7 pav.), o dėl vandens pusiausvyros padėties paviršių visur veikia vienodas oro slėgis. Laivapriekyje ir laivagalyje vandens lygis pakyla, o ties laivo mideliu nusileidžia. Iš pusiausvyros padėties išvestos vandens dalelės, sunkio jėgos veikiamos, pradeda svyruoti – judėti apskritimu. Pasikeitus greičiams sraute, persiskirsto ir slėgis išilgai laivo. Suprojektavę slėgio pokyčio atstojamąją į laivo judėjimo kryptį turėsime bangavimo pasipriešinimą  $R_w$  :

$$R_w = \int_{\Omega} p_n d\Omega, \quad (8)$$

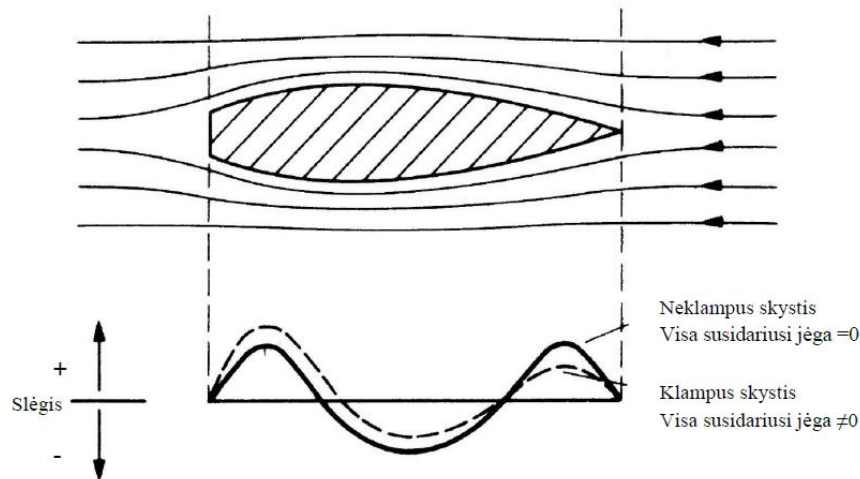
$p_n$  – elementarų plotą  $d\Omega$  veikiantis slėgis,  $Pa$ .



7 pav. Bangavimo pasipriešinimas: I – slėgio pokytis vandenyje laivui judant; II – laivapriekinė banga; III – laivagalinė banga (A – slėgio pasikeitimas vandenyje arti korpuso, B – laivinių bangų sistema).

Vandens srautui aptekant laivo korpusą, vandens dalelių greičiai laivapriekyje ir laivagalyje yra didesni nei ties laivo mideliu (8 pav.). Slėgiai  $p$  išilgai laivo pasiskirsto priešingai greičiams  $v$  (Bernulio lygtis):

$$p + \frac{\rho v^2}{2} = \text{const.} \quad (8)$$



8 pav. Skystyje judančio kūno sukeltas slėgis (Čerka J., 2009).

Bangų Sistema, veikianti kartu su laivu, yra kur kas sudėtingesnė. Gali būti laikoma, kad laivas yra judantis slėgio laukas šalia laivapriekio ir neigiamas slėgio laukas šalia laivagalio. Laivapriekio sukeltas slėgio laukas yra panašus į Kelvin'o judančio slėgio tašką, o laivagalis sukelia įdubą. Kai kuriuose laivuose sukelta bangų sistema gali būti daug sudėtingesnė, kadangi bangos sukeliamos dėl vietinių laivo formos netolygumų.

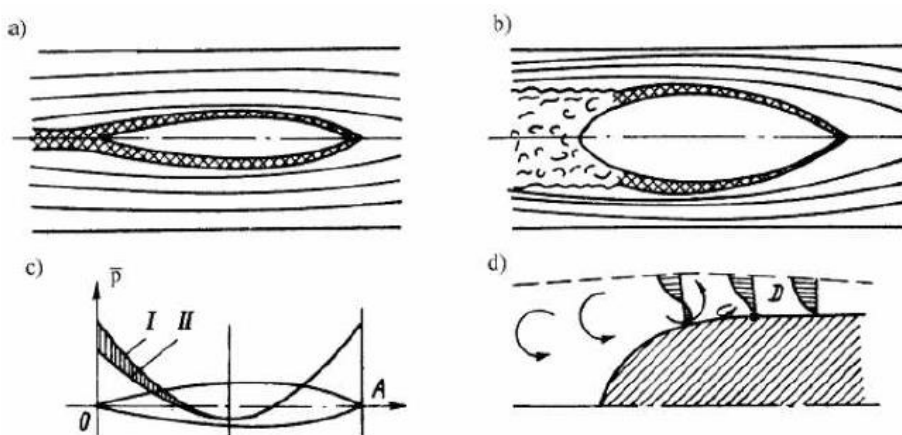
Kadangi daugeliu greičių laivapriekinė ir laivagalinė bangos veikia laivagalyje, pasireiškia sąveika tarp dviejų skersinių bangų sistemų. Jeigu šių sistemų fazės sutampa, galutinė bangų sistema turės padidėjusį aukštį ir atitinkamai didesnę energiją. Jei skirtingų sistemų bangų keteros yra viena tarp kitos, bendra bangų sistema bus mažesnė, kartu ir mažesnis bendras bangų aukštis bei energija. Bangų sudaromas pasipriešinimas priklauso nuo bendro bangų sistemos energijos kiekio, kinta nuo greičio ir efektyvaus atstumo tarp laivapriekinio ir laivagalinio slėgių sistemos. Šiuo atveju svarbūs laivo greičio  $v$  ir ilgio  $L$  paramterai.

Projektuojant laivą, projektuotojai turi išspęsti uždavinį, kurio pagrindinė sąlyga, kad laivo eksploatacinis greitis būtų bangų pasipriešinimo įduboje.

### 3.4 Formos pasipriešinimo susidarymas

Formos pasipriešinimas yra didžiausias pilnų apvadų (aukšto pilnumo koeficientą turinčiuose) laivuose. Prarasta slėgio energija pasireiškia bangomis ir sūkuriais.

Slėgių pokyčio (12 pav.) suma sudaro vieną iš formos pasipriešinimo dedamųjų dalių. Kita formos pasipriešinimo susidarymo priežastis – pasienio sluoksnio atitrūkimas laivagalyje, nes artėjant prie laivagalio slėgis didėja  $\frac{\partial P}{\partial x} > 0$ , vandens dalelės juda su neigiamu pagreičiu. Ten, kur  $\frac{\partial v_x}{\partial n} = 0$  – greičio epiūros liestinė sutampa su normale laivo korpusui ir greičio gradientas lygus nuliui – yra pasienio sluoksnio atitrūkimo taškas. Iki šio taško yra konfuzinė pasienio sluoksnio dalis, o už šio taško į laivagalį – difuzinė. Trečioji priežastis – laivagalyje susidaro sūkuriojantis vandens srautas, iš dalies judantis kartu su laivu. Tai hidrodinaminis pėdsakas, kuriame slėgis mažesnis nei aplinkiniame sraute. Šių trijų slėgio atstojamųjų projekcija į laivo judėjimo kryptį sudaro visą formos pasipriešinimą laivo judėjimui  $R_{vp}$ .



9 pav. Formos pasipriešinimo susidarymas ir šio pasipriešinimo dedamosios dalys: a – pasienio sluoksnis esant sklandžiam aptekėjimui, b – hidrodinaminis pėdsakas, c – slėgio pasiskirstymas išilgai laivo (I – idealiam skystyje, II – vandenyje), d – pasienio sluoksnio atitrūkimas laivagalyje.

(Čerka J., 2005 12p.)

### 3.5 Visas vandens pasipriešinimas

Pirmosios dvi dedamosios pasipriešinimo dalys ( $R_F, R_T$ ) priklauso nuo vandens klampumo, trečioji ( $R_w$ ) – nuo vandens svarumo. Tačiau patikimai teoriškai apskaičiuoti galima tik trinties pasipriešinimą, o formos ir bangavimo pasipriešinimas tegali būti įvertintas tik apytikriai, nes šios

dvi pasipriešinimo dalys priklauso nuo daugelio laivo korpuso charakteristikų ir nuo reiškinių, vykstančių vandenyje arti laivo korpuso. Inžinerinėje praktikoje formos ir bangavimo pasipriešinimas sujungiamas į vieną ir vadinamas likusiuoju pasipriešinimu  $R_R$ . Tuomet visas vandens pasipriešinimas judėjimui laikomas susidedančiu iš dviejų dalių:

$$R = R_w + R_R \quad (9)$$

3 lentelė. vandens pasipriešinimo laivo judėjimui dedamosios.

| Vandens pasipriešinimo dedamosios | Užbortinio vandens sužadinimo forma                                                                               | Vandens savybė | Poveikis į laivo korpusą |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|--------------------------|
| Trinties                          | Pasienio sluoksnis                                                                                                | Klampus        | Tangentinės jėgos        |
| Formos                            | Pasienio sluoksnio storio padidėjimas laivagalyje;<br>Pasienio sluoksnio atitrūkimas;<br>Hidrodinaminis pėdsakas. | Klampus        | Normalinės jėgos         |
| Bangavimo                         | Laivinės bangos                                                                                                   | Svarumas       | Normalinės jėgos         |

Pagrindiniai laivo eigumo skaičiavimo duomenys – laivo tipas, laivo teorinio brėžinio duomenys, plūdrumo ir pradinio stovumo charakteristikos, plaukiojimo režimai, pageidaujamas greitis, išvystoma trauka. Didelės apimties sudėtingesnius ir ypač vienatipius skaičiavimus tikslinga atlikti naudojant specializuotas kompiuterines skaičiavimo programas.

Analizuojant vandens pasipriešinimą laivo korpuso judėjimui yra būtina nustatyti tinkamą metodiką. Skirtingomis geometrinėmis charakteristikomis pasižymintiems laivams dėl jų greičio, korpuso formos, vandens srauto tekėjimo režimai gali būti apskaičiuojami tik pritaikius tam tinkamus matematinius modelius. Netinkamai parinktas skaičiavimo metodas gali turėti neigiamos įtakos skaičiavimo rezultatų korektiškumui.

#### IV. VANDENS PASIPRIEŠINIMO SKAIČIAVIMO METODAI

Vienas iš patikimiausių metodų vandens pasipriešinimui laivo korpusui nustatyti yra sumažinto laivo modelio eigumo tyrimas bandymų baseine. Tačiau šis tyrimo metodas ne visiems prieinamas, kadangi baseino įrengimas, eksploatacija, eksperimentams reikalinga įranga ir tikslus sumažinto laivo modelio pagaminimas brangiai kainuoja.



10 pav. Laivo modelio eigumo bandymas baseine.

Šiomis dienomis sparčiai tobulėjant informacinių technologijų sektoriui, kompiuteriams bei programinei įrangai, atsiveria naujos galimybės informacines technologijas pritaikyti inžineriniame sektoriuje įskaitant laivų projektavimo ir statybos pramonę. Dauguma fizikinius reiškinius aprašantys matematiniai modeliai yra susisteminti ir programavimo algoritmų pagalba perkeltami į programinės įrangos paketus. Vandens pasipriešinimą laivo korpuso judėjimui aprašantys matematiniai modeliai ir metodai taip pat nėra išimtis. Vien „Autoship“ programinės įrangos paketo dalis „Autopower“ gali atlikti vandens pasipriešinimo laivo korpuso judėjimui įvertinimą aštuoniais metodais, kurie aprašomi skirtingais matematiniais modeliais. Informacija apie „Autopower“ programos metodus pateikiama 4 lentelėje.

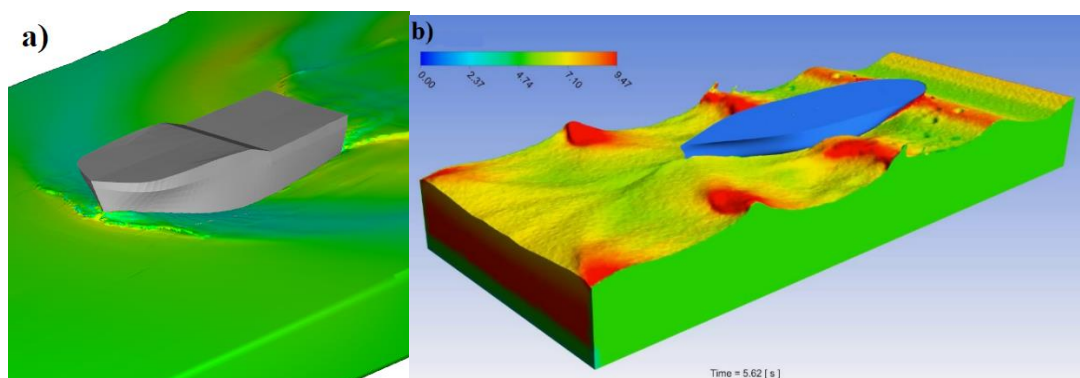
4 lentelė. „Autopower“ programos skaičiavimo metodai.

| <b>Andersen</b>                       | L/B        | L/D        | Fr        | $C_b$     | -         |
|---------------------------------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| Lėtaeigiams laivams                   | 5.00-8.00  | 4.00-6.00  | max.0.33  | 0.55-0.85 | -         |
| <b>Fung</b>                           | B/T        | L/D        | Fr        | $C_p$     | $C_m$     |
| Su tranciniu laivagaliu               | 2.20-5.20  | 5.75-11.26 | 0.18-0.51 | 0.52-0.70 | 0.62-0.90 |
| <b>Holtrop</b>                        | L/B        | B/T        | Fr.       | $C_p$     | -         |
| Universalus limitų ribose             | 3.90-14.90 | 2.10-4.00  | max. 1.00 | 0.55-0.85 | -         |
| <b>Oortmerssen</b>                    | L/B        | B/T        | Fr        | $C_p$     | $C_m$     |
| Mažiams laivams                       | 3.40-6.20  | 1.90-3.40  | max. 0.50 | 0.52-0.70 | 0.73-0.98 |
| <b>Digernes</b>                       | -          | -          | Fr        | -         | -         |
| Specializuomiems žvejybiniais laivams | -          | -          | max. 0.50 | -         | -         |
| <b>Jin</b>                            | -          | L/D        | Fr        | $C_p$     | -         |
| Laivams su sklandžiu borto perėjimu   | -          | 4.50-8.70  | 0.40-1.00 | 0.57-0.76 | -         |

| Calisal                               | B/T       | L/B       | Fr        | C <sub>b</sub> | L/D            |
|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------------|----------------|
| University of British Columbia series | 2.00-3.00 | 2.60-4.00 | max. 0.43 | 0.53-0.62      | 3.00-4.50      |
| FAO                                   | B/T       | L/B       | Fr        | C <sub>p</sub> | C <sub>m</sub> |
| Mažiems žvejybiniais laivams          | 2.00-4.50 | 5.60      | max. 0.36 | 0.55-0.70      | 0.53-0.93      |

Skaičiuojamosios skysčių dinamikos programų veikimo principas aprašomas įvairiais sudėtingais matematiniais modeliais. SSD programos „Flow 3D“ skaičiavimams naudojamas dalinių išvestinių metodas, RANS, laisvojo pavšiaus sekimui TruVOF algoritmas. Programinio paketo „ANSYS“ programos „ANSYS FLUENT“ veikimas pagrįstas baigtinių elementų metodu. Daugumos SSD programų ekperimeto modeliavimui yra reikalinga tiksli ir trimatė laivo korpuso geometrija, naudojamos programos palaikomu formatu.

Naudojant šiuolaikinius SSD programinius paketus atsiranda galimybė labai tiksliai įvertinti ir vizualine išraiška perteikti skysčio srauto tėkmę aplink plaukiantį laivą, jo elementus ir jų sąveiką su bangomis. SSD matematiniai modeliai suteikia galimybę apskaičiuoti laivo korpusą veikiančias jėgas, tokias kaip trintis, šoninė jėga, slėgis, vandens pasipriešinimas.



11 pav. a) „Flow 3D“ vandens pasipriešinimo tyrimas; b) „ANSYS FLUENT“ laivo supimosi tyrimas.

Apibendrinus galima teigti, kad pagrindiniai būdai hidrodinaminiam korpuso ir jo dalių įvertinimui yra (Hochkirch K. ir kt., 2013):

*Rankine panel* metodai (*nelinijiniai bangų pasipriešinimo kodai angl. fully non-linear wave resistance codes*). Šio metodo privalumai ir trūkumai (Hochkirch K. ir kt., 2013):

Privalumai:

- Metodus apima bendrą bangų modelį ir daugeliu atveju nustato dinaminį diferentą ir nugrimzdimą (*angl. Sinkage*) gana tiksliai.

- Skaičiavimo modelis veikia labai greitai. Tinklelio sudarymas ir skaičiavimai yra visiškai automatizuoti, o skaičiavimo laikas gali būti trumpesnis nei minutė nagrinėjant vieną greičio ir geometrijos atvejį įprastu kompiuteriu.

Trūkumai:

- Skaičiavimo modelis negali tirti lūžtančių bangų bei gliseruojančių laivų. Tai atvejai su laivapriekiniu gumbu, panirusio trancinio laivagalio sukelti sudėtingi sūkuriai.
- Klampumo sukelti reiškiniai ir poveikis negali būti modeliuojami teisingai.

Laisvojo paviršiaus *RANSE (Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations)* metodai.

Privalumai ir trūkumai yra tokie (Hochkirch K. ir kt., 2013):

Privalumai:

- Skaičiavimo metodas apima bendrą ir vietinį bangų modelį, įskaitant sudėtingas lūžtančias bangas.
- Galima tirti klampumo reiškinius realiu masteliu.

