

**KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS**

Jūrų technologijų ir gamtos mokslų fakultetas

Jūrų inžinerijos katedra

Viktoras Norvydas

**GREITAEIGIŲ KATAMARANŲ PASIPRIEŠINIMO  
SKAIČIAVIMO METODIKŲ ANALIZĖ**

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

Klaipėda, 2016

# Laivų projektavimo ir statybos magistrantūros studijų programos baigiamasis darbas

Magistro tezės: Greitaeigių katamaranų pasipriešinimo skaičiavimo metodikų analizė.

Magistrantas: Viktoras Norvydas

## Darbo sudėtis

1. Titulinis lapas (viršelis)
2. Santrauka
3. Užduotis
4. Lentelių sąrašas
5. Paveikslėlių sąrašas
6. Turinys
7. Įvadas (problemos analizė)
8. Darbo tikslas ir uždaviniai
9. Literatūros analizė
10. Teorinė dalis
  - 10.1. Laivo greičio nustatymo metodikų analizė
  - 10.2. Greitaeigių laivų pasipriešinimo skaičiavimo metodikų analizė ir parinkimas.
11. Matematinis eksperimentas
  - 11.1. Greitaeigių laivų pasipriešinimo skaičiavimo pagalbinio įrankio sukūrimas.
  - 11.2. Greitaeigių laivų pasipriešinimo skaičiavimas naudojant pasirinktą metodiką.
  - 11.3. Greitaeigių laivų pasipriešinimo skaičiavimas naudojant CFD programinę įrangą.
  - 11.4. Greitaeigių laivų pasipriešinimo skaičiavimo rezultatų palyginimas ir analizė.
  - 11.5. Vienkorpusių ir daugiakorpusių laivų vandens pasipriešinimo palyginamoji analizė
12. Išvados
13. Literatūros sąrašas
14. Priedai

Užduotis išduota: 2015.10.09

Darbo vadovas: doc. dr. Vasilij Djačkov

## SANTRAUKA

Norvydas V. Greitaeigių katamaranų pasipriešinimo skaičiavimo metodikų analizė. Laivo projektavimo ir statybos magistro studijų programos baigiamasis darbas. Darbo vadovas: doc. dr. Vasilij Djačkov, Klaipėdos universitetas: Klaipėda, 2016. 60.

Raktiniai žodžiai: katamaranai, pasipriešinimas, metodika, CFD (skaičiuojamųjų skysčių dinamika angl. Computational Fluid Dynamics).

Darbe apžvelgta mokslininkų atlikti katamaranų vandens pasipriešinimo metodikų palyginimo analizės įvairioms korpusų formoms bei jų išdėstymams ir padarytos literatūros apžvalgos išvados. Išanalizuotos vandens pasipriešinimo metodikos, sukurtas programinis įrankis, kurio pagalba tiriamosios metodikos skaičiavimus galima atlikti patogiau, greičiau ir gauti išsamesnius rezultatus. DelftShip programa buvo sukurtas metodikoje pateikto laivo teorinio brėžinio 3D modelis. 3D modelio pasipriešinimas apskaičiuotas pasinaudojant sukurtu programiniu įrankiu ir Flow3D. Atliktas tiriamosios metodikos ir CFD rezultatų palyginimas ir padarytos išvados.

## SUMMARY

Norvydas V. Analysis of High-Speed Catamarans Resistance Calculation Methods. Naval Architecture and Design Master Thesis. Supervisor doc. dr. V. Djačkov. Klaipėda's University: Klaipėda, 2016. 60 p.

Keywords: catamarans, resistance, methods, CFD.

In this work, by studying water resistance of various scientist methods where catamarans are with various hull forms and demi-hull positions literature review conclusions are made. Analyzed basic water resistance calculation methods and additional software tool was created to calculate specified method where results are given faster, easier and comprehensive. 3D ship model of ship body plan was created by using DelftShip software and 3D model's resistance was calculated both with created software tool and Flow3D. The conclusions of specified method and CFD results comparison are made and recommendation is given.

## LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Korpuso šiurkštumo koeficiento reikšmės.....	24
2 lentelė. Išsikišusių dalių pasipriešinimo koeficiento reikšmės.....	27
3 lentelė. Pagrindiniai metodikos laivo parametrai .....	27
4 lentelė. Metodikos eksperimentinių tyrimų rezultatai .....	28
5 lentelė. Tiriamosios metodikos ir programinio įrankio viso pasipriešinimo rezultatai .....	39
6 lentelė. Flow3D ir programinio įrankio viso pasipriešinimo rezultatai.....	28

## PAVEIKSLĖLIŲ SĄRAŠAS

1 pav. ShipFlow, Hydros ir eksperimentinių duomenų palyginimo grafikas.....	10
2 pav. $C_T$ ir $\tau$ eksperimentinių ir matematinių rezultatų palyginimo grafikai .....	10
3 pav. Simetrinių ir nesimetrinių korpusų principinė schema .....	11
4 pav. Nelygiagrečių korpusų principinė schema.....	11
5 pav. Bangavimo pasipriešinimo koeficiento regresijos ir Molland rezultatų palyginimo grafikas 12	
6 pav. Vandens pasipriešinimo sudedamosios dalys .....	13
7 pav. Laivo pasipriešinimo įvertinimo metodai .....	15
8 pav. Reinoldso skaičiaus priklausomybė nuo $C_{FR}$ grafikas .....	24
9 pav. $C_{L/B}^R$ priklausomybės nuo L/B reikšmių grafikas.....	25
10 pav. $\chi B/T$ priklausomybės nuo B/T reikšmių grafikas.....	25
11 pav. $\chi \delta$ priklausomybės nuo $\delta$ reikšmių grafikas .....	26
12 pav. Likusio pasipriešinimo priklausomybė nuo santykinio klirenso reikšmių grafikas .....	26
13 pav. Grafinis metodikos rezultatų vaizdas.....	26
14 pav. Visual Studio programavimo aplinka .....	29
15 pav. Pagalbinio įrankio formos vaizdas.....	30
16 pav. Pradinių duomenų įvedimo laukai .....	30
17 pav. Greičio įvesties laukai.....	31
18 pav. C šiurkštumo įvesties laukas ir jo reikšmės.....	31
19 pav. C išsikišusių dalių įvedimo laukas ir jo reikšmių lentelė .....	32
20 pav. Programinio įrankio rezultatų vaizdavimas .....	32
21 pav. Laivo teorinis brėžinys pagal tiriamą metodiką.....	34
22 pav. DelftShip pagrindinių matmenų įvedimas .....	34
23 pav. DelftShip 3D modelio tikrinimas ir španhautų formos.....	35
24 pav. Geometrijos atvaizdavimas su Flow3D .....	36
25 pav. Simuliacijos vaizdas naudojant Flow3D .....	37
26 pav. Tiriamosios metodikos ir programinio įrankio duomenų palyginimo grafikas .....	39
27 pav. Flow3D ir programinio įrankio duomenų palyginimo grafikas.....	40