Trūkumai:

- Labai ilgas skaičiavimo laikas.
- Skaičiavimų kokybė ir tikslumas smarkiai skiriasi priklausomai nuo SSD programų. Sudėtinga įvertinti kurios SSD programos yra tikslesnės bei kokybiškesnės.

Laisvojo paviršiaus *RANSE* metodai yra plačiai naudojami projektuojant ir optimizuojant eigumą gerinančius įtaisus, laivagalius ir kitas konstrukcijas bei reiškinius, kuriuose pasireiškia klampumo reiškiniai. Šis metodas reikalauja daug kompiuterinių išteklių ir protingos optimizavimo strategijos.

Modeliniai bandymai baseinuose. Privalumai ir trūkumai (Hochkirch K. ir kt., 2013; Ašmontas Ž. 2015):

Privalumai:

- Plačiai žinomas ir naudojamas industrijoje, tapo standartu nustatant laivo eigumą.
- Egzistuoja industriniai standartai daugumai procedūrų, kuriuos nustato *ITTC (International Towing Tank Conference)* kaip tarptautinė ekspertų įstaiga. Be to, didesni bandymų baseinai siūlo kokybiškas paslaugas.

Trūkumai:

- Pasireiškia mastelinis efektas.
- Bandymai yra brangūs ir užimantys daug laiko.
- Lygiagretūs procesai neįmanomi.



Atliekant vandens pasipriešinimo įvertinimą skirtingomis geometrinėmis charakteristikomis pasižymintiems žvejybiniais traleriams, reikia nustatyti tinkamą vandens pasipriešinimo įvertinimo metodiką. Metodas bus parekamas iš šiuo metu prineinamų vandens pasipriešinimo skaičiavimo metodikų:

1. „FAO” metodas. Programa „Autopower”.
2. „Holtropo” metodas. Programa „Autopower”.
3. Likusio pasipriešinimo metodas. Programa sudaryta Klaipėdos universiteto Laivo inžinerijos katedroje.
4. Skaičiuojamosios skysčių dinamikos programa „Flow 3D”.

## V. MAŽŲJŲ ŽVEJYBINIŲ TRALERIŲ KORPUSO FORMOS MODELIAVIMAS

### 5.1 Modeliuojamų korpusų geometrinių charakteristikų nustatymas

Kanados mokslininkai atliko modelinius mažųjų žvejybinių tralerių korpusų bandymus „Ocean Engineering“ bandymų centro baseine, kurio ilgis 67.06 m, plotis 3.66 m, gylis 2.44 m. Bandymų tikslas - nustatyti, kokią įtaką laivo borto perėjimo juosta turi vandens pasipriešinimui laivo korpuso judėjimui. Buvo tiriami 39 sumažinti masteliu 13.75:1 laivo modeliai, kurių perskaičiuotos geometrinės charakteristikos pateikiamos 5 lentelėje.

Šie laivų modeliai pasižymi mažais santykiniais dydžiais  $L/B$ ,  $B/d$ , bei didele vandentalpa (ang. *heavy displacement*). Tokio tipo žvegybiniai laivai turi santykinai didelį denio plotą. Siekiama išlaikant nepakitusi laivo ilgį išgauti kuo didesnę laivo plotį bei sumažinti laivo kuro sąnaudas.

Didinant laivo plotį, didėja vandens pasipriešinimas laivo korpuso judėjimui. Siekiant to išvengti yra modifikuojamos laivo korpuso geometrinės charakteristikos. Modeliai testuojami greičių intervale nuo 6 mazgų iki 12 mazgų. Frūdo skaičius bandymų metu siekia nuo 0.2 iki 0.45.

5 lentelė. Perskaičiuotos žvejybinių tralerių korpusų geometrinės charakteristikos.

| Variantas | L, m  | B, m | d, m | $C_p$ | $C_b$ |
|-----------|-------|------|------|-------|-------|
| 1.        | 21.34 | 6.97 | 2.80 | 0.7   | 0.615 |
| 2.        | 18.13 | 6.97 | 2.80 | 0.7   | 0.615 |
| 3.        | 27.73 | 9.36 | 3.76 | 0.7   | 0.615 |

|     |       |      |      |       |       |
|-----|-------|------|------|-------|-------|
| 4.  | 21.34 | 6.97 | 2.33 | 0.7   | 0.615 |
| 5.  | 21.34 | 6.97 | 3.50 | 0.7   | 0.615 |
| 6.  | 27.73 | 6.96 | 2.33 | 0.7   | 0.615 |
| 7.  | 21.34 | 6.97 | 2.80 | 0.653 | 0.531 |
| 8.  | 27.73 | 6.96 | 2.79 | 0.653 | 0.531 |
| 9.  | 21.34 | 6.97 | 2.33 | 0.653 | 0.531 |
| 10. | 21.34 | 6.97 | 3.50 | 0.653 | 0.531 |
| 11. | 27.73 | 6.96 | 3.50 | 0.7   | 0.531 |
| 12. | 27.73 | 6.96 | 2.33 | 0.653 | 0.531 |
| 13. | 27.73 | 6.96 | 3.50 | 0.653 | 0.531 |

L - laivo ilgis, m; B – laivo plotis, m; d – laivo grimzlė, m;  $C_p$  – išilginio pilnumo keofocientas;  $C_b$  – vandentalpos pilnumo koeficientas.

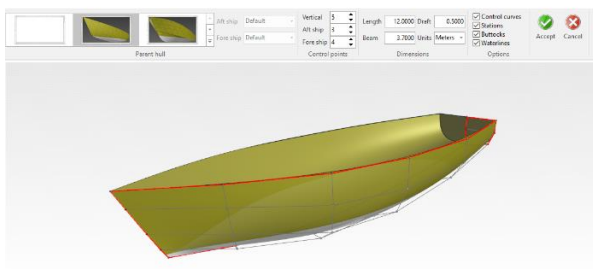
Remiantis 5 lentelėje pateiktomis žvejybinių tralerių korpusų geometrinėmis charakteristikomis, atliksime trimačių laivų korpusų modeliavimus, naudodamiesi automatizuota laivų korpuso formos modeliavimo programa „Delftship“.

## 5.2 Trimačių žvejybinių tralerių korpusų modeliavimas „Delftship“ programa

„Delftship“ automatizuota laivų korpuso formos modeliavimo programa suteikia galimybę modeliuoti laivo korpuso formą, stebint laivo korpuso jūrinių savybių kitimą tam papildomai neperskaičiuojant, naudojant atskiras programas, sumodeliuoto korpuso po kiekvienos atliktos modifikacijos.

Atliktas 1 tipo 1 varianto mažojo žvejybinio tralerio trimačio korpuso modeliavimas.

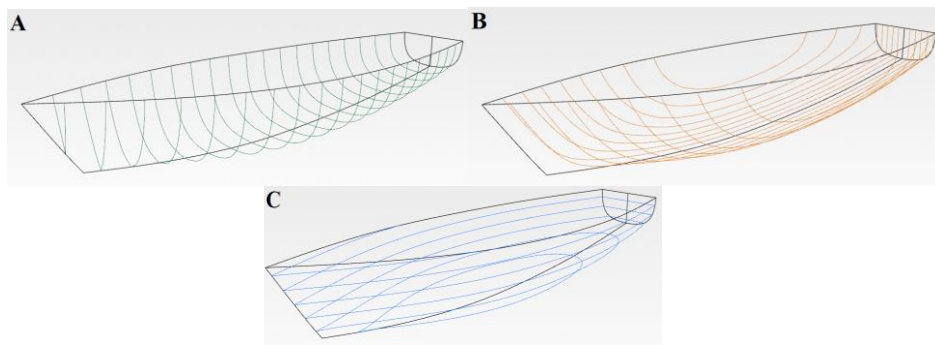
Pradėjus laivo korpuso formos projektavimą, programa automatikai pateikia bazinį jachtos korpusą su įvestais koregavimo taškais. Atsižvelgiant į modeliuojamo laivo geometrines charakteristikas atitinkamai pasirentamas vertikalus ir horizontalus koregavimo taškų skaičius.



12 pav. Pradinis „Delftship“ programos langas.

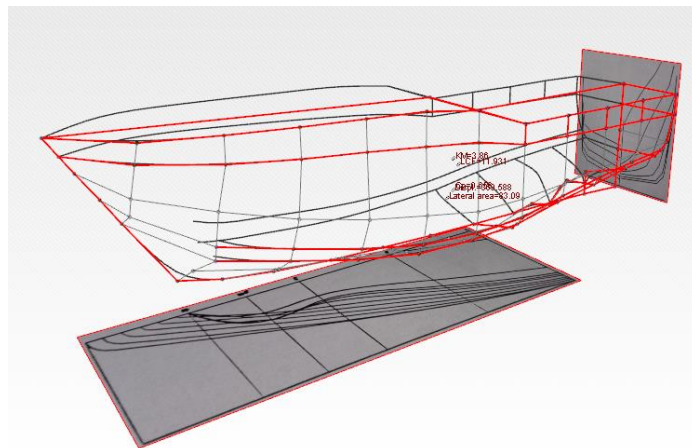
Įvedus pagrindinius laivo geometrinius duomenis: ilgį, plotį, grimzlę, programa automatiškai pakoreguoja trimatę korpuso geometriją pagal užduotus duomenis. 1 tipo 1 varianto žvejybinio tralerio geometrinės charakteristikos pateikiamos 5 lentelėje.

Norint pagal turimą laivo teorinį brėžinį atkartoti laivo korpuso geometriją, būtina programoje įvesti linijas nustatytu žingsniu atvaizduojančias išilginius (batoksai), skersinius (špangautai), horizontalius (vaterlinijos) laivo korpuso pjūvius: *Tools*→*Intersection*→*Stations*, *buttocks*, *waterlines*. Pagal teoriniame brėžinyje pateiktą špangautų rikiuotę jų išdėstymo žingsnis atitinka 1 m, batoksų 0.6 m, vaterlinijų 0.2 m.



13 pav. A - įvedami špangautai; B – įvedami batoksai; C – įvedamos vaterlinijos.

Naudodami programoje esančią funkciją „*Edit background image*“, importuojame dvimates teorinio brėžinio projekcijas. Importuotose projekcijose pateikiami laivo teoriniai batoksai, vaterlinijos ir špangautai, kurie turi sutapti su trimačiame laivo modelyje įvestomis projekcijomis bei laivo kontūro forma. Nesutapus linijoms, naudojant redagavimo taškus yra masteliuojamos importuotos dvimatis projekcijos. Pagal importuotas projekcijas yra formuojama žvejybinio tralerio korpuso forma. Importuotos dvimatis teorinio brėžinio projekcijos pateikiamos 14 pav.

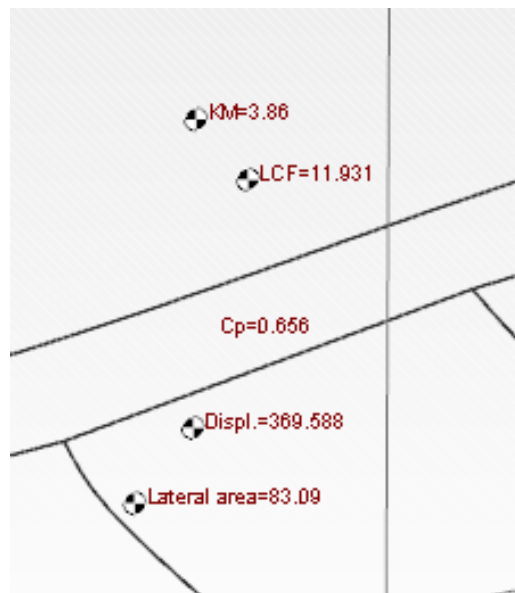


14 pav. Importuotos dvimatis teorinio brėžinio projekcijos.

Modeliuojant trimatį laivo korpusą šiuo atveju yra sąlyga išlaikyti laivo korpuso geometrines charakteristikas:  $L=21.34$  m,  $B=6.97$  m,  $d=2.80$  m,  $C_p=0.7$ ,  $C_b=0.615$ .

Pakeitus koregavimo taškų koordinates, laivų jūrinės ir geometrinės charakteristikos keičiasi. Kintančių modeliuojamų charakteristikų kitimui stebėti naudojame funkciją „*Hydrostatics*“. Modeliuojamo laivo korpuso viduje pateikiama informacija 17 pav.:

KM - laivo metacentrinis aukštis, m, LCF- vandentalpos centro aplikatė, m,  $C_p$  – išilginio pilnumo koeficientas, Disp. – vandentalpa,  $m^3$ , Lateral area – šoninio paviršiaus plotas,  $m^2$ .



15 pav. Kintančių laivo korpuso geometrinių charakteristikų atvaizdavimas.

Sudarius laivo korpuso trimatį modelį, kurio špangautai, batokasai, vaterlinijos sutampa su dvimačiose projekcijose pateiktomis linijomis bei reikiamomis hidrostatinėmis charakteristikomis, atlikti papildomi automatizuoti skaičiavimai tam, kad patikrinti sumodeliuoto laivo korpuso tikslumą.

„*Delftship*“ progamoje atlikta veiksmų seka: *Calculations and extensions*→*Design Hydrostatics*. Programa automatiškai atieko pagrindinius hidrostatinius skaičiavimus, kuriuos galima išsaugoti PDF formatu. 16 pav. raudona spalva pažymėti dydžiai turi sutapti su užsiduotomis laivo modelio hidrostatinėmis ir geometrinėmis charakteristikomis.

## Design hydrostatics report

Designer

Created by

Comment

Filename

1 TIPAS 1 var.fbm

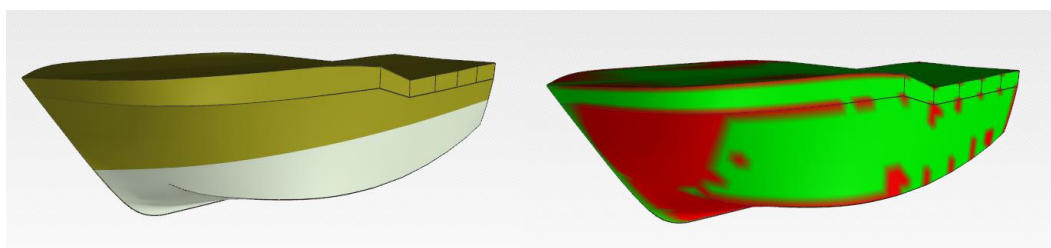
|                 |            |                        |            |
|-----------------|------------|------------------------|------------|
| Design length   | 21.685 (m) | Midship location       | 10.843 (m) |
| Length over all | 23.170 (m) | Relative water density | 1.0250     |
| Design beam     | 6.970 (m)  | Mean shell thickness   | 0.0000 (m) |
| Maximum beam    | 7.241 (m)  | Appendage coefficient  | 1.0000     |
| Design draft    | 2.800 (m)  |                        |            |

| Volume properties               |                           | Waterplane properties           |                          |
|---------------------------------|---------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| Moulded volume                  | 258.663 (m <sup>3</sup> ) | Length on waterline             | 21.238 (m)               |
| Total displaced volume          | 258.663 (m <sup>3</sup> ) | Beam on waterline               | 7.090 (m)                |
| Displacement                    | 265.129 (tonnes)          | Entrance angle                  | 37.846 (Degr.)           |
| Block coefficient               | 0.6112                    | Waterplane area                 | 125.39 (m <sup>2</sup> ) |
| Prismatic coefficient           | 0.7026                    | Waterplane coefficient          | 0.8296                   |
| Vert. prismatic coefficient     | 0.7368                    | Waterplane center of floatation | 9.477 (m)                |
| Wetted surface area             | 219.33 (m <sup>2</sup> )  | Transverse moment of inertia    | 434.91 (m <sup>4</sup> ) |
| Longitudinal center of buoyancy | 9.247 (m)                 | Longitudinal moment of inertia  | 3720.9 (m <sup>4</sup> ) |
| Longitudinal center of buoyancy | -7.514 %                  |                                 |                          |
| Vertical center of buoyancy     | 1.703 (m)                 |                                 |                          |

16 pav. Sumodeliuoto laivo korpuso geometrinės charakteristikos „Delftship“ programoje.

Pateikti programos duomenys bus reikalingi mažiesiems žvejybiniams traleriams tinkamo vandens pasipriešinimą įvertinančio metodo parinkimui.

Galutiniame trimačio laivo korpuso modeliavimo etape patikrinamas laivo korpuso formos pavišiaus sklandumas. Laivo modelis turi būti kuo tikslesnės aptakios formos, kadangi ne tiksliai suprojektuotas laivo paviršius gali turėti neigiamos įtakos skaičiuojant vandens pasipriešinimą laivo korpuso judėjimui taikant SSD metodiką. 17 pav. žalia spalva žymimas sklandžiai pereinantis paviršius, raudona spalva – netolygiai pereinantis paviršius. Laivo korpuso forma koreguojama tol kol pavišiaus sklandumas yra priimtinas ir neturi įtakos tolimesnių skaičiavimų rezultatams.

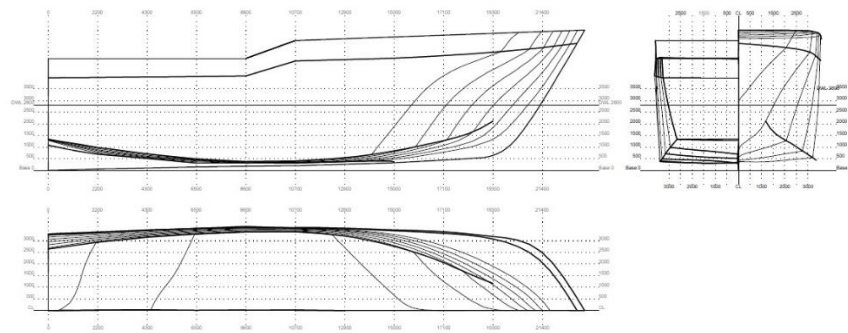


17 pav. Laivo korpuso paviršiaus sklandumo patikrinimas.

„Delftship“ turi galimybę atlikti laivo vandens pasipriešinimo skaičiavimus. Komandų seka: *Calculations and extensions*→*Resistance*. Skaičiuojama remiantis „Delft Series 98“ ir „John Winters (KAPER)“ skaičiavimo metodika. Šios metodikos pritaikytos skaičiuoti mažoms, vidutinio

dydžio jachtų ir kanojų vandens pasipriešinimui. Jos nėra tinkamos žvejybinių, didelių prekybinių laivų vandens pasipriešinimo vertinimui. Todėl „Delft Series 98“ ir „John Winters (KAPER)“ skaičiavimo metodų įvertinti žvejybinių tralerių vandens pasipriešinimą naudoti netikslinga ir nerekomenduojama.

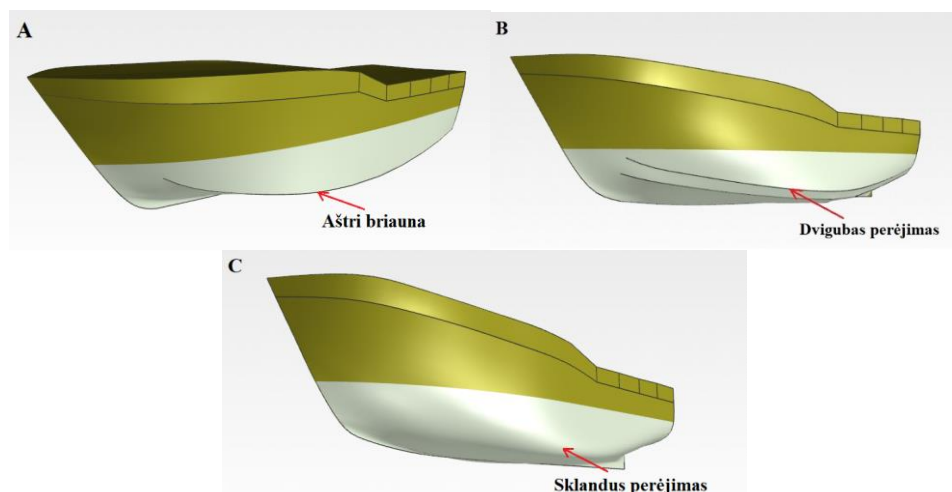
Analogiška veiksmų seka atliekamas likusių 38 žvejybinių tralerių korpusų modeliavimas. Suprojektuotų laivų timačiai modeliai perkeliama į laivo teorinį brėžinį: *Tools*→*Line plan*. Visų sumodeliuotų žvejybinių tralerių teoriniai brėžiniai pateikiami baigiamojo darbo II tome.



18 pav. Laivo teorinis brėžinys.

Paskutiniame trimačio modelio paruošimo etape laivo korpuso geometrija eksportuojama į SSD programos „Flow 3D“ palaikomą STL failą: *Save* → *Export* → *STL*.

Remiantis Kanados mokslininkų pateiktomis mažųjų žvejybinių tralerių geometrinėmis ir hidrostatinėmis charakteristikomis suprojektuoti 39 mažųjų žvejybinių tralerių korpusai su skirtingomis borto perėjimo į laivo dugną juostomis. Visi skirtingų tipų žvejybiniai traleriai pateikiami 19 pav.



19 pav. Skirtingų tipų žvejybinių tralerių trimačiai modeliai. (A - perėjimas su aštria briauna, B – dvigubas perėjimas, C- sklandus perėjimas).

## VI. LAIVO EIGUMO PRAKTINIO VERTINIMO GALIMYBĖS

Ne visi ketvirtame skyriuje aprašyti egzistuojantys vandens pasipriešinimo metodai yra tinkami mažųjų žvejybinių tralerių vandens pasipriešinimo įvertinimui. Dėl skirtingų bandymo sąlygų ir geometrinių laivo korpuso charakteristikų vandens srauto tėkmės režimai, Frūdo, Reinoldso skaičiai įgyja tam tikras skaitines reikšmes. Skirtingoms vandens srauto charakteristikoms analizuoti yra naudojami skirtingi matematiniai modeliai bei eksperimentai. Žvejybinių tralerių vandens pasipriešinimui įvertinti bus palygintos trys skirtingos vandens pasipriešinimą įvertinančios metodikos:

1. „Autoship“ programinės įrangos paketo programa „Autopower“ vandens pasipriešinimo vertinimą atlieka aštuoniais metodais, kurių tinkamumas apibrėžiamas programos kūrėjų rekomendacijomis bei metodų grindžiamais matematiniais modeliais žr. 4 skyrius 4 lentelė. „Autopower“ programoje mažųjų žvejybinių tralerių vandens pasipriešinimui įvertinti pateikiamas tik vienas **FAO** metodas. Kitų metodų ribos nėra priimtinos analizuojamų laivų vandens pasipriešinimo įvertinimui dėl laivų geometrinių ir hidrostatinų charakteristikų.
2. Klaipėdos universiteto laivo inžinerijos katedroje sudaryta programa skirta laivo vandens pasipriešinimui įvertinti likusio pasipriešinimo metodu.
3. Skaičiuojamosios skysčių dinamikos programa „Flow 3D“

Atskaitos taškas skirtingais metodais gautų vandens pasipriešinimo rezultatų palyginimui priimamas Kanados mokslininkų sumažinto laivo modelio bandymo rezultatai, kurie buvo gauti tiriant laivo korpusą bandymų baseine.

Vandens pasipriešinimas skirtingais metodais bus skaičiuojamas 1 tipo 1 varianto žvejybinio laivo korpusui, kurio geometrinių ir hidrostatinės charakteristikos pateikiamos baigiamojo darbo 2 tome.

### 6.1 Vandens pasipriešinimo įvertinimas programa „Autopower“

„Autopower“ programos pargindimiam lange reikia įrašyti laivo korpuso geometrines ir hidrostatinės charakteristikas, kurios bus įvertinamos programos matematiname modelyje nustatant vandens pasipriešinimo skaitines reikšmes. Laivo modelio geometrines ir hidrostatinės charakteristikas naudosime iš programos „Delftship“ pateiktų skaičiavimo rezultatų, kurie pateikti

baigiamojo darbo 2 tome. „Autopower“ programos pagrindinis langas su užpildytais duomenimis pateikiamas 20 pav.

Autopower 3.0.5

File Edit Solve Settings Help

Displacement

R P

| Project Name           | 1 Tipas 1 variantas |  |  |  |  |                |
|------------------------|---------------------|--|--|--|--|----------------|
| LWL                    | 21.68               |  |  |  |  | m              |
| Breadth                | 6.97                |  |  |  |  | m              |
| Draft (F)              | 2.80                |  |  |  |  | m              |
| Draft (A)              | 2.80                |  |  |  |  | m              |
| Displacement           | 265.13              |  |  |  |  | t              |
| LCB                    | -7.51               |  |  |  |  | %              |
| CWP                    | 0.83                |  |  |  |  |                |
| CM                     | 0.87                |  |  |  |  |                |
| Form Factor            | 1.30                |  |  |  |  |                |
| Wetted Hull Area       | 219.33              |  |  |  |  | m <sup>2</sup> |
| Wetted Appendage Area  | 0.00                |  |  |  |  | m <sup>2</sup> |
| Wetted Transom Area    | 0.00                |  |  |  |  | m <sup>2</sup> |
| Transom Width          | 0.00                |  |  |  |  | m              |
| Half Angle of Entrance | 18.92               |  |  |  |  | deg            |
| Half Angle of Run      | 4.00                |  |  |  |  | deg            |
| Angle at 1/4 Buttock   | 0.00                |  |  |  |  | deg            |
| Bulbous Bow?           | NO                  |  |  |  |  |                |
| Transverse Bulb Area   | 0.00                |  |  |  |  | m <sup>2</sup> |
| Bulb Centroid Location | 0.00                |  |  |  |  | m              |
| Body Type (F)          | V                   |  |  |  |  |                |
| Body Type (A)          | U                   |  |  |  |  |                |
| Service Margin         | 0.00                |  |  |  |  | %              |
| Appendage Allowance    | 0.00                |  |  |  |  | %              |
| Appendage Form Factor  | 0.00                |  |  |  |  |                |
| CB                     | 0.61                |  |  |  |  |                |
| CP                     | 0.70                |  |  |  |  |                |

Project Name (required)

20 pav. Laivo korpuso geometrinės ir hidrostatinės charakteristikos programoje „Autopower“.

„Autopower“ programoje parenkamas FAO metodas, skirtas mažųjų žvejybinių tralerių vandens pasipriešinimui įvertinti. Užduodamas greitis intervale nuo 0 mazgų iki 13 mazgų. 10.50 mazgų greitis yra laivo greitis laisvuju režimu. Intervalas nuo 0 mazgų iki 6 mazgų bus vertinamas kaip laivo darbas tralavimo režime.

**A Resistance**

Methods - Displacement Hulls

☐ Andersen/Guldhammer ☐ Funn

☐ van Oortmerssen ☐ Holtrop

☐ Diaernes and Cheno ☐ Calisal

☐ Jin, Su and Tan ☒ FAO IUNI

Calculate

Options...

Speeds...

Cancel

Browse Methods

FAO

Project : 1 Tipas 1 variantas

Limits

FN : 0.00 - 0.46 FN Limit 0.36

CB : 0.61

CP : 0.70 CP 0.55 - 0.70

CM : 0.87 CM 0.53 - 0.93

B/T : 2.49 B/T 2.00 - 4.50

L/B : 3.11 L/B 3.10 - 5.60

L/D : 3.40

IE 15.00 - 37.00

Small fishing vessels

**B Speeds**

Speed Range (kn)

Lower: 0.00

Upper: 13.00

Interval: 0.50

Service: 10.50

OK

Cancel

21 pav. A - skaičiavimo metodo parinkimas, B – laivo greičio uždavimas programoje.

## 6.2 Vandens pasipriešinimo įvertinimas likusio pasipriešinimo metodu

Vandens pasipriešinimo įvertinimui skirta programa likusio pasipriešinimo metodu sudaryta Klaipėdos universiteto Laivo įžinerijos katedroje programos veikimo matematinis modelis pagrįstas



Jerošino arba Krylov State Research skaičiavimo metodu. Norint įvertinti vandens pasipriešinimą, reikia parinkti mažų žvejbinių tralerių seriją ir sudaryti *txt.* formato failą ten nustatyta eilės tvarka surašant tiriamo laivo korpuso geometrines ir hidrostazines charakteristikas:

- 1) Laivo pavadinimas; 2) Laivo ilgis  $L$ , m; 3) Laivo plotis  $B$ , m; 4) Laivo grimzlė  $d$ , m; (arba  $T$ ), 5) Midelšpanhauto pilnumo koeficientas  $\beta$  (arba  $C_M$ ); 6) Vandentalpos pilnumo koeficientas  $\delta$  (arba  $C_B$ ); 7) Vandentalpos centro abscisė  $x_c$  (arba  $LCB$ ).

Užpildytas *txt.* formato failas pateikiamas 22 pav.

```
1 Tipas 1 Variantas
21.68
6.97
2.80
0.87
0.61
1.60
```

22 pav. Laivo korpuso duomenys vandens pasipriešinimo vertinimui likusio pasipriešinimo metodu.

### 6.3 Žvejbinių tralerių korpuso tyrimo eksperimento sudarymas programa „Flow 3D“

Daugumos SSD programų veikimo principas yra pagrįstas skirtingais matematiniais modeliais, todėl gauti rezultatai ir jų tikslumas priklauso nuo to, kokia SSD programa yra naudojama. Žvejbinių tralerių korpusų tyrimui naudosime skaičiuojamąją skysčių dinamikos programą „Flow 3D“. Ši programa suteikia galimybę be kitų papildomų programų sudaryti eksperimentą ir apdoroti gautus rezultatus. Laisvojo paviršiaus stebėjimui eksperimento metu yra naudojamas TruVOF algoritmas. Vizualus skaičiavimų metu gautų rezultatų pateikimas suteikia galimybę aiškiai suprasti eksperimento metu vykstačių fizikinių procesų eigą norimu laiko momentu. Tinklelis, kuris sudarys eksperimento simuliacinę erdvę, sudaromas pusiau automatiškai.

Vienas iš pagrindinių kriterijų, turinčių tiesioginę įtaką gautų rezultatų tikslumui - teisingas eksperimento sudarymas.

Eksperimento sudarymas žvejbinių tralerių korpuso tyrimui „Flow 3D“ programoje:

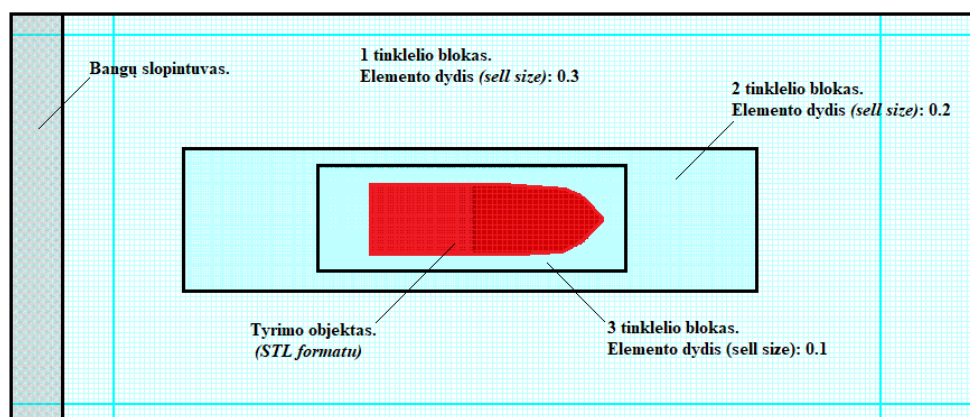
1. Sukuriamas „Flow 3D“ programos apdorojamas geometrinis failas STL formatu. Failų formatų eksportavimo eiga: „Delft Ship“ → „Flow 3D“ STL.
2. Sukuriame tris tinklėlio blokus (*Mesh block 1, mesh block 2 ir mesh block 3*). Tinklėlio blokai - simuliacinė skysčio srauto erdvė, kurioje bus patalpintos žvejbinių tralerių korpusų geometrijos STL formatu. Tinklėlio blokų geometrinį dydį parenkame tokį, kad

būtų atkartojamos kuo realesnės sąlygos eksperimentinėje erdvėje ir per mažos tinklelio blokų ribos neturėtų įtakos skaičiavimų rezultatams.

3. Kiekvienam tinkleliui nustatome atskirus parametrus, nuo kurių priklausys skaičiavimų rezultatų tikslumas ir patikimumas: 1. *Mesh block 1* - *Size of Sells* = 0.3;

2. *Mesh block 2* - *Size of Sells* = 0.2;

3. *Mesh block 3* - *Size of Sells* = 0.1;



23 pav. Tinklelių blokų išdėstymas programoje „Flow 3D“.

4. Užduodamas skysčio srauto greitis intervale 0m/s iki 6,68m/s (0 mazgų - 13 mazgų).
  - *Meshing and Geometry* – *Show mesh window* – *Mesh block 1* – *Boundaries* – *V – X direction*;

- *Show initial window* – *Initial* – *Global* – *Velocities* – *X direction*.

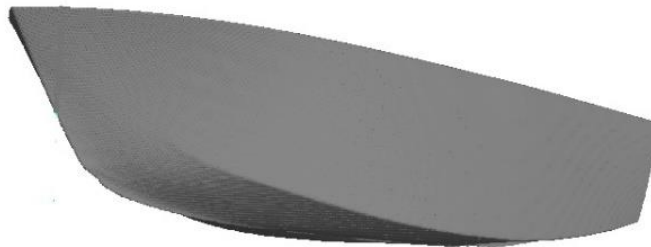
Skaitinės vandens srauto reikšmės įrašomos su minuso ženklu, taip nurodant teisingą srauto kryptį laivo korpuso atžvilgiu. Vandens srautas tekės x ašies atžvilgiu kryptimi: iš – į +.

5. Užduodamas 5 m skysčio lygis (*Initial fluid elevation*) nulinės koordinatės atžvilgiu.
6. Programoje užduodami fizikos dėsniai „*Physics*“, kurie būdingi atliekamo eksperimento specifikai:

- „*Gravity and non-inertial reference frame*“– simuliacijos procese bus įvertinamas laivo korpuso judėjimas z ašimi, laisvojo kritimo pageitis  $9,81 \text{ m/s}^2$ .
- „*Moving and simple deforming objects*“– įvertinamas geometrijos judėjimas ir skysčio slėgio veikimas į jį.
- „*Viscosity and turbulence*“– simuliacijos metu bus įvertintas pasirinkto skysčio klampumas.