## TURINYS

<b>IVADAS</b> .....	7
<b>1. KATAMARANŲ PASIPRIEŠINIMO METODIKŲ PALYGINIMŲ APŽVALGA</b> .....	9
<b>2. VANDENS PASIPRIEŠINIMAS IR JO SKAIČIAVIMO METODAI</b> .....	13
2.1 Trinties pasipriešinimas .....	13
2.2 Formos pasipriešinimas .....	14
2.3 Bangavimo pasipriešinimas .....	14
2.4 Standartinių serijų analizės metodai .....	15
2.5 Regresija pagrįsti metodai .....	18
2.6 Modelinių bandymų metodai .....	21
2.7 Skaičiuojamųjų skysčių dinamika (CFD) .....	22
<b>3. EKSPERIMENTO APLINKOS SUKŪRIMAS BET KOKIOS FORMOS KATAMARANŲ PASIPRIEŠINIMUI SKAIČIUOTI NAUDOJANT CFD</b> .....	23
3.1 Katamaranų vandens pasipriešinimo tiriamoji skaičiavimo metodika virškritinių greičių diapazone .....	23
3.2 Katamaranų pasipriešinimo skaičiavimo pagalbinio įrankio sukūrimas pagal tiriamąją metodiką.....	29
3.3 Laivo 3D modelio kūrimas pagal metodikoje pateiktą laivo teorinį brėžinį .....	33
3.4 Sumodeliuoto laivo pasipriešinimo skaičiavimas naudojant Flow3D .....	35
<b>4. SKAIČIAVIMO METODIKŲ REZULTATŲ PALYGINIMAS IR ANALIZĖ</b> .....	38
<b>5. IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS</b> .....	41
<b>LITERATŪRA</b> .....	42
<b>PRIEDAI</b> .....	43

## IVADAS

Modernioji vandens transporto rinka gali būti suvokiama kaip susidedanti iš dviejų dalių: greitaeigiai mažos krovos vandens transporto priemonės (pavyzdžiui orlaiviai) ir lėtaeigiai, didelės krovos vandens transporto priemonės (dažniausiai krovininiai laivai). Nuolatinis spaudimas transportuoti kuo daugiau krovinių kuo didesniu greičiu, įskaitant ir aplinkos susirūpinimą, privedė kompanijas ir tyrėjus ieškoti hibridinių technologijų [1].

Šiais laikais greitaeigiai laivai yra naudojami kariniams, pramoginiams, lenktynių bei transportavimo tikslams. Pagrindinis laivo savininkų pasirinkimas išlieka vienkorpūsiai laivai ir katamaranai. Bet per pastaruosius dešimtmečius greitaeigiai katamaranai labai išpopuliarėjo ne tik dėl keleivių gabenimo, bet panaudojimo kaip keltai. Pagrindiniai dalykai, kurie lėmė jų naudojimą yra: greitis, saugumas, skersinis stovumas, didelis denio plotas ir manevringumas. Tačiau trinties pasipriešinimas palyginus su vienkorpūsiais laivais yra didesnis dėl didesnio vandens suvilgyto paviršiaus ploto [2,3].

Siauros korpuso formos ir didesnio greičio galimybės paskatino technologinės evoliucijos reikiamumą, kad numatyti preliminaras pasipriešinimo charakteristikas. Katamaranų ramaus vandens pasipriešinimas paprastai susideda iš dviejų pagrindinių komponentų: trinties pasipriešinimas ir bangavimo pasipriešinimas [4].

CFD (Computational Fluid Dynamics) technologija yra plačiai naudojama daugiakorpusių laivų pasipriešinimo skaičiavimams, bet ji nelaikoma visiškai išvystyta technologija dėl neiškių, nepastovių aspektų kaip turbulencinis modelis, supaprastinimas fizinio srauto, tinklelio generavimo metodo. Visi šie aspektai priveda prie nepatikimų matematinio modeliavimo rezultatų [5]. Tačiau skysčių klampumo poveikis ir nelinijiniai faktoriai yra tiksliai suvaldomi net esant ir dideliame Reinoldso skaičiui. Nors per pastaruosius metus CFD technologijos tikslumas ir efektyvumas ženkliai išaugo, tačiau rezultatai teorinių metodų ir CFD skiriasi. Dėl tos priežasties kombinacija iš modeliųjų bandymų ir CFD tampa optimaliausias pasirinkimas spręsti katamaranų pasipriešinimo skaičiavimo problemas [3,6,7].

Paprastai laivo pasipriešinimo skaičiavimo metodai yra sudaryti pagal bandymų baseinų eksperimentus, atliktus su konkrečiomis laivų formomis. Bet kai reikia apskaičiuoti vandens pasipriešinimą laivo judėjimo formai, kuri ženkliai skiriasi nuo naudotos metodikoje, tai pagal metodiką spskaičiuoti rezultatai bus netikslūs. Tokiems atvejams vis dažiau šiais laikais naudojamas CFD metodas. Naudojant CFD metodą, reikia kuo tiksliau nustatyti eksperimento atlikimo sąlygas. Tai galima padaryti palyginus skaičiavimo metodikos ir CFD eksperimento rezultatus, panaudojus tą pačią metodikoje pateiktą korpuso formą.

**Darbo tikslas:** sukurti skaičiavimo metodikos programą ir palyginti skaičiavimus su CFD.

**Pagrindiniai uždaviniai:**

1. Išanalizuoti katamaranų pasipriešinimo skaičiavimų metodikų palyginimus su CFD
2. Sumodeliuoti 3D laivą, naudojant korpuso teorinį brėžinį virškritinių greičių diapazone
3. Sukurti programinį įrankį metodikos skaičiavimams atlikti
4. Atlikti ir išanalizuoti skaičiavimus programoje ir CFD

**Tyrimo objektas:** vandens pasipriešinimo skaičiavimo metodikos.

**Tyrimo metodai:** matematinis modeliavimas ir palyginamoji analizė.

# 1. KATAMARANŲ PASIPRIEŠINIMO METODIKŲ PALYGINIMŲ APŽVALGA

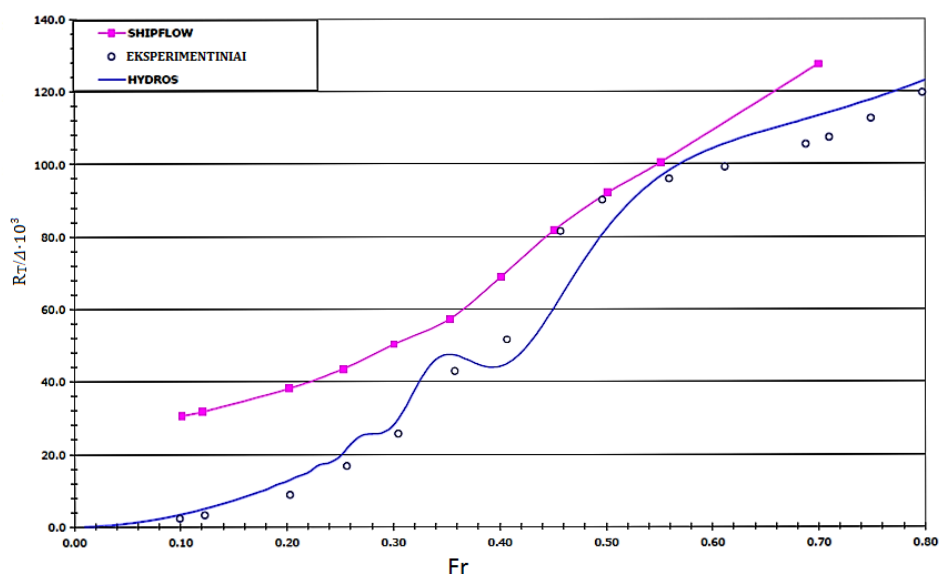
Pastaruoju metu, modernėjant laivams ir kompiuteriniai įrangai, norima sutaupyti laiko ir lėšų projektuojant laivus. Vienas iš jų būtų eliminuoti arba iš dalies eliminuoti modelinius buksyravimo bandymus panaudojant kompiuterinę įrangą CFD. Deja CFD nėra iki galo išstobulinta programa. Mokslininkai atlieka eksperimentinius tyrimus siekiant pilnai išstobulinti CFD visoms laivo korpusų formoms.

A. Souto Iglesias, R. Zamora, D. Fernandez ir C. Lopez Pavon straipsnyje „Katamarano bangų pasipriešinimas ir centrinės bangos kirtimas naudojant CFD patikrinimas“ atliko eksperimentinius tyrimus, siekiant nustatyti, kokią įtaką katamaranų korpusų atstumas turi pasipriešinimui ir gautus duomenis palygino su CFD gautais duomenimis. Modeliniai bandymai buvo atlikti ETSIN buksyravimo baseine ir gauti duomenys palyginti su CFD TDYNLIN gautais rezultatais. Autoriai padarė išvadą, kad kuo atstumas tarp korpusų didesnis, tuo hidrodinaminės savybės yra geresnės ir CFD analizės rezultatai yra tikslesni, tačiau esant mažesniai Frūdo skaičiui, rezultatų skirtumas yra akivaizdus [8].

ZHA Ruo-si, YE HAI-xuan, SGEB Zhi-rong, WAN De-cheng straipsnyje „Greitaeigių katamaranų pasipriešinimo skaitmeniniai skaičiavimai ramiaame vandenyje“ atliko duomenų palyginimą tarp skaitmeninių simuliacijų naudojant naoe-FOAM-SJTU ir modelinių bandymų rezultatų, taip pat atsižvelgiant į pasipriešinimo skaičiavimus, laisvuosius paviršius ir bangavimo simuliacijas, sukurinių laukų pokyčius bei slėgio pasiskirstymo ir aptekėjimą apie korpusą. RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) formulės buvo naudojamos kaip pagrindinės skaičiavimo formulės, o VOF metodas (Volume Of Fluid) ir lygio nustatymo (level-set) buvo panaudoti laisviems paviršiams gauti. FVM (finite volume method) buvo pritaikytas diskretizuojant formules ir gauti rezultatai patikslino, kad FOAM-SJTU yra patikimas sprendimas susidoroti su skysčių hidrodinamikos problemomis aukštu patikimumu ir patvirtino, kad reikšmingas pasipriešinimo sumažinimas katamaranui plaukiant dideliu greičiu gali būti pasiektas. Pastebėta, kad pateikiant rezultatus, laivui judant buvo parodytos tik laivagalinės bangos, laivapriekinių bangų sistemos straipsnyje nesimato, todėl rezultatų patikimumas sukelia abejonių [3].