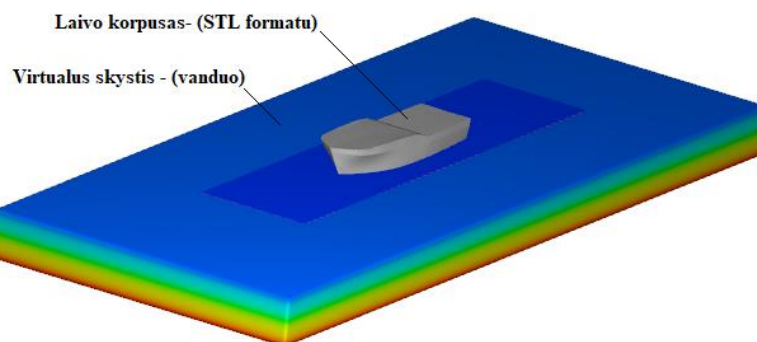
7. Nustatomi pagrindiniai eksperimento parametrai „*General*“:

- Virtualią eksperimento trukmę (*Finish time*) – 60 s. Atliekant tolimesnius skaičiavimus eksperimento trukmę bus galima koreguoti atsižvelgiant į skysčio srauto nusistovėjimą.
  - Vienetinį skystį (vanduo 20°C), kuriame bus patalpinta laivo korpuso geometrija - „*One fluid*“.
3. Dydžių matavimo sistema - SI.
  8. Nustatome pradinį laiko žingsnį simuliacijos metu: *Numerics - Initial time step = 0.005*.
  9. Laivo korpuso geometrinės formos tikslumui nustatyti eksperimento metu atliekame aproksimaciją. Aproksimavus laivo korpuso geometriją, galime matyti, ar užduotas tinkelio tankis yra pakankamas ir tiksliai atkuriamos laivo korpuso geometrinės formos.



24 pav. Aproksimuota laivo korpuso geometrija.

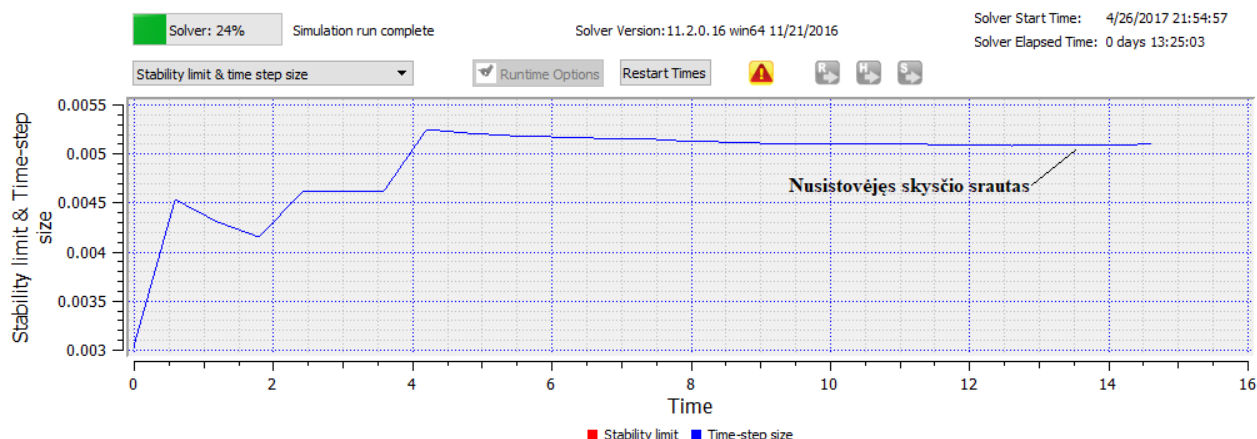
10. Atliekame veiksmų seką simuliacijos sudarymo patikimumui patikrinti: *Simulate - Preprocess Simulation*. Pagal parinktus eksperimento nustatymus programa automatiškai patikrina ar teisingai sudarytas atliekamas eksperimentas.
11. Atliekama veiksmų seką vizualiam simuliacijos vaizdui pamatyti: *Analyze – Render*. Vizuali atliekamos simuliacijos erdvė pateikiama 25 pav.



25 pav. Eksperimento vizualinė erdvė programoje „*Flow 3D*“.

12. Simuliacijai pradėti atliekama veiksmų seka: *Simulate – Run Simulation*.

Prasidėjus simuliacijai į laivo korpusą nustatytu greičiu paleidžiamas skysčio srautas. Proceso metu aptekančio skysčio srauto tėkmė apie laivo korpusą turi nusistovėti, kad būtų įvertinta stabili vandens pasipriešinimo laivo korpusui skaitinė reikšmė užduotoms skirtingoms bandymo sąlygoms. Vandens pasipriešinimo stabilizavimąsi galime stebėti grafine išraiška pagrindiniame „*Flow 3D*“ programos lange.



26 pav. Skysčio srauto tėkmės nusistovėjimo indentifikavimas.

Atlikus vandens pasipriešinimo skaičiavimus skirtingais metodais 1 tipo 1 varianto laivo korpusui matome, kad ne visi skaičiavimo metodai pateikia patikimus skaičiavimo rezultatus. FAO metodas skaičiavimo rezultatus pateikė tik greičiui iki 10 mazgų. Rezultatai neapima laivo laisvosios eigos režimo 10.5 mazgų. Didesniems greičiams šis metodas skaičiavimų rezultatų nepateikia.

„*Flow 3D*“ ir likusio pasipriešinimo metodai pateikė patikimiausius skaičiavimo rezultatus, kadangi šių rezultatų skaitinės reikšmės yra artimiausios modelinių bandymų rezultatams, kurie priimami kaip atskaitos taškas.

Holtropo metodo pateikti rezultatai ženkliai skiriasi nuo modelinių bandymo rezultatų, šis metodas rezultatus pateikė iki 12.5 mazgų greičio. Skirtingų metodų vandens pasipriešinimo rezultatų skaitinės reikšmės pateikiamos 6 lentelėje.

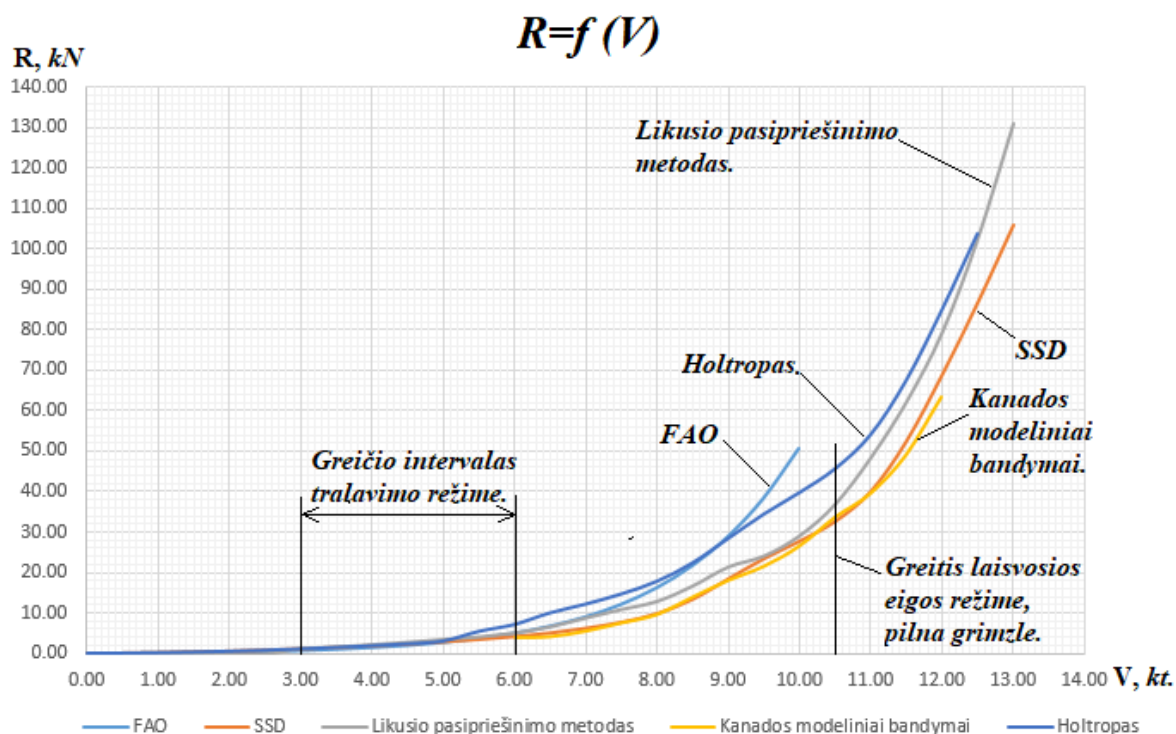
6 lentelė. Vandens pasipriešinimo rezultatai gauti skirtingais metodais.

| <b>Greitis, kt</b> | <b>FAO</b> | <b>„Flow 3D“</b> | <b>Likusio pasipriešinimo</b> | <b>Modeliniai bandymai</b> | <b>Holtropas</b> |
|--------------------|------------|------------------|-------------------------------|----------------------------|------------------|
| 0                  | 0.00       | 0.00             | 0.00                          | -                          | 0.00             |
| 0.50               | 0.01       | 0.04             | 0.01                          | -                          | 0.04             |
| 1.00               | 0.06       | 0.14             | 0.03                          | -                          | 0.14             |
| 1.50               | 0.13       | 0.30             | 0.10                          | -                          | 0.30             |
| 2.00               | 0.25       | 0.50             | 0.18                          | -                          | 0.50             |
| 2.50               | 0.42       | 0.77             | 0.38                          | -                          | 0.77             |

|       |       |        |        |       |        |
|-------|-------|--------|--------|-------|--------|
| 3.00  | 0.65  | 1.08   | 1.30   | -     | 1.08   |
| 3.50  | 0.97  | 1.44   | 1.70   | -     | 1.44   |
| 4.00  | 1.39  | 1.84   | 2.30   | -     | 1.84   |
| 4.50  | 1.94  | 2.30   | 2.90   | -     | 2.30   |
| 5.00  | 2.67  | 2.82   | 3.60   | -     | 3.00   |
| 5.50  | 3.65  | 3.41   | 4.20   | -     | 5.41   |
| 6.00  | 4.95  | 4.11   | 5.20   | 3.80  | 7.11   |
| 6.50  | 6.69  | 4.99   | 6.70   | 4.0   | 9.99   |
| 7.00  | 9.00  | 6.16   | 8.90   | 5.40  | 12.16  |
| 7.50  | 12.09 | 7.66   | 11.00  | 7.40  | 14.66  |
| 8.00  | 16.21 | 9.79   | 13.00  | 9.50  | 17.79  |
| 8.50  | 21.67 | 13.36  | 16.80  | 13.80 | 22.36  |
| 9.00  | 28.89 | 18.40  | 21.50  | 17.90 | 28.40  |
| 9.50  | 38.38 | 23.42  | 24.20  | 21.40 | 34.42  |
| 10.00 | 50.79 | 27.75  | 29.20  | 26.40 | 39.75  |
| 10.50 | -     | 32.66  | 37.00  | 33.50 | 45.66  |
| 11.00 | -     | 40.09  | 48.50  | 39.40 | 54.09  |
| 11.50 | -     | 52.56  | 62.30  | 48.90 | 67.56  |
| 12.00 | -     | 68.97  | 79.40  | 63.30 | 84.97  |
| 12.50 | -     | 86.86  | 102.60 | -     | 103.86 |
| 13.00 | -     | 106.04 | 131.00 | -     | -      |

Tralavimo režimas

Laisvosios eigos režimas



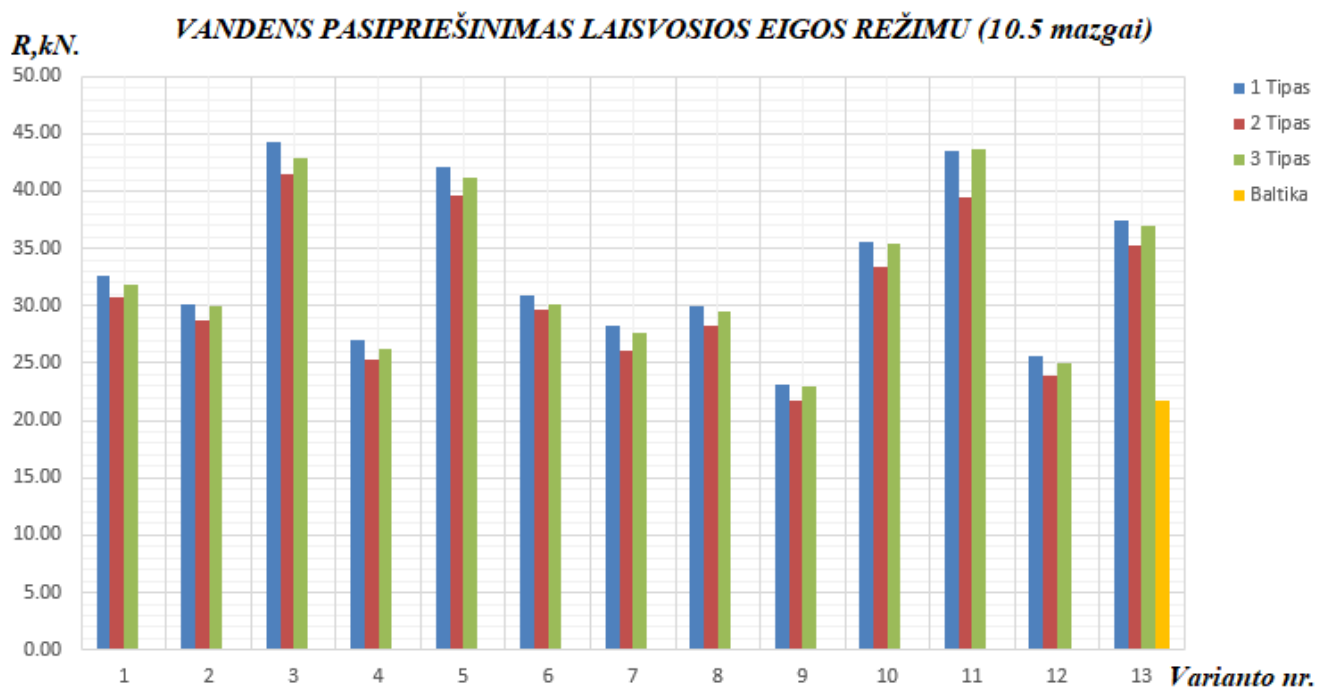
27 pav. Vandens pasipriešinimo priklausomybės nuo greičio grafikas.

Remiantis gautais vandens pasipriešinimo įvertinimo skaičiavimų rezultatais, kitų 38 žvejybinių tralerių skaičiavimams naudosime skaičiuojamąją skysčio dinamikos programą „Flow 3D“. SSD metodu gauti rezultatai armimiausi laivų modelinių bandymų rezultatams.

Likusio pasipriešinimo metodo rezultatai taip pat nėra ženkliai nutolę nuo modelinių bandymų rezultatų. Šiuo metodu skaičiuojant vandens pasipriešinimą laivo korpuso judėjimui reikalingos mažos laiko ir kompiuterinės technikos resursų sąnaudos. Likusio pasipriešinimo metodas tinkamas pakankamai tiksliai įvertinti preliminarų vandens pasipriešinimą laivo korpuso judėjimui.

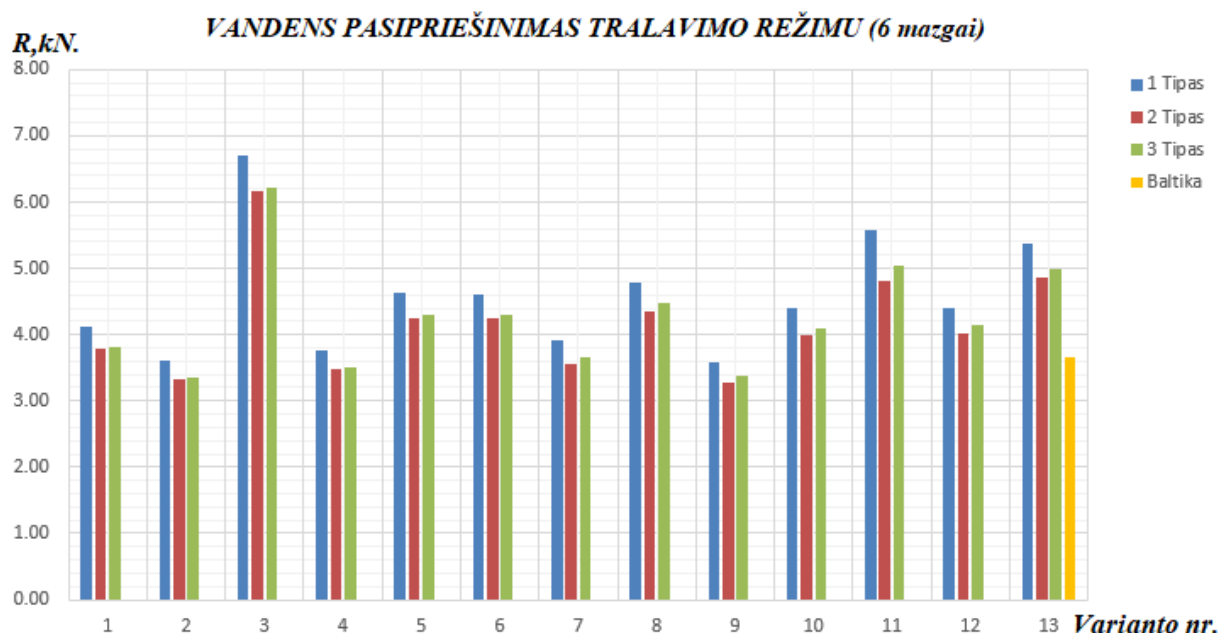
## VII. VANDENS PASIPRIEŠINIMO REZULTATŲ ANALIZĖ

Atlikus vandens pasipriešinimo skaičiavimus „Flow 3D“ programa, visiems 39 mažųjų žvejybinių tralerių korpusams buvo gauti rezultatai, kurie pateikiami baigiamojo darbo prieduose (2 tome). Grafinė išraiška vandens pasipriešinimo rezultatai visų 3 tipų ir 13 variantų laivams pateikiama 27 pav. Remiantis gautais vandens pasipriešinimo rezultatais galime teigti, kad antro tipo laivai (su dvigubu borto perėjimu į laivo dugną) tiek laisvosios eigos, tiek tralavimo režime patiria mažiausią vandens pasipriešinimą.