Nors katamarano konfigūracija yra žinoma labai ilgą laiką, pastaraisiais metais, kai jų populiarumas žymiai išaugo greitaeigių keltų pramonėje, atsirado daug įvairių korpuso formų. Jie sukėlė architektams iššūkių dėl tikslių hidrodinaminių charakteristikų prognozių, pagrindinai pasipriešinimo, varomosios jėgos ir laivo jūrinio stovumo. Prasanta K. Sahoo, Lawrence J Doctors, Luke Pretlove straipsnyje „Katamaranų su prasilenkiančiais korpusais bangų pasipriešinimo numatymas naudojant CFD“ išnagrinėjo katamarano su prasilenkiančiais korpusais ir transiniu

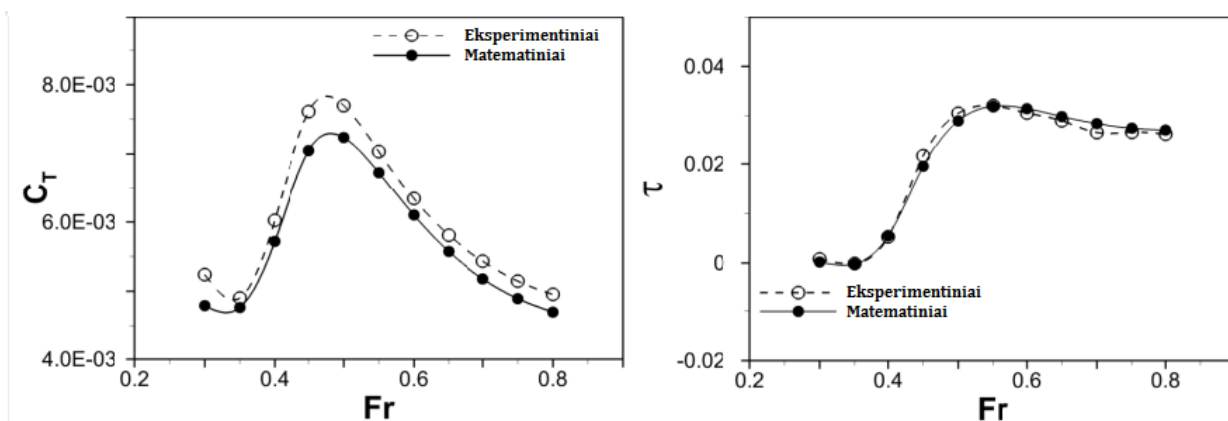
laivagaliu bangavimo pasipriešinimo charakteristikas ramiame vandenyje remiantis CFD ShipFlow, Hydros modeliavimu ir thin-ship (plonų-laivų) teorija. Gauti rezultatai pateikiami 1 pav.



1 pav. ShipFlow, Hydros ir eksperimentinių duomenų palyginimo grafikas

Iš pateiktų rezultatų 1 pav. matome, kad Hydros programa gauti rezultatai yra labai arti eksperimentinių rezultatų visame Frūdo skaičių diapazone, o ShipFlow rezultatai yra priimtini tik esant Frūdo skaičiui nuo 0,45-0,6 [7].

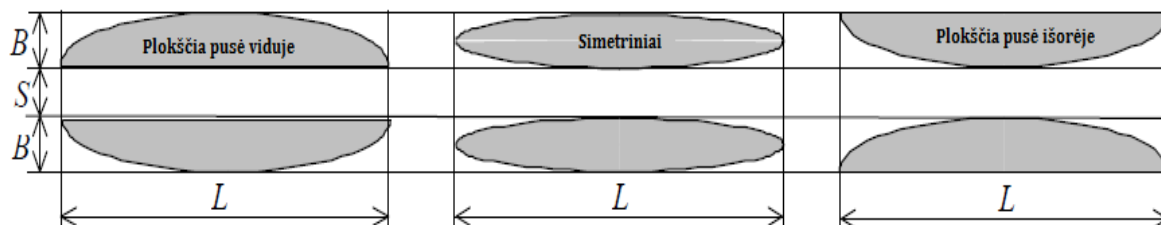
Teresa Castiglione ir Sergio Bova straipsnyje „Katamaranų hidrodinaminė analizė ramiame vandenyje ir banguojant“ 3 metus tyrinėjo hidrodinaminės elgsenos priartėjimą prie URANS (Unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes). Katamarano pagrindas buvo DELFT 372 katamarano modelis ir atlikta analizė naudojant URANS formules ir programinę įrangą CFDSHIP-lowa V.4., gauti rezultatai pavaizduoti 2 pav.



2 pav.  $C_T$  ir  $\tau$  eksperimentinių ir matematinių rezultatų palyginimo grafikai

Iš rezultatų 2 pav. matome, kad per 3 tyrimo metus buvo pasiektas gana aukštas URANS formulėmis pagrįsta programinė įranga CFDSHIP-lowa tikslumas, siekiant nustatyti visą pasipriešinimą ir diferentą. Taip pat šitas kodas yra toliau vystomas, siekiant tiksliai apskaičiuoti katamaranų hidrodinamines charakteristikas esant dideliui greičiui ir dideliui bangavimui [8].

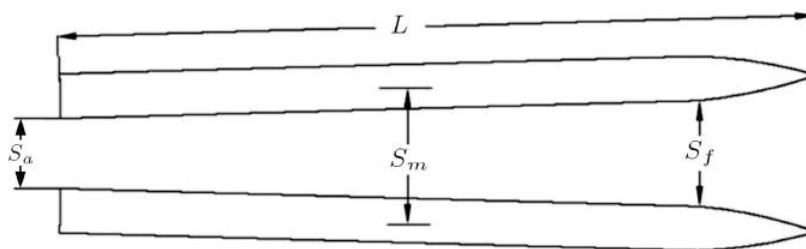
George Zaraphonitis, Dimitris Spanos, Apostolos Papanikolaou straipsnyje „Greitų vandentalpos asimetrinių katamaranų bangų pasipriešinimo matematiniai ir eksperimentiniai tyrimai“ atliko bandymus su katamaranais, kurie turi simetrinius ir asimetrinius korpusus. Tyrinamųjų korpusų principinė schema pavaizduota 3 pav.