28 pav. Vandens pasipriešinimas laisvosios eigos režimu (10.5 mazgai).

Žvejybinių tralerių vandens pasipriešinimo tralavimo režimu palyginimas grafine išraiška pateikiamas 29 pav.



29 pav. Vandens pasipriešinimas tralavimo režimu (6.0 mazgai).

Remiantis gautais vandens pasipriešinimo duomenimis toliau analizuosime 2 tipo laivus su dvigubo borto perėjimu į dugną. Kitame laivo korpusų eigumo tyrimų etape 2 tipo mažųjų žvejybinių tralerių korpusams bus modeliuojama laivapriekinė bulba ir perskaičiuojamas vandens pasipriešinimas naudojant SSD programą „Flow 3D“.

## 7.1 LAIVO BRIAUNOS ĮTAKA VANDENS PASIPRIEŠINIMUI

Vandens pasipriešinimas laivo korpuso judėjimui buvo skaičiuojamas 3 skirtingų tipų borto perėjimo į laivo dugną tipams: perėjimas su aštria briauna, dvigubu perėjimu ir sklandžiu perėjimu. Laivo borto perėjimo į dugną modifikacijos pateikiamos 1 pav. Tiriama laivo korpusai kiekvienu atveju turėjo vienodas geometrines charakteristikas (žr. 5 lentelė) ir skirtingus borto perėjimo tipus. Remiantis „Delftship“ programos skaičiavimo duomenimis buvo atliktas laivų suvilgyto paviršiaus ploto palyginimas. Suvilgyto laivo paviršiaus ploto skaitinės reikšmės yra pateikiamos baigiamojo darbo antroje dalyje (2 tomas).

Palyginus žvejybinių tralerių suvilgyto paviršiaus plotus galime teigti, kad 2 tipo laivai su dvigubu borto perėjimu į laivo dugną turi mažesnę plotą, nei 1 tipo laivai su aštrios briaunos

perėjimu ir 3 tipo laivai su sklandžiu borto perėjimu. Mažesnis suvilgyto paviršiaus plotas turi teigiamos įtakos mažinant vandens pasipriešinimą laivo judėjimui.

$$R = (C_{FO} + C_R + C_A + C_{AP}) \frac{\rho v^2}{2} \Omega, \quad (10)$$

$R$  – visas pasipriešinimas,  $kN$ ;

$C_{FO}$  – technškai lygios plokštės trinties pasipriešinimo koeficientas;

$C_R$  – likusio pasipriešinimo koeficientas;

$C_A$  – koeficientas, įvertinantis laivo korpuso pavirčiaus šiurkštumą;

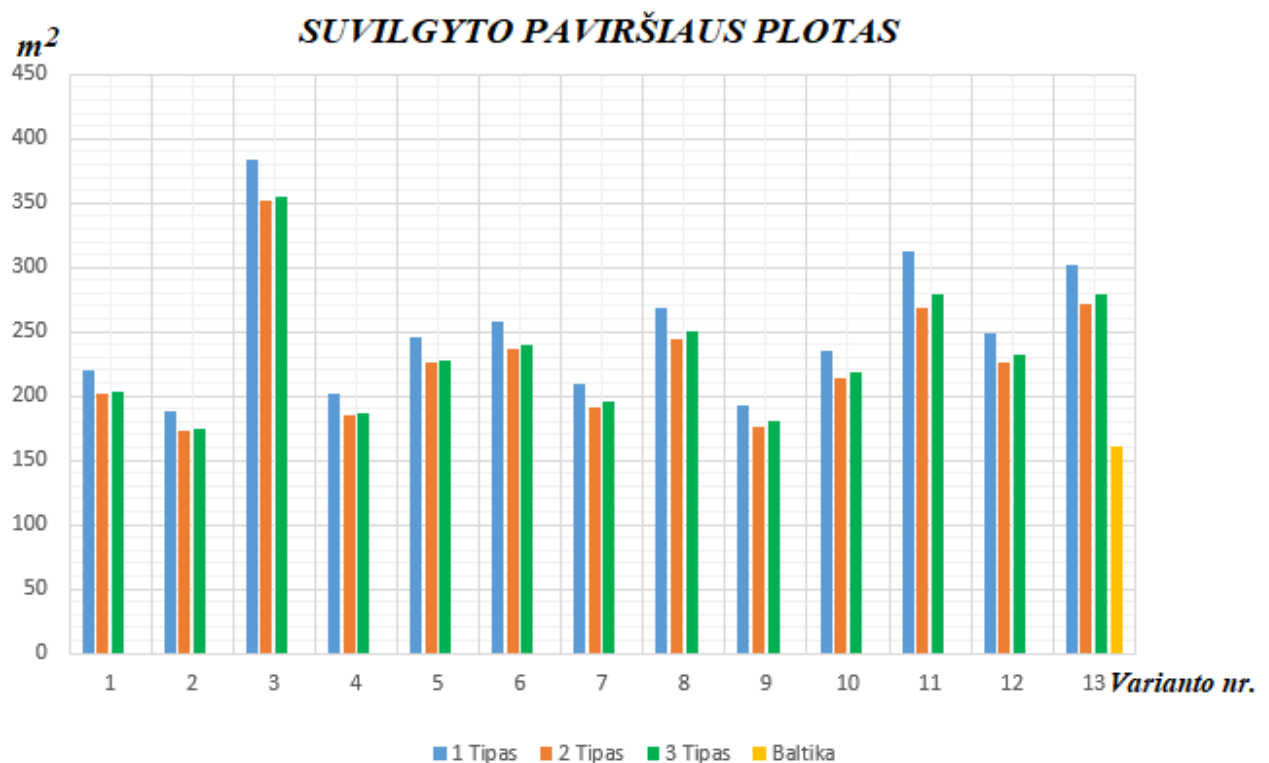
$C_{AP}$  – išsikišančių detalių pasipriešinimo koeficientas;

$\rho$  – vandens masės tankis,  $t/m^3$ ;

$v$  – laivo greitis,  $m/s$ ;

$\Omega$  – laivo suvilgyto paviršiaus plotas,  $m^2$ .

Žvejybinių tralerių suvilgyto paviršiaus plotų palyginimas grafine išraiška pateikiamas 30 pav.

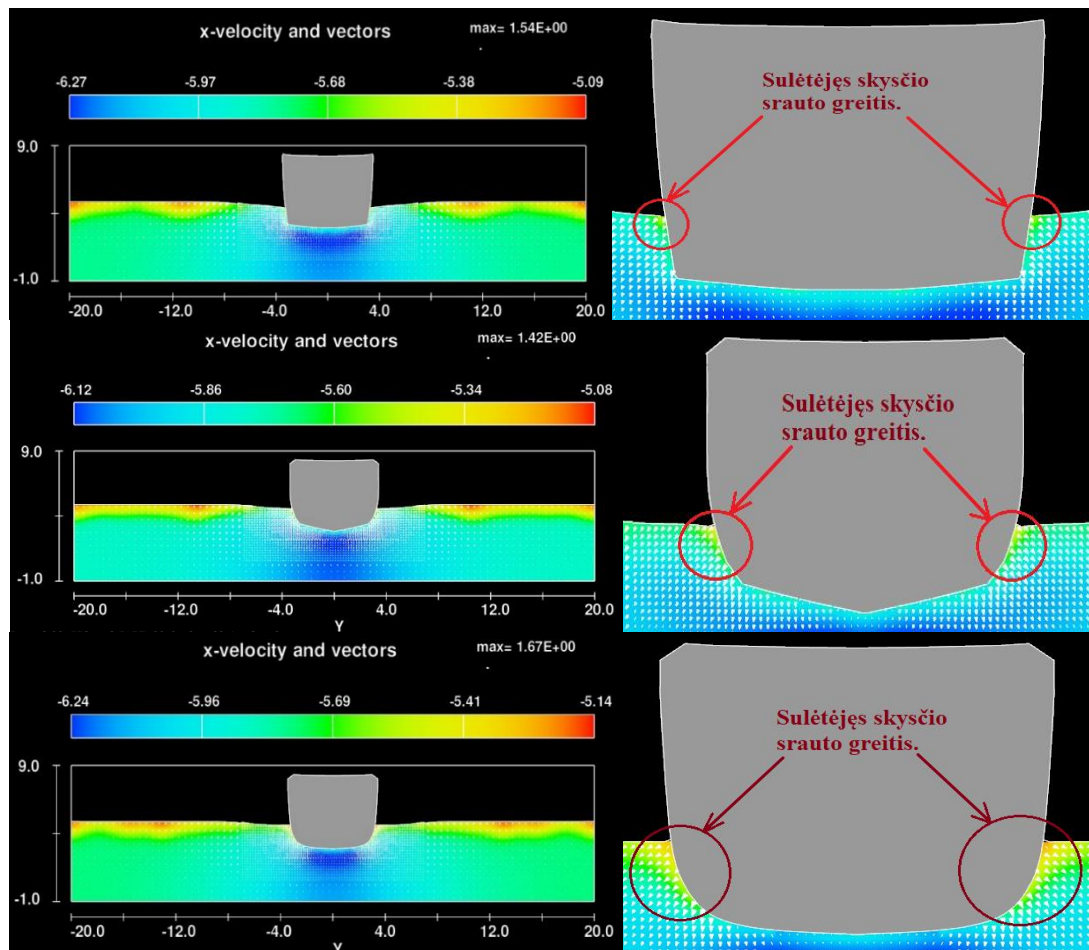


30 pav. Žvejybinių tralerių suvilgyto paviršiaus plotų palyginimas.

Atlikus vandens pasipriešinimo skaičiavimus programa „Flow 3D“, turime galimybę eksperimento metu gautus fizikinių procesų įvykių eigą norimu laiko momentų stebėti programos lange. Dvimatėse projekcijose 31 pav. pateikiamas skysčio srauto greičio vizualinė išraiška 14-ąją



eksperimento sekundę, kai skysčio srauto tėkmė yra nusistovėjusi. Pastebima, kad 3 tipo laivo sklendaus borto perėjimo rajone skysčio srauto greitis per visą juostos plotą yra sulėtėjęs. Tai turi įtakos padidėjusiam vandens sėgiui apie laivo korpusą. Padidėjęs vandens slėgis turi neigiamą įtaką vandens pasipriešinimo mažinimui.



31 pav. Skysčio srauto greičio pasiskirstymas briaunos rajone.

Norint atlikti detalesnę susidariusių srautų ir fizikinių procesų apie laivo borto perėjimą į dugną analizę, programoje „Flow 3D“ reikia modeliuoti eksperimentą su didesnio tikslumo tinklelio bloku apie tiriamą laivo korpuso rajoną. Šiems reikškimians ištirti gali būti atliekamas atskiras tyrimas.

## VIII. LAIVAPRIEKINIO BULBO ĮTAKA LAIVO EIGUMUI

### 8.1 Laivapriekio bulbo įtakos tyrimas

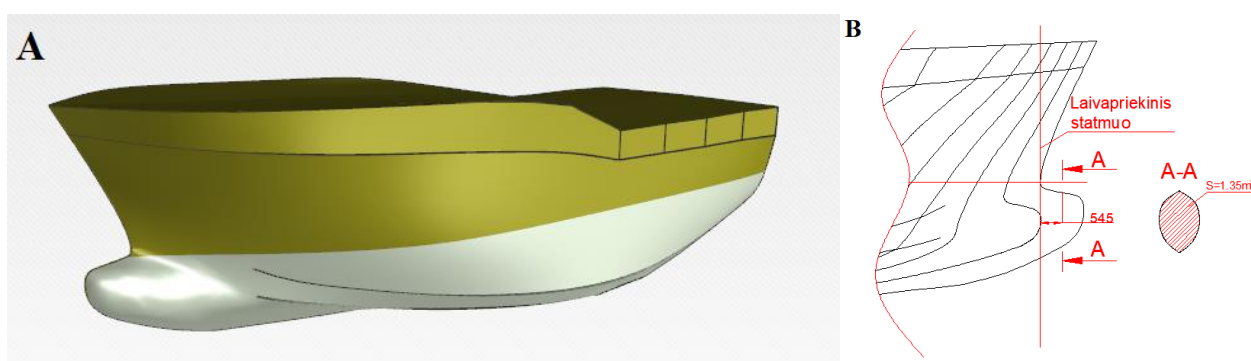
Šio skyriaus tikslas remiantis Kanados mokslininkų pateiktu teoriniu brėžiniu sumodeliuoti 2 tipo mažųjų žvejybinių tralerių korpusams laivapriekius bulbus ir įvertinti laivapriekinio bulbo įtaką vandens pasipriešinimui laivo korpuso judėjimui.

Laivapriekinių bulbų modeliavimas buvo atliktas pagal 5.2 skyriuje pateiktą metodiką. Vandens pasipriešinimo įvertinimo eksperimentui buvo naugojama SSD programa „Flow 3D“. Eksperimento sudarymo metodika pateikiama 6.3 skyriuje.

Atlikus laivapriekinio bulbo modeliavimą 2 tipo 1 varianto laivo korpusui, kitiems skirtingas geometrines charakteristikas turintiems žvejybiniams traleriams buvo modeliuojamas toks pat bulbas tik pakeičiant mastelį atsižvelgiant į 2 tipo 1 varianto laivo geometriinių charakteristikų santykį su laivu, kuriam modeliuojamas laivapriekinis bulbas. Pagrindiniai laivapriekinio bulbo geometrijos duomenys:

1. Bulbo centro atstumas nuo laivapriekinio statmens  $L=545\text{mm}$ .
2. Bulbo centro skerspjūvio plotas  $S=1.35\text{m}^2$ .

Keičiant bulbo mastelį, atsižvelgiant į modeliuojamo laivo geometrines charakteristikas, bulbo pagrindiniai matmenys taip pat keisis. Keičiant bulbo mastelį pagal modeliuojamo laivo dydį bus išlaikyta nepakitusi bulbos įtaka vandens pasipriešinimui laivo korpuso judėjimui. Laivapriekinio bulbo 3D modelis ir pagrindinės geometrinės charakteristikos pateikiamos 32 pav.

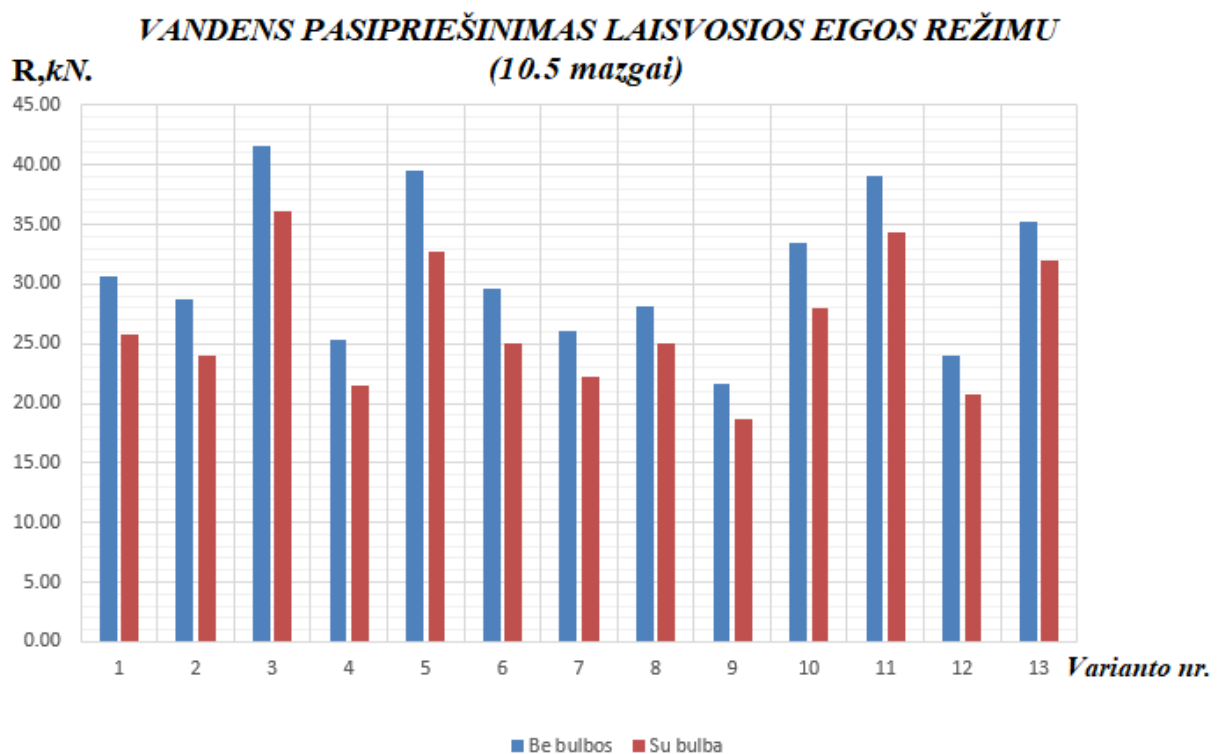


32 pav. A-laivo korpusas su laivapriekiniu bulbu; B- laivapriekinio bulbo pagrindiniai matmenys.

Visų 2 tipo žvejybinių tralerių teoriniai brėžiniai su laivapriekiniu bulbu pateikiami baigiamojo darbo 2 dalyje (2 tomas).