3 pav. Simetrinių ir nesimetrinių korpusų principinė schema

Autoriai padarė išvadą, kad tinkamai optimizuoti asimetriniai korpusai gali turėti geresnes hidrodinamines savybes, siekiant sumažinti visą pasipriešinimą, atsižvelgiant į Frūdo skaičių diapazoną ir atstumą tarp korpusų [9].

Paprastai katamaranų korpusai būna lygiagretūs vienas kitam, todėl A. Ebrahimi, M. Rad ir A. Hajilouy straipsnyje „Katamaranų su nelygiagrečiais korpusais eksperimentinis ir skaitmeninis pasipriešinimo tyrimas“ atliko skaičiavimus norėdami palyginti eksperimentinius duomenis su matematiniais duomenimis naudojant FLUENT sprendimo būdą, kuris yra pagrįstas FVM metodu (angl. Finite volume method) matematiniais skaičiavimams ir pritaikant VOF (angl. volume of fluid) modeliavimą apskaičiuojant laisvąjį paviršių ir visą pasipriešinimą. Eksperimentiniai duomenys buvo gauti buksyravimo baseine esant skirtingiems Frūdo skaičiams ir skirtingiems korpusų pasiskirstymo santykiams  $L/S_m$  4 pav.



4 pav. Nelygiagrečių korpusų principinė schema

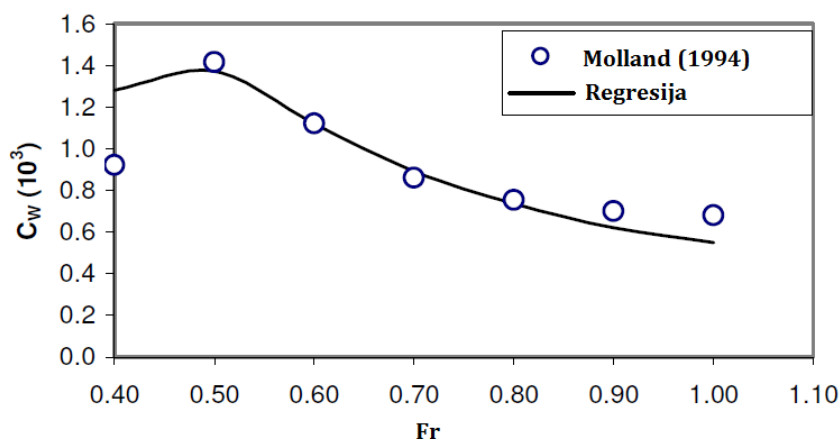
Palyginus gautus eksperimentinius duomenis su CFD, gauta kad visais atvejais rezultatu skirtumas yra iki 10% esant mažiems Frūdo skaičiams, o jam didėjant skirtumas išauga iki 25%, todėl šio CFD skaičiavimo metodo negalima taikyti, norint tiksliai apskaičiuoti katamaranų su nelygiagrečiais korpusais pasipriešinimą [2].

Prasant K. Sahoo, Xuan P. Pham ir Kishore Kantimahanthi straipsnyje „V-formos katamaranų bangų pasipriešinimo prognozavimas naudojant regresijos analizę“ tyrė skaičiavimo metodikų ir CFD SHIPFLOW duomenų tikslumą, siekiant kuo tiksliau apskaičiuoti V-formos katamaranų bangų pasipriešinimą. Jie ištyrė 3 skirtingas metodikas:

- Insel & Molland's metodas (1991);
- V-formos apvadų serijos regresijos metodologija;
- Millward's metodas (1992).

Autoriai padarė išvadas, kad eksperimentinių duomenų regresijos analizę reikia pertvarkyti, siekiant gauti tikslesnes regresijos formules, taip pat reikia pataisymų laivo diferento įtakai ir interferencijos efektui, kurie geriau yra išanalizuojami buksyravimo baseinuose. Pastebėta, kad duomenys gauti yra tik Frūdo skaičių diapazone  $0,4 < Fr < 1$ , todėl pagal šią metodiką negalima apskaičiuoti pasipriešinimo esant Frūdo skaičiui mažesniau nei 0,4 [4].

Tas pats autorius Prasant K Sahoo ir kiti: Nicholas A Browne ir Marcos Salas straipsnyje „Greitaeigių U-formos katamaranų eksperimentinis ir CFD bangų pasipriešinimo tyrimas“ tyrė kito katamarano korpuso U-formos bangų pasipriešinimą naudojant Insel & Molland metodą (1992) ir jo katamarano geometrinius parametrus su Molland's (1994) modeliais ir juos lygino su CFD SHIPFLOW. Pirmiausi jie ištyrė metodikos regresiją pasinaudodami SHIPFLOW, o tada gautus rezultatus palygino su Molland metodikos duomenimis 5 pav.