## 8.2 Bulbo įtakos vandens pasipriešinimui tyrimo rezultatų analizė

Remiantis 6.3 skyriuje sudaryta vandens pasipriešinimo skaičiavimo metodika naudojant SSD programą „Flow 3D“ buvo perskaičiuotas vandens pasipriešinimas laivo korpuso judėjimui 2 tipo visų 13 variantų laivų korpusams su laivaprieikiniu bulbu. Visų korpusų teoriniai brėžiniai ir vandens pasipriešinimo rezultatai pateikiami baigiamojo darbo 2 dalyje (2 tomas). Vandens pasipriešinimo rezultatų palyginimas laivui plaukiant pilna grimzle laisvosios eigos režimu kai laivo korpusas su laivaprieikiniu bulbu ir be jo pateikiamas 33 pav.

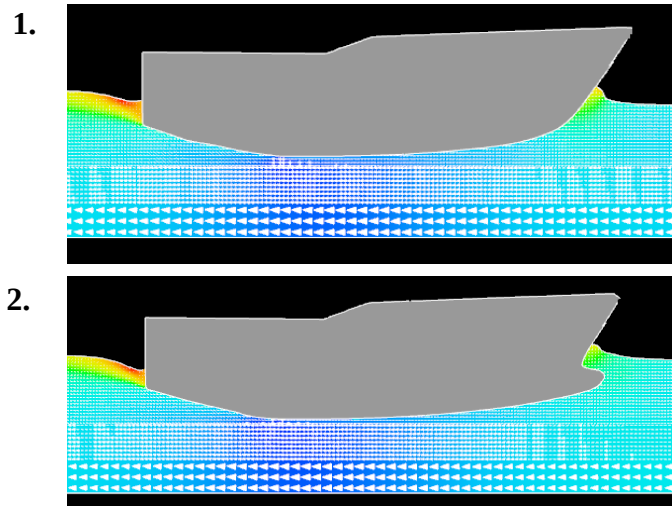


33 pav. Vandens pasipriešinimas laisvosios eigos režimu (10.5 mazgai).

Remiantis gautais skaičiavimų rezultatais galime teigti, kad visais atvejais laivaprieikinis bulbas padarė teigiamą įtaką mažinant vandens pasipriešinimą. Didžiausią teigiamą įtaką laivaprieikinis bulbas turi 5 varianto laivo korpusui, kadangi vandens pasipriešinimas buvo sumažintas 6.88 kN. Mažiausia teigiama įtaka - 8 varianto laivo korpusui, kadangi vandens pasipriešinimas buvo sumažintas 3.09 kN.

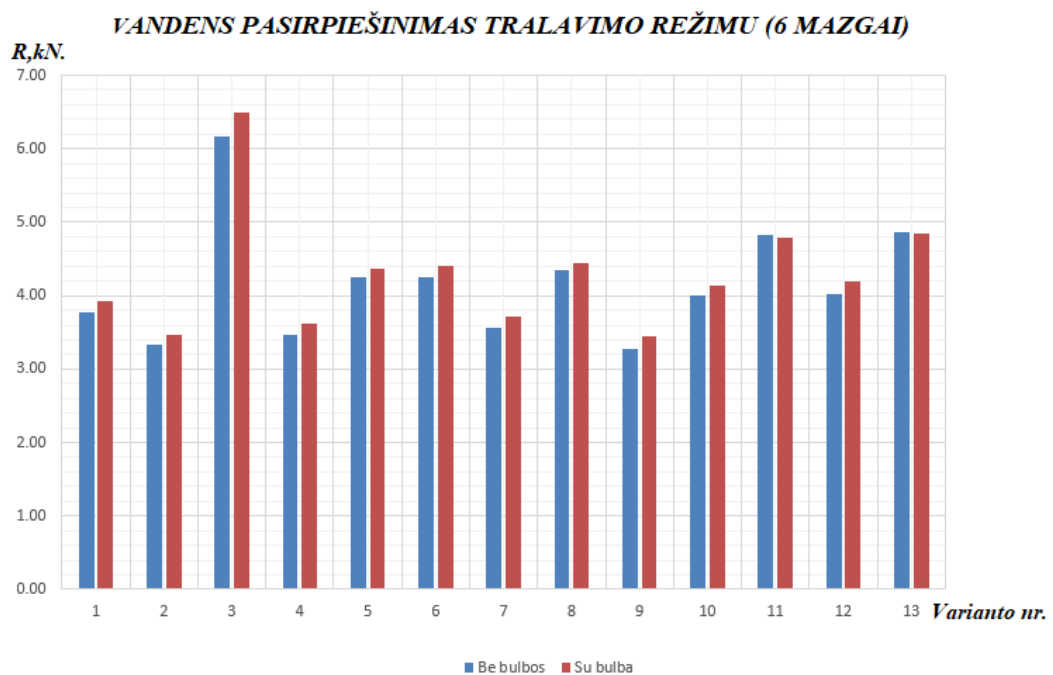
Laivui plaukiant tralavimo režimu, tik 11 ir 13 laivų korpusams laivaprieikinis bulbas padarė teigiamą įtaką vandens pasipriešinimo mažinimui. Vandens pasipriešinimas buvo sumažintas 11 variantui – 0.03 kN, 13 variantui – 0.02 kN. Visais kitais atvejais laivaprieikinis bulbas padidino

vandens pasipriešinimą laivo korpuso judėjimui. 33 pateikiamas vizualus skysčio srauto greičio pasiskirstymas laivapriekio rajone. Laivapriekyje su bulbu (1) matoma mažesnė skysčio srauto sulėtėjimo koncentracija. Laivapriekyje be laivapiekinio bulbo (2) skysčio srauto sulėtėjimo koncentracija yra didesnė. Sumažėjęs srauto greitis turi neigiamos įtakos vandens pasipriešinimo mažinimui.



34 pav. Skysčio srauto greitis laivapriekio rajone. 1 - su bulbu, 2 – be bulbo.

Vandens pasipriešinimo rezultatų palyginimas su laivaprieikiniu bulbu ir be jo laivui plaukiant tralavimo režime pateikiama 35 pav.



35 pav. Vandens pasipriešinimas tralavimo režimu (6 mazgai).

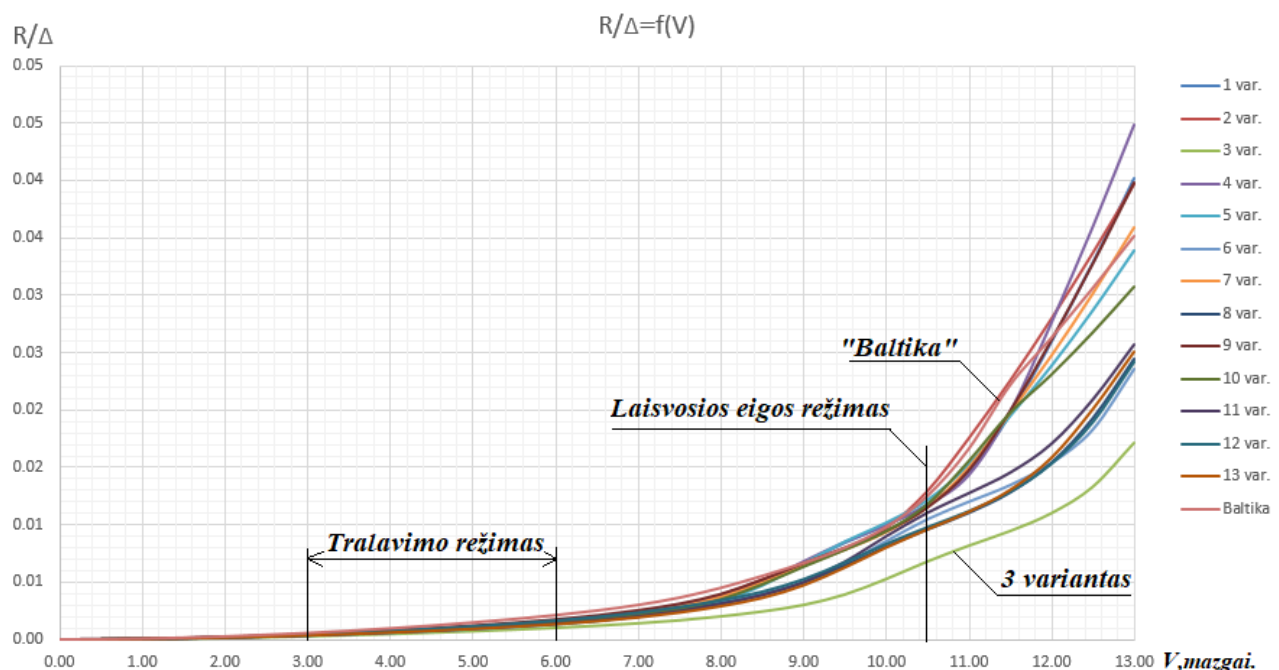
Negalima atmesti galimybės, kad laivapriekinis bulbas gali turėti teigiamos įtakos tiek tralavimo, tiek laisvosios eigos režime. Tęsiant tyrimą reikėtų analizuoti įvairių modifikacijų laivapriekinius bulbus, ieškant geriausio bulbo formos, kuri turėtų didžiausią naudingumo koeficientą laivui plaukiant tiek tralavimo, tiek laisvosios eigos režimu.

Norint įvertinti vandens pasipriešinimą laivo korpuso judėjimui nepriklausant nuo laivo dydžio, vandens pasipriešinimą reikia išreikšti santykiniu bedimensiu dydžiu. 36 pav. pateikiamas 2 tipų visų 13 variantų laivų vandens pasipriešinimo palyginimas santykiu  $R/\Delta=f(V)$ .

$R$  – vandens pasipriešinimas  $kN$ ;

$\Delta$  – laivo svorinė vandentalpa,  $kN$ ;

$V$  – laivo greitis, *mazgai*.



36 pav. Santykinis vandens pasipriešinimo palyginimas.

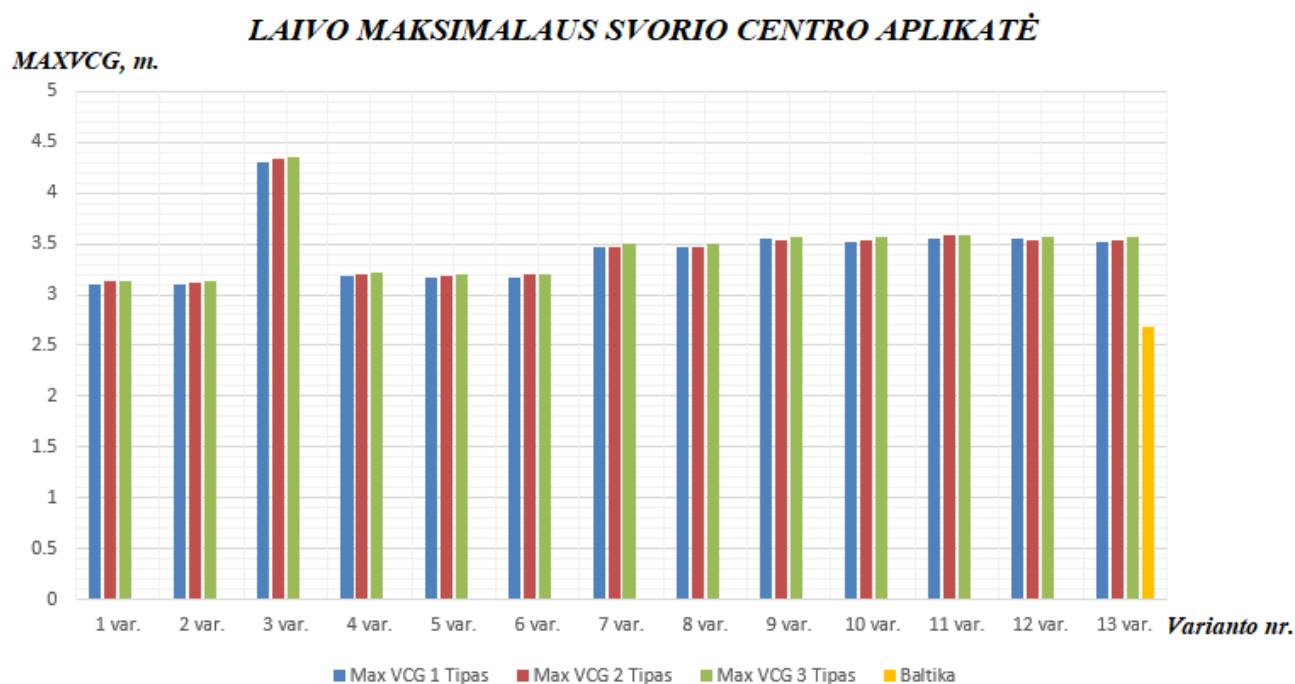
Remiantis gautais rezultatais matome, kad 2 tipo 3 varianto laivo korpusas turintis sau būdingas geometrines charakteristikas (žr. 5 lentelė) nepriklausomai nuo laivo dydžio, lyginant su kitais 2 tipo tralerių korpusais, patiria mažiausią vandens pasipriešinimą.

## IX. LAIVO KORPUSO GEOMETRINIŲ IR HIDROSTATINIŲ CHARAKTERISTIKŲ PALYGINIMAS

### 9.1 Maksimalios svorio centro aplikatės palyginimas

Maksimali laivo svorio centro aplikatė MAX VCG nurodo maksimalią laivo svorio centro padėtį vertikalios ašies atžvilgiu. Svorio centrui pakilus aukščiau maksimalios ribos ( neteisingai pakrovus krovinių į laivą ), laivas gali prarasti stovumą ir pasvirti arba apsisiversti.

Tiriamų žvejybinių tralerių maksimalios svorio centro aplikatės nustatymui naudota skaičiuojamoji programa „*Autohydro*“. Skaičiavimams reikalingas laivo korpuso 3D modelio failas GF. formatu. Visų tiriamų laivo korpusų MAX VCG skaičiavimų rezultatai pateikiami baigiamojo darbo 2 dalyje (2 tomas). MAX VCG gautų rezultatų palyginimas pateikiamas 37 pav.

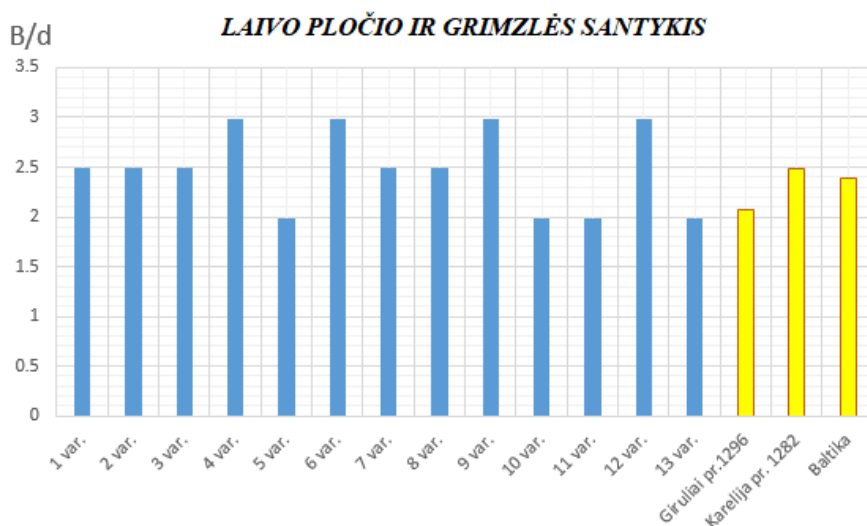


37 pav. MAX VCG skaičiavimo rezultatų palyginimas.

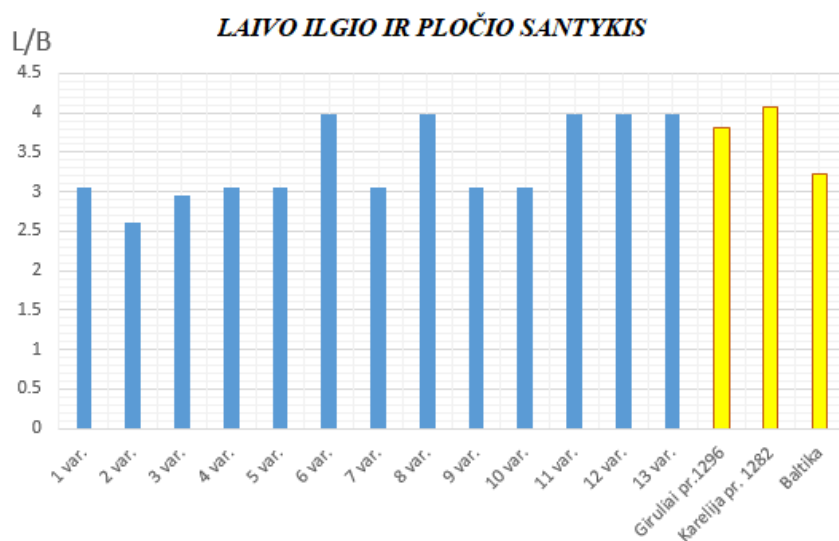
Remiantis maksimalios svorio centro aplikatės skaičiavimo duomenimis galime teigti, kad 3 varianto laivų maksimalios svorio centro aplikatės skaitinė reikšmė didžiausia. Šiomis dienomis Klaipėdos uoste eksploatuojamų laivų „Baltika“ maksimalaus svorio centro aplikatės skaitinė reikšmė mažiausia.