5 pav. Bangavimo pasipriešinimo koeficiento regresijos ir Molland rezultatų palyginimo grafikas

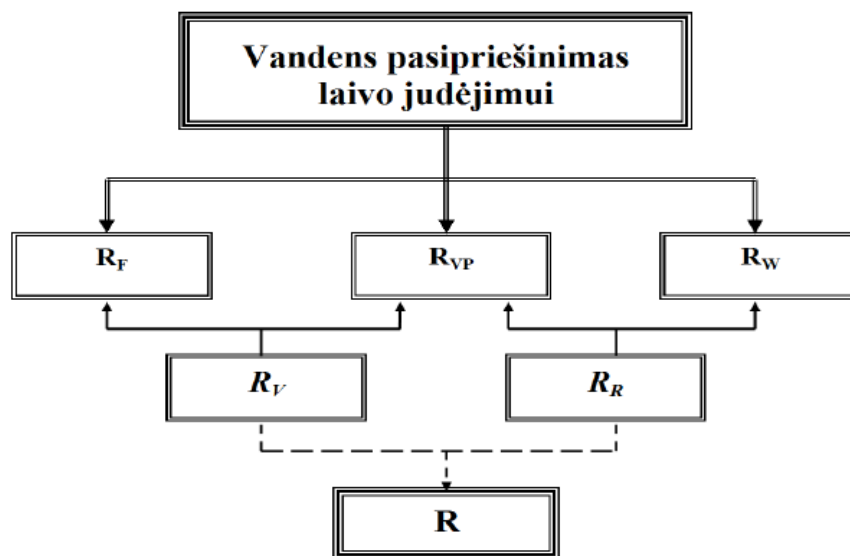
Pagal gautus rezultatus 5 pav. matome, kad gauti regresijos duomenys iš SHIPFLOW yra ganėtinai patikimi, lyginant su Molland's eksperimentiniais duomenimis. Tačiau išlieka ta pati problema, kad šiuo būdu negalima apskaičiuoti bangų pasipriešinimo esant Frūdo skaičiui mažesniems už 0,4. Taip pat bandymai atlikti tik su 3 iš 10 Molland metodikos katamaranų korpusų [10].

## IŠVADOS

Nei viename iš analizuotų straipsnių nebuvo gauti patikimi duomenys visame Frūdo skaičiaus diapazone ( $0,1 < Fr < 1$ ). Nors išanalizuota literatūra aktuali pasirinktai temai, tačiau trūksta informacijos, kad būtų galima sukurti eksperimento aplinką bet kokios formos katamaranų pasipriešinimui skaičiuoti naudojant CFD.

## 2. VANDENS PASIPRIEŠINIMAS IR JO SKAIČIAVIMO METODAI

Vandens pasipriešinimas – tai vandens spaudimas ir trintis į laivo korpusą jam judant. Kadangi vandens spaudimas veikia kiekvieną laivo korpuso povandeninės dalies, visų po vandeniu esančių atsikišusių dalių paviršių, galima sakyti, kad trintis priklauso nuo laivo išmatavimų, povandeninio korpuso švarumo ir šiurkštumo. Vandens pasipriešinimas taip pat priklauso nuo laivo povandeninės dalies korpuso formos ir bangavimo. Vandens pasipriešinimo sudedamosios dalys pavaizduotos 6 pav. [11].



6 pav. Vandens pasipriešinimo sudedamosios dalys [12]

### 2.1 Trinties pasipriešinimas

Kadangi vanduo yra klampus, laivui plaukiant dalis vandens dalelių, esančių arčiau laivo borto, juda kartu su jo korpusu. Kuo toliau nuo korpuso yra vandens sluoksnis, tuo mažiau juda jo dalelės, dar toliau nuo korpuso jos lieka ramybės būklėje. Be vandens klampumo svarbus ir vandens spaudimas į laivo korpuso paviršių. Vandens dalelytės, prilipusios prie laivo korpuso, juda tokiu pat greičiu kaip ir laivas, toliau nuo korpuso jų greitis mažėja, o už trinties sluoksnio ribos jis lygus nuliui. Trinties pasipriešinimas priklauso nuo laivo greičio, korpuso suvilgyto paviršiaus ploto, jo paviršiaus švarumo, šiurkštumo ir vandens tankumo, trinties pasipriešinimas  $R_{tr}$  skaičiuojamas formule:

$$R_{tr} = (C_{tr} + C_s) \Omega \frac{\rho v^2}{2}, \text{ kN} \quad (1)$$

čia:  $C_{tr}$  – trinties koeficientas, apskaičiuojamas arba parenkamas iš žinyų;

$C_s$  – laivo korpuso švarumo ir šiurkštumo koeficientas;

$\Omega$  – laivo suvilgyto paviršiaus plotas,  $\text{m}^2$ ;

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

$v$  – laivo greitis,  $\text{m/s}$ .

## 2.2 Formos pasipriešinimas

Formos pasipriešinimas priklauso nuo laivo korpuso formos, jo pagrindinių matmenų santykių ( $L/B$ ,  $B/T$ ,  $L/V$ ,  $x_c/L$ ).

$V$  – tūrinė vandentalpa, m<sup>3</sup>;

$L$  – laivo ilgis, m;

$B$  – laivo plotis, m;

$T$  – laivo grimzlė, m;

$x_c$  – vandentalpos centro aplikatė, m.

Kadangi laivo korpuso apvadai nėra labai aptakūs ir vanduo, aptekėdamas laivo korpusą, išsikišusias povandeninės laivo korpuso dalies detales, įrangą ir nelygumus, sudaro vandens sūkurius. Didėjant laivo greičiui, sūkurių daugėja. Išsikišusios povandeninės korpuso dalys ir įranga – tai vairas, nukreipiamoji mova, pavairavimo įranga, bortiniai kiliai, sraigto veleno kronšteinai ir kt. Sūkuriams sukurti prarandama dalis energijos, šis pasipriešinimas vadinamas sūkuriniu pasipriešinimu. Visa tai sudaro laivo formos pasipriešinimą  $R_f$ , kurį galima apskaičiuoti formule:

$$R_f = C_f \Omega \frac{\rho v^2}{2}, \text{ kN} \quad (2)$$

čia:  $C_f$  – laivo formos pasipriešinimo koeficientas.

## 2.3 Bangavimo pasipriešinimas

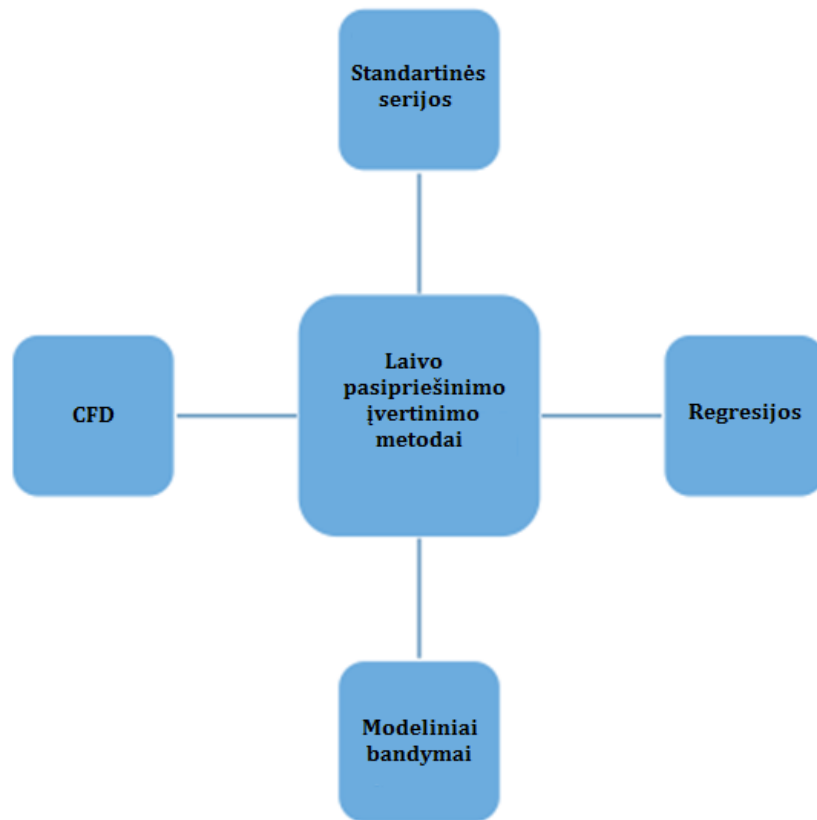
Laivui plaukiant, vandens masė laivo priekyje patiria laivo korpuso spaudimą: stumiamo vandens masė laivo priekyje pasikelia arba nusileidžia sukeldama bangavimą. Bangavimas, kurį sukelia plaukdamas laivas, skiriamas nuo vėjo ar kitų jėgų sukulto bangavimo. Laivui plaukiant jo sukeltos bangos būna dviejų tipų: laivo priekio ir laivagalio. Laivo priekyje bangos atsiranda už forštevenio, laivagalio – prieš achterštevenį. Bangavimui sukelti sunaudojama energijos, šį pasipriešinimą vadiname bangavimo pasipriešinimu  $R_b$ , jis skaičiuojamas formule:

$$R_b = C_b \Omega \frac{\rho v^2}{2}. \text{ kN} \quad (3)$$

Pilnas vandens pasipriešinimas  $R_{\text{vandens}}$  apskaičiuojamas pagal formulę:

$$R_{\text{vandens}} = R_{tr} + R_f + R_b. \text{ kN} \quad (4)$$

Modernūs metodai, kuriais galima nustatyti laivo pasipriešinimą, yra paremti CFD (Computational Fluid Dynamics). Tačiau yra 4 metodai, įskaitant CFD, kurie paprastai yra naudojami pramonėje. Metodo pasirinkimas priklauso ne tik nuo galimybių, bet ir nuo reikalaujamo tikslumo, lėšų bei moksliskai pasiekto technologinio laipsnio. 7 pav. pavaizduota pagrindiniai laivo pasipriešinimo įvertinimo metodai [13].



7 pav. Laivo pasipriešinimo įvertinimo metodai [13]

## 2.4 Standartinių serijų analizės metodai

Jie paremti eksperimentais, kuriuos atliko įvairūs mokslininkai. Tai daugiau teoriniai metodai negu praktiniai, remiantis grafikais ir stebėjimais garsių šios srities mokslininkų.

### Tayloro metodas

Admirolas Taylor 1910 publikavo modelių testų rezultatus serijai korpusų formų. Jo darbas buvo išplėtotas nuo 0,3 iki 2,0 Frūdo skaičiaus diapazono. Korpusų seriją sudarė 80 modelių [14].

Modelių formų sisteminės variacijos:

- 5 santykiai  $\frac{L}{\sqrt[3]{\Delta}}$ ;
- 3 santykiai  $\frac{B}{D}$ : 2,25, 2,92 ir 3,75;
- 8 išilginio pilnumo koeficientai: nuo 0,48 iki 0,86
- tik 2 vertės B/T 2,25 ir 3,75 buvo panaudotos Tayloro 80-čiai modelių.

Šis metodas yra koncentruotas į likusio pasipriešinimo koeficiento  $C_R$  skaičiavimą:

$$C_R = f\left(\frac{v}{\sqrt{L_{wl}}}, \frac{B}{T}, C_p, \frac{\Delta}{L_{wl}^3}\right), \quad (5)$$

čia:  $C_p$  – išilginio pilnumo koeficientas;

$L_{wl}$  – laivo ilgis ties vaterlinija;

$\Delta$  – masinė laivo vandentalpa.

Per ilgą laiką yra sukaupta analizės metodų, duomenų, prieinamų laivų projektuotojams ir analitikams pagal standartines korpuso formų serijas. Bet duomenys rinkti ilgą laiką ir iš daugelio pasaulio šalių gali turėti įtakos rezultatams, nes pastaraisiais metais pastebėtas žymus laivų korpusų progresas. Todėl ITTC pradėjo vadovauti eksperimentinių programų bendradarbiavimui tarp buksyravimo baseinų visame pasaulyje.

### ITTC-57 metodas

Buksyruojame modelį pastoviu greičiu nuo pradinio greičio iki numatytojo ir išmatuojame visą pasipriešinimą. Iš testavimų rezultatų apskaičiuojame viso pasipriešinimo koeficientą  $C_{TM}$  kiekviename numatyta greityje pagal formulę:

$$C_{TM} = \frac{R_{TM}}{\frac{1}{2}\rho_M v_M^2 S_M}, \quad (6)$$

čia:  $R_{TM}$  – gautas visas modelio pasipriešinimas;

$\rho_M$  – vandens tankis;

$v_M$  – modelio greitis;

$S_M$  – modelio suvilgytas paviršiaus plotas.

Suskaičiuojame modelio trinties pasipriešinimo koeficientą  $C_{FM}$  pasinaudodami ITTC-57 modelinio laivo koreliacijos eilute kiekviename numatyta greityje pagal formulę:

$$C_{FM} = \frac{0,075}{(\log_{10} Re_M - 2)^2}. \quad (7)$$

Likusio pasipriešinimo koeficientas  $C_R$  yra vienodas tiek laivo modeliui, tiek projektuojamam laivui, jis skaičiuojamas kiekviename numatyta greityje pagal formulę:

$$C_R = C_{TM} - C_{FM}. \quad (8)$$

Suskaičiuojame projektuojamo laivo trinties pasipriešinimo koeficientą  $C_{FS}$  (lygiam paviršiui) pasinaudodami ITTC-57 modelinio laivo koreliacijos eilute kiekviename numatyta greityje pagal formulę:

$$C_{FS} = \frac{0,075}{(\log_{10} Re_S - 2)^2}. \quad (9)$$

Skaičiuojame viso pasipriešinimo koeficientą  $C_{TS}$  pagal formulę:

$$C_{TS} = C_{FS} + C_R. \quad (10)$$

Pridedame paviršiaus šiurkštumo pasipriešinimo koeficientą  $C_A$  įvertinant, kurio vertė gali kisti, bet numatyta yra  $C_A = 0,0004$ .

$$C_{TS} = C_{FS} + C_R + C_A. \quad (11)$$

Suskaičiuojame visą laivo pasipriešinimą  $R_{TS}$  kiekviename numatyta greityje pagal formulę:

$$R_{TS} = C_{TS} \frac{1}{2} \rho_S v_S^2 S_S. \text{ kN} \quad (12)$$

Šiuo metodu visas pasipriešinimas apskaičiuotas tik laivo korpusui be jokių išsikišusių dalių [15].

## ITTC-78 metodas

ITTC-78 yra ITTC-57 pakeitęs metodas, kuris vis dar yra vystomas. Buksyruojant modelį pastoviu greičiu nuo pradinio greičio iki numatytojo, išmatuojame visą pasipriešinimą. Iš testavimų rezultatų apskaičiuojame viso pasipriešinimo koeficientą  $C_{TM}$  kiekviename numatyta greityje pagal formulę:

$$C_{TM} = \frac{R_{TM}}{\frac{1}{2}\rho_M v_M^2 S_M}, \quad (13)$$

čia:  $R_{TM}$  – gautas visas modelio pasipriešinimas;

$\rho_M$  – vandens tankis;

$v_M$  – modelio greitis;

$S_M$  – modelio suvilgytas paviršiaus plotas.

Suskaičiuojame modelio trinties pasipriešinimo koeficientą  $C_{FM}$  pasinaudodami ITTC-57 modelinio laivo koreliacijos eilute kiekviename numatyta greityje pagal formulę:

$$C_{FM} = \frac{0,075}{(\log_{10} Re_M - 2)^2}. \quad (14)$$

Suskaičiuojame formos faktorių  $k$  iš testų (grubiai)  $0,12 < Fr < 0,2$ . ITTC turi savo metodą, bet labiau paplitęs yra Prohaskos metodas:

$$\frac{C_T}{C_F} = (1 + k) + y \frac{Fr^4}{C_F}, \quad (15)$$

čia:  $k$  = 3-D formos faktorius ( $1+k$  yra atidėjimas koordinačių  $C_T/C_F$  ašyse);

$y$  = koeficientas (linijos polinkio).

Suskaičiuojame likusio pasipriešinimo koeficientą  $C_R$  kiekviename numatyta greityje pagal formulę:

$$C_R = C_{TM} - (1 + k)C_{FM}. \quad (16)$$

Atkreipiame dėmesį, kad kaip ir ankstesniame ITTC-57 metode, taip ir šiame,  $C_R$  yra vienodas tiek modeliniam laivui, tiek projektuojamam laivui.

Suskaičiuojame laivo trinties pasipriešinimo koeficientą  $C_{FS}$  (lygiam paviršiui) pasinaudodami ta pačia ITTC-57 modelinio laivo koreliacijos eilute kiekviename numatyta greityje pagal formulę:

$$C_{FS} = \frac{0,075}{(\log_{10} Re_S - 2)^2}. \quad (17)$$

Skaiciuojame šiurkštumo norma  $C_A$  pagal formulę:

$$C_A = \left( 105 \left( \frac{k_s}{L_{wl}} \right)^{\frac{1}{3}} - 0,64 \right) \cdot 10^{-3}, \quad (18)$$

čia:  $k_s$  – paviršiaus šiurkštumo matas (numatytoji vertė –  $150 \cdot 10^{-6}$  m).

Suskaičiuojame oro pasipriešinimo koeficientą pagal formulę:

$$C_{AA} = \frac{A_{VT}}{1000S}, \quad (19)$$

čia:  $A_{VT}$  – suprojektuotas laivo priekio plotas virš vandens.

Suskaičiuojame visą laivo pasipriešinimo koeficientą  $C_{TS}$  pagal formulę:

$$C_{TS} = (1 + k)C_{FS} + C_R + C_A + C_{AA} + C_{App}, \quad (20)$$

čia:  $C_{App}$  – laivo korpuso išsikišusių dalių koeficientas.

Suskaičiuojame visą laivo