## 9.2 Žvejbinių tralerių santykinų matmenų palyginimas

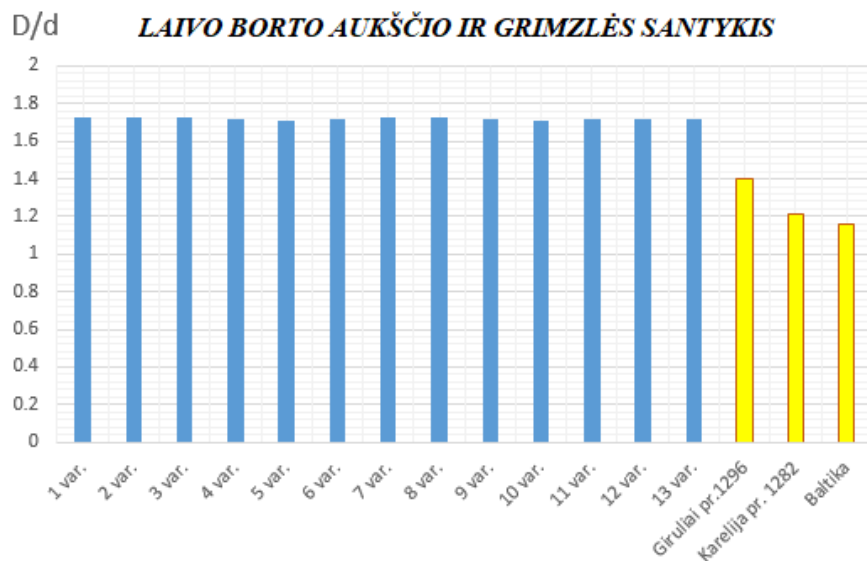
Atlikus Kanados mokslininkų ir Tarybų Sąjungoje suprojektuotų bei Klaipėdos krašte eksploatuotų žveybinių tralerių „Giruliai“, „Karelija“, „Baltika“ santykinės goemetrines charakteristikas B/d, L/B, D/d matome, kad labiausiai išsiskiria santykinis dydis D/d. Galime teigti, kad Tarybų Sąjungoje projektuoti žvejybiniai traleriai buvo žemesnio viršvandeninio borto aukščio lyginant su Kanadoje projektuotais žvejybiniais traleriais. Kiti lyginami santykiniai dydžiai B/d, L/B remiantis laivų geometrinėmis charakteristikomis iš konteksto neišsiskiria. Santykio dydžio B/d palyginimas pateikiamas 38 pav. Santykio dydžio L/B palyginimas pateikiamas 39 pav. Santykio dydžio D/d palyginimas pateikiamas 40 pav.



38 pav. Santykinio dydžio B/d palyginimas.



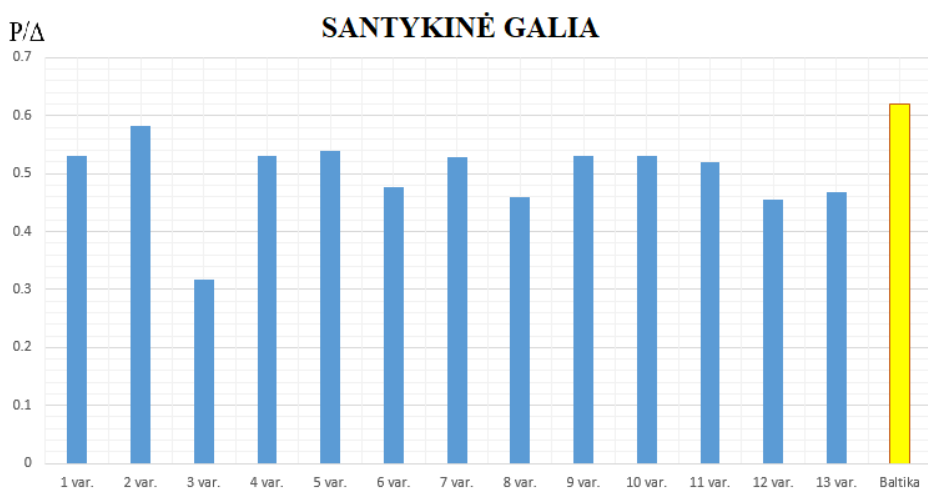
39 pav. Santykinio dydžio L/B palyginimas.



40 pav. Santykinio dydžio D/d palyginimas.

### 9.3 Žvejybinių tralerių santykinės galios palyginimas

Projektuojant laivą yra atsižvelgiama koks energijos kiekis yra sunaudojamas norint laivą eksploatuoti nustatytomis sąlygomis. Kiekvienas laivas turi sau būdingą energetinį aprūpinimą – laive esančių energetinių mašinų pagaminamos energijos suvartojimas. Šis dydis išreiškiamas laivo energetinių mašinų pagamintos energijos suvartojimo santykiu, (kW) su laivo vandentalpa ( $t$ ). Žvejybinių tralerių santykinės galios palyginimas pateikiamas 41 pav.



41 pav. Žvejybinių tralerių santykinės galios palyginimas.

Remiantis gautais palyginimo rezultatais galime teigti, kad didžiausias energetinis aprūpinimas yra reikalingas Tarybų Sąjungoje projektuotam laivui „Baltika“. Tuo laikotarpiu projektuojant laivą

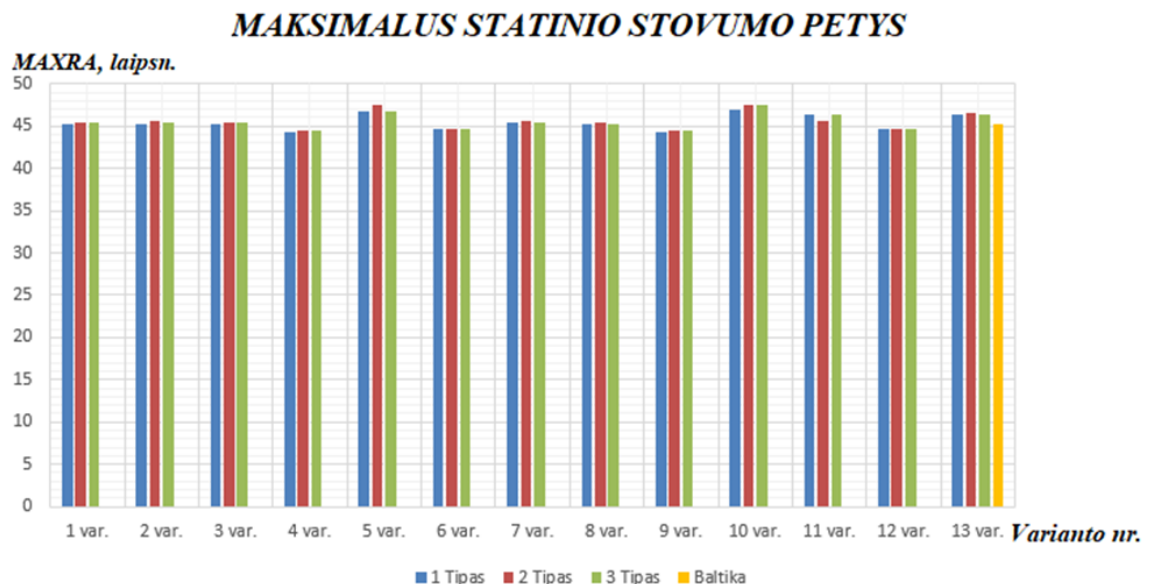


nebuvo atsižvelgiama į laivo energetinį ekonomiškumą, kadangi kuras laivo projektavimo laikotarpiu buvo pakankamai pigus. Mažiausias energetinis aprūpinimas reikalingas 2 tipo 3 varianto Kanados žvejybinio tralerio korpusui.

## X. LAIVO KORPUSO FORMOS ĮTAKA STOVUMUI

### 10.1 Oro sąlygų kriterijaus vertinimas pagal IMO stovumo normas

Pagal turimą laivo statinio stovumo diagramą, kuri buvo sudaryta naudojant skaičiuojamąją programą „*Autohydro*“, įvertintas laivo stovumas, kaip to reikalauja IMO (International Maritime Organization) laivų stovumo normos. „*Autohydro*“ programos stovumo skaičiavimo rezultatų palyginimas pateikiamas 42 pav.



42 pav. Laivo maksimalių statinio stovumo pečių palyginimas.

#### Vėjo krenuojantis momentas ir minimalus apverčiantis momentas:

$\Theta_0$ - vėjo sukeltas statinis krenas;

$\Theta_1$ - bortinio supimosi amplitudė;

$\Theta_2$ - mažesnis iš šių kreno kampų:

- užliejimo kampas  $\Theta_f$ ;
- $50^\circ$ ;
- laivo nestabilios pusiausvyros kampas.

#### Vėjo krenuojančio momento petys $l_{w1}, m$ :

$$l_{w1} = \frac{P \cdot A \cdot Z}{1000 \cdot g \cdot \Delta} \quad (11)$$

$$l_{w2} = 1,5 l_{w1} \quad (12)$$

P- vējo slēgis, 504 Pa;

A- būringumo plotas, m<sup>2</sup>;

Z- vertikālais atstums starp būringuma ploto centru ir grimzlēs vidū, m;

g- brīvo krituma paātrinājums 9.81 m·s<sup>-2</sup>;

Δ- laiva masinē vandentalpa, t.

Būringuma plotas A, m<sup>2</sup>.

$$A = 2.5 \cdot L_{\perp\perp} (D - d) \quad (13)$$

$L_{\perp\perp}$ - laiva ilgums starp statmeniem, m;

D- borta augstums, m;

d- grimzle, m;

$$A = 2.5 \cdot L_{\perp\perp} (D - d) = 2.5 \cdot 27.73 \cdot (5.4 - 3.76) = 113.693.$$

**Vertikālais atstums starp būringuma ploto centru ir grimzlēs vidū Z, m:**

$$Z = 2.5 \cdot (D - d) + \frac{d}{2} \quad (14)$$

D- borta augstums, m;

d- grimzle, m.

$$Z = 2.5 \cdot (D - d) + \frac{d}{2} = 2.5 \cdot (5.4 - 3.76) + \frac{3.76}{2} = 5.98 \text{ m}.$$

$$l_{w1} = \frac{P \cdot A \cdot Z}{1000 \cdot g \cdot \Delta} = \frac{504 \cdot 113.7 \cdot 5.98}{1000 \cdot 9.81 \cdot 613.83} = 0.05 \text{ m} \quad (1 \text{ formulē.})$$

$$l_{w2} = 1.5 l_{w1} = 1.5 \cdot 0.05 = 0.075 \text{ m} \quad (2 \text{ formulē.})$$

**Laiva bortinio supmosi amplitudē:**

$$Q_1 = 109 \cdot k \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot \sqrt{r \cdot s} \quad (15)$$

$x_1$  – faktorijs nūstatomas īš lentelēs [1];

B/d=2.48;  $x_1$ =0.99

$x_2$  – faktorijs nūstatomas īš lentelēs [1];

Cb=0.61;  $x_2$ =0.96

k- nūstatomas īš lentelēs [1]

$$A_k = 0.025 \cdot S_{wl} = 0.025 \cdot 217.37 = 5.43 \quad (16)$$

$$\frac{A_k \cdot 100}{L_{\perp\perp} \cdot B} = \frac{5.43 \cdot 100}{27.73 \cdot 9.36} = 2.09; \quad (17)$$

$$k=0.89$$

s- nustatomas iš lentelės ;

$$C = 0.373 + 0.023 \cdot \left(\frac{B}{d}\right) - 0.043 \left(\frac{L_{\perp\perp}}{100}\right) = 0.373 + 0.023 \cdot \left(\frac{9.37}{3.76}\right) - 0.043 \left(\frac{27.73}{100}\right) = 0.41 \quad (18)$$

$$T = \frac{2 \cdot C \cdot B}{\sqrt{h}} = \frac{2 \cdot 0.41 \cdot 9.36}{\sqrt{0.2}} = 5.42 \quad (19)$$

$$s=0.1.$$

$$r = 0.73 + 0.6 \cdot \frac{OG}{d} = 0.73 + 0.6 \cdot \frac{0.58}{3.76} = 0.82 \quad (20)$$

d- grimzlė, m;

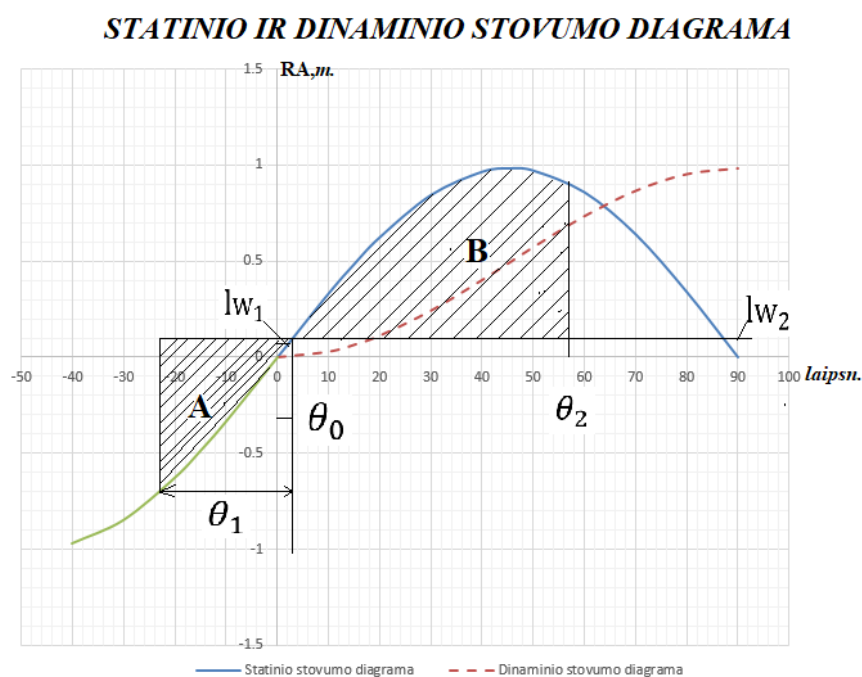
OG=KG-d;

KG-svorio centro aplikatė, m;

$$OG=4.34-3.76=0.58$$

OG- atstumas nuo laivo svorio centro aplikatės iki laivo vaterlinijos, m.

$$Q_1 = 109 \cdot k \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot \sqrt{r \cdot s} = 109 \cdot 0.89 \cdot 0.99 \cdot 0.96 \cdot \sqrt{0.82 \cdot 0.1} = 26.40^\circ. \quad (15 \text{ formulė}).$$



43 pav. Vėjo ir bangų poveikio laivo stovumui įvertinimo pagal IMO grafikas.

A ir B plotų skaičiavimai buvo atlikti naudojant „AutoCad“ programą.

$$A = 404.07 \text{ mm}^2;$$

$$B = 1256.28 \text{ mm}^2.$$

Remiantis „Autohydro“ programos skaičiavimo duomenimis (skaičiavimo duomenys pateikiami baigiamojo darbo 2 dalyje (2 tomas)) ir atliktais skaičiavimais pagal IMO sudarytą metodiką, galime teigti, kad laivas atitinka visus oro sąlygų kriterijus saugiam laivo eksploatavimui. Skaičiavimo rezultatų skaitinės išraiškos pateikiamos 7 lentelėje.

7 lentelė. Oro sąlygų vertinimo rezultatai.

| Kriterijus                                                                                                                 | Skaitinė reikšmė |                       | Išvada                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                                                                                                            | Reikiama         | Faktinė               |                       |
| 1. Oro sąlygų kriterijus                                                                                                   | $a \leq b$       | A=404.07<br>B=1256.28 | Kriterijus tenkinamas |
| 2. Pradinis metacentrinis aukštis $h_0$ , m                                                                                | $\geq 0.15$      | 0.38                  | Kriterijus tenkinamas |
| 3. Statinio stovumo diagramos apribotas plotas, esantis nuo $0^\circ$ iki $30^\circ$ intervale, $m \cdot rad$              | $\geq 0.055$     | 0.243                 | Kriterijus tenkinamas |
| 4. Statinio stovumo diagramos apribotas plotas, esantis kreno kampų nuo $0^\circ$ iki $40^\circ$ intervale, $m \cdot rad$  | $\geq 0.09$      | 0.403                 | Kriterijus tenkinamas |
| 5. Statinio stovumo diagramos apribotas plotas, esantis kreno kampų nuo $30^\circ$ iki $40^\circ$ intervale, $m \cdot rad$ | $\geq 0.03$      | 0.160                 | Kriterijus tenkinamas |
| 6. Statinio stovumo petys turi būti didesnis už 0.20m esant krenai $30^\circ$                                              | $\geq 0.2$       | 0.846                 | Kriterijus tenkinamas |
| 7. Krenas, esantis statinio stovumo diagramos maksimumui, laipsniais                                                       | $\geq 25$        | 45.47                 | Kriterijus tenkinamas |

## 10.2 Laivo supimosi intensyvumo vertinimas

Vienas iš svarbiausių žvejybinio laivo saugumo ir tinkamumo eksploatacijai vertinimo kriterijų – laivo supimosi intensyvumas. Yra vertinami šie pagrindiniai kriterijai:

1. Jūros ligos kriterijus vertina ar laivo veikiamo išorinių jėgų supimasis jūroje nėra kenksmingas žmogaus sveikatai ir patenka į reikalaujamų normų ribas.
2. Krovinio pasislinkimo kriterijus vertina ar laivui supantis laisvai ant denio padėtas krovinys nepajudės iš vietos.
3. Krovinio apvirtimo kriterijus vertina ar laivui supantis laisvai ant denio padėtas krovinys neapvirs.
4. Laivo saugumo kriterijus vertina laivo stovumą. Kokiu kampu pasivirs laivo atstatantysis momentas yra didžiausias.

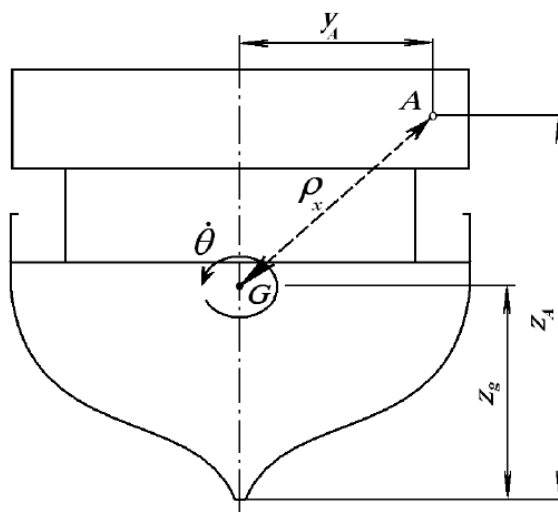
5. Švartavimosi jūroje kriterijus vertina ar laivas bangavimo metu yra pakankamai stabilus supimosi atžvilgiu ir gali atlikti švartavimosi operaciją jūroje.
6. Žūklės vertinimo kriterijus nurodo ar laivas tinkamas atlikti žūklės operaciją šiam supantis. Šio kriterijaus reikalavimas, kad botrinio supimosi amplitudė neviršytų 18 laipsnių.

Supimosi intensyvumo skaičiavimams buvo naudojama programa sudaryta Klaipėdos universiteto laivo inžinerijos katedroje. Supimosi intensyvumo skaičiavimo rezultatai pateikiami 44 pav.

| S K A I Č I A V I M Ų R E Z U L T A T A I     |  |      |
|-----------------------------------------------|--|------|
| 1. Bangos aukštis, m                          |  |      |
| moda                                          |  | 1.51 |
| vidutinė reikšmė                              |  | .94  |
| 3% aprūpinimas                                |  | 1.99 |
| 1% aprūpinimas                                |  | 2.28 |
| 2. Kreno amplitudė, laipsniai                 |  |      |
| moda                                          |  | 1.42 |
| vidutinė reikšmė                              |  | .89  |
| 3% aprūpinimas                                |  | 1.88 |
| 1% aprūpinimas                                |  | 2.16 |
| 3. Kampinis greitis, laipsn./s                |  |      |
| moda                                          |  | .32  |
| vidutinė reikšmė                              |  | .20  |
| 3% aprūpinimas                                |  | .42  |
| 1% aprūpinimas                                |  | .48  |
| 4. Kampinis pagreitis, laipsn./s <sup>2</sup> |  |      |
| moda                                          |  | .63  |
| vidutinė reikšmė                              |  | .40  |
| 3% aprūpinimas                                |  | .84  |
| 1% aprūpinimas                                |  | .96  |
| 5. Santykinė jėga $P_y/P_z$                   |  |      |
| moda                                          |  | .36  |
| vidutinė reikšmė                              |  | .23  |
| 3% aprūpinimas                                |  | .48  |
| 1% aprūpinimas                                |  | .55  |

44 pav. Supimosi intensyvumo skaičiavimo rezultatai.

Remiantis programos gautais duomenimis ir 2 tipo 3 varianto laivo geometrinėmis charakteristikomis atliekamas jūros ligos kriterijaus vertinimas. Vertinimui būtinų duomenų skaičiavimo schema pateikiama 45 pav.



45 pav. Jūros ligos kriterijaus vertinimo duomenų skaičiavimo schema.

Linijinis greitis  $i$ , m/s, apskaičiuojamas pagal formulę:

$$i = \rho_x \cdot \dot{\theta} = 4,93 \cdot 0,2 = 0,986 \text{ m/s} \quad (21)$$

$\rho_x$ - atstumas nuo laivo išilginės ašies GX iki nagrinėjamos vietos A laive:

$$\rho_x = \sqrt{y_a^2 + (z_a - z_g)^2} = \sqrt{3,68^2 + (7,50 - 4,22)^2} = 4,93 \text{ m} \quad (22)$$

$y_a$ - A taško ordinatė, m;

$z_a$ - A taško aplikatė, m.

Linijinis išcentrinis pagreitis apskaičiuojamas,  $\ddot{i}$  m/s<sup>2</sup> :

$$\ddot{i} = \sqrt{(\ddot{i}_{ic})^2 + (\ddot{i}_{\tau})^2} = \sqrt{(0,19)^2 + (1,97)^2} = 1,97 \text{ m/s}^2 \quad (23)$$

$$\ddot{i}_{ic} = \dot{\theta}^2 \cdot \rho_x = 0,2^2 \cdot 4,93 = 0,19 \text{ m/s}^2 \quad (24)$$

$$\ddot{i}_{\tau} = \ddot{\theta} \cdot \rho_x = 0,4 \cdot 4,93 = 1,97 \text{ m/s}^2. \quad (25)$$

Krovinio pasislinkimo ir apvirtimo kriterijų vertiminui iš programos pateiktų duomenų imama santykinės jėgos  $P_y/P_z$  vidutinė skaitinė reikšmė, kuri šiuo atveju yra lygi 0.23. Krovinio pasislinkimo santykinė jėga negali būti didesnė už paviršiaus ant kurio jis stovi trinties jėgą. Vertinant krovinio apvirtimo kriterijų santykinė jėga  $P_y/P_z$  negali būti didesnė už krovinio aukščio ir pločio matmenų santykį.

Laivo saugumo kriterijaus vertinimui reikia apskaičiuoti linijinį išcentrinį pagreitį (28 formulė). Laivo išcentrinio pagreičio skaitinė reikšmė negali būti didesnė už laivo posvyrio kampo skaitinę reikšmę, esant didžiausiam atsatančiajam momentui. 2 tipo 3 varianto laivo maksimalaus posvyrio kampas pateikiamas baigiamojo darbo 2 dalyje (2 tomas).

Švartavimosi jūroje kriterijaus vertinimui reikia nustatyti laivo kreno amplitudę laipsniais. Šiuo atveju šį skaitinę reikšmę yra pateikta skaičiavimo programoje 44 pav. 2 tipo 3 varianto laivo kreno amplitudę laipsniais yra lygi  $0.89^\circ$ . Pagal reikalavimus ši skaitinė reikšmė negali viršyti  $7^\circ$  ribos.

Žūklės kriterijaus vertinimui taip pat būtina žinoti laivo kreno amplitudę, kuri šiuo atveju yra lygi  $0.89^\circ$ . Pagal reikalavimus ši skaitinė reikšmė negali viršyti  $18^\circ$  ribos.

Remiantis gautais skaičiavimų rezultatais, kurie yra pateikti 8 lentelėje galime teigti, kad laivas tenkina visus nagrinėjamus kriterijus išskyrus krovinio pasislinkimo kriterijų, kadangi:

$$\frac{P_y}{P_z} \geq f_{tr}; \quad 0.23 \leq 0.15$$

8 lentelė. Laivo supimosi intensyvumo vertinimo rezultatai.

| Kriterijus                | Skaitinė reikšmė                                                                                                                      |                            | Laivo tinkamumas eksploatacijai |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|
|                           | leistina                                                                                                                              | faktinė                    |                                 |
| 1. Jūros liga             | $i \leq 1.25 \text{ m/s}$                                                                                                             | $i = 0,986 \text{ m/s}$    | <i>Tinkamas</i>                 |
|                           | $\left\{ \left( \frac{\ddot{I}}{g} \right); \tau \right\} \leq \left\{ \left( \frac{\ddot{I}}{g} \right); \tau \right\}_{\text{lim}}$ | 1.97 ir 2.36               | <i>Tinkamas</i>                 |
| 2. Krovinio pasislinkimas | $\frac{P_y}{P_z} \geq f_{tr}$                                                                                                         | $0.23 \leq 0.15$           | <i>Kroviny pasislinks</i>       |
| 3. Krovinio apvirtimas    | $\frac{P_y}{P_z} \geq \frac{b_{kr}}{h_{kr}}$                                                                                          | $0.23 \leq 1$              | <i>Tinkamas</i>                 |
| 4. Laivo saugumas         | $\theta_0 \leq \theta_m$                                                                                                              | $0.89^\circ \leq 45^\circ$ | <i>Tinkamas</i>                 |
| 5. Švartavimasis jūroje   | $\theta_0 \leq 7^\circ$                                                                                                               | $0.89^\circ \leq 7^\circ$  | <i>Tinkamas</i>                 |
| 6. Žūklė                  | $\theta_0 \leq 18^\circ$                                                                                                              | $0.89^\circ \leq 18^\circ$ | <i>Tinkamas</i>                 |

## IŠVADOS

Moksliniame tiriamajame darbe pateikiama atliekamo tyrimo tematika užsienio ir lietuviškos literatūros analizė. Aprašyta laivo eigumo teorija, vandens pasipriešinimo susidarymas laivui plaukiant.

Remiantis Kanados mokslininkų pateiktomis žvejybinių tralerių korpusų geometrinėmis charakteristikomis, naudojant „*Delftship*“ programą, buvo sumodeliuoti 52 žvejybinių tralerių korpusai.

Buvo atliktas vandens pasipriešinimo metodų palyginimas. Atsižvelgiant į gautus rezultatus nustatyta, kad tiksliausius vandens pasipriešinimo rezultatus pateikia SSD programa „*Flow 3D*“. Šis metodas buvo naudojamas įvertinant vandens pasipriešinimą visiems tiriamiems žvejybinių tralerių korpusams.

SSD eksperimentu nustatyta, kad mažiausią vandens pasipriešinimą patiria 2 tipo žvejybinių tralerių korpusai su dvigubu borto perėjimu į laivo dugną.

Atsižvelgiant į SSD eksperimento metu gautus vandens pasipriešinimo rezultatus 2 tipo žvejybinių tralerių korpusams remiantis Kanados mokslininkų sudaryta metodika buvo suprojektuotos laivapriekinės bulbos.

Naudojant SSD skaičiavimo programą „*Flow 3D*“ buvo įvertinta laivapriekinės bulbos įtaka vandens pasipriešinimui laivo korpuso judėjimui. Nustatyta, kad laivapriekinė bulba teigiamą efektą turi tik laivui plaukiant laisvosios eigos režimu (6 - 10.5 mazgai). Laivapriekinės bulbos neigiama įtaka pasireiškia laivui plaukiant tralavimo režimu (3 – 6 mazgai).

Atlikus laivo hidrostatinių charakteristikų skaičiavimus naudojant skaičiuojamąją programą „*Autohydro*“, buvo atliktas analizuojamų žvejybinių tralerių maksimalios svorio centro aplikatės, energetinio aprūpinimo palyginimai. Nustatyta, kad didžiausią maksimalios laivo svorio centro aplikatės skaitinę reikšmę turi 2 tipo 3 varianto žvejybinio tralerio korpusas. Mažiausias energetinis aprūpinimas reikalingas 2 tipo 3 varianto žvejybinio tralerio korpusui.

Atlikus oro sąlygų kriterijaus pagal IMO stovumo normas ir laivo supimosi intensyvumo vertinimą remiantis nustatyta, kad 2 tipo 3 varianto žvejybinio tralerio korpusas atitinka visus IMO oro sąlygų ir nagrinėjamų supimosi intensyvumo kriterijaus reikalavimus (išskyrus krovinio pasislinkimo) ir yra tinkamas saugiai eksploatacijai oro sąlygų ir supimosi intensyvumo kriterijaus atžvilgiu.

Remiantis atlikto tyrimo rezultatais nustatyta, kad eigumo ir santykinės galios atžvilgiu optimaliausias yra 2 tipo 3 varianto žvejybinio tralerio korpusas. Projektuojant laivą, norint gauti mažiausią vandens pasipriešinimo efektą, reikia išlaikyti 2 tipo 3 varianto laivo santykinius matmenis L/B, B/d, D/d, pilnumo koeficientus ir korpuso formą.



## REKOMENDACIJOS

Norint atlikti detalesnę susidariusių srautų ir fizikinių procesų laivo briaunos rajone analizę, programoje „*Flow 3D*“ reikia modeliuoti eksperimentą su didesnio tikslumo tinklelio bloku apie tiriamą laivo korpuso rajoną. Šiems reiškiniams ištirti gali būti atliekamas atskiras tyrimas.

Detalesniam laivapriekinio bulbo nagrinėjimui ir jo projektavimui reikia analizuoti skirtingų modifikacijų laivapriekines bulbas. Analizuoti kokios modifikacijos laivapriekinis bulbas turės didžiausią naudingumo koeficientą tiek tralavimo, tiek laisvosios eigos režimu.

Tęsiant tyrimą, remiantis šiuo metu rinkoje siūlomais mažųjų žvejbinių tralerių projektais, atlikti 2 tipo 3 varianto korpuso eigumo ir jūrinių savybių palyginimą. Panašus mažojo žvejbinio tralerio projektas TR-24 yra siūlomas žymaus lenkų projektuotojo prof. Andrzej Lerch.

## LITERATŪRA

1. Auke van der Ploeg. 2014. Optimization of the STREAMLINE tanker using RANS/FS computations. Mulheim: 16<sup>th</sup> NuTTS.
2. Ašmontas Ž. 2015. KU mokslinių tyrimų laivo skego modernizavimo tyrimas. Klaipėdos universitetas.
3. Bandringa H., Verstappen R., Wubs F., et al. 2012. On novel simulation methods for complex ows in maritime applications. Corton: 15<sup>th</sup> NuTTS.
4. Boutanios Z., R. Van't Veer. 2012. CFD Analysis of a U-shaped Water Tunnel Bilge Keel. Corton: 15<sup>th</sup> NuTTS.
5. Chao L., Jihua C. 2016. Study on the Shape Parameters of bulbous bow of tuna longline fishing vessel. Shanghai, China.
6. Čerka J. 2005. Laivo eigumas. Klaipėda: Klaipėdos universiteto leidykla.
7. Čerka J. 1997. Laivo teorija. Klaipėda: Klaipėdos universiteto leidykla.
8. Flow Science [interaktyvus], [žiūrėta 2017 m. Gegužės 02d.] Prieiga per internetą: <<http://www.flow3d.com/home/resources/cfd-101>>
9. Garth C. An Introduction to Flow Visualization. University of California. [žiūrėta 2017 m. Gegužės 16d.] Prieiga per internetą: <<http://graphics.cs.ucdavis.edu/~joy/ecs277/othernotes/ecs277-1.pdf>>
10. Haase M., Binns J., Thomas G., et al. 2012. Resistance Prediction of Medium-speed Catamarans Using Free-surface Viscous Flow Simulations. Corton: 15<sup>th</sup> NuTTS.
11. Hochkirch K., Bertram V., Mallol B. 2013. Reflections on the Importance of Full-Scale Computations for Ship Flows. Mulheim: 16<sup>th</sup> NuTTS.
12. You-Sheng Wu, Wei-Cheing Cui, Guo-Jun Zhou. 2001. Practical ship design and Other Floating Structures. Shanghai: Tong University.
13. Kleppesto K. 2015. Empirical prediction of resistance of fishing vessels. Trondheim, Norway.
14. Labanti J. 2016. CFD Assessment of Ropax Hull Resistance with Various Initial Drafts and Trim Angles. Lisabon, Portugal.
15. Marion C. James, Stephen R. Turnock, Dominic A. Hudson. 2012. Design of retrofit devices using CFD, validated with wind tunnel tests. Corton: 15<sup>th</sup> NuTTS.
16. Nishikawa T., Yamade Y. Sakuma M. Ir kt. 2012. Fully Resolved Large Eddy Simulation as an Alternative to Towing Tank Resistance Tests – 32 Billion Cells Computation on K computer. Mulheim: 16<sup>th</sup> NuTTS.

17. Nikolas O.S. 2015. Investigation of Performance of Twin-Screw Trawler Using CFD. Trondheim, Norway.
18. Numerical Propulsion Test for a Multi Purpose Research Catamaran. The Hamburg Ship Model Basin.
19. Paton I., Vassalos D. 2013. A Study of Hull Form Improvement For a Fishing Trawler. Glasgow, United Kingdom.
20. Rawson K.J., Tupper E.C. 2001. Basic ship theory. Oxford: Butterworth-Heinemann.
21. Ruggeri F., Challela M., Sampaio C.M.P. et al. 2012. Parametric Model and CFD Integrated Process for WED Optimization. COMPIT 2012.
22. Setyawan D. 2010. Development of Catamaran Fishing Vessel. The Journal for Technology and Science, Vol.21, No.4, November.
23. Slade S. 1998 [žiūrēta 2017 m. Gegužės 18d.] Prieiga per internetą: <[http://www.navweaps.com/index\\_tech/tech-014.htm](http://www.navweaps.com/index_tech/tech-014.htm)>
24. Strake B., Windt J. 2003. Two examples of hull-form optimization using viscous-flow computations. London: Computational Fluid Dynamics Technology in Ship Hydrodynamics.
25. Stonkus V. 2006. Laivo teorija. Klaipėda: Klaipėdos universiteto leidykla.
26. Tanasescu H., Tanasescu O. 2008. Stern flow improvement by using some new, original concepts and ideas, in the world of ship hydrodynamics. Bucharest: 5th National Conference of Romanian Hydropower Engineers.
27. Valkhof H.H. Minguito E., Kooiker K. 2006. New Promising Generation of Twin-Gondola LNG Carriers Optimized with the Aid of CFD Calculations. Maritime Technology Conference and Expo and Ship Production Symposium.
28. Visonneau M. 2005. A step towards the numerical simulation of viscous flows around ships at full scale - recent achievements within the european union project effort. Marine CFD: Southampton.
29. Цудани, Тосито 1982. Японские промысловые суда. – Ленинград : Судостроение, 146 р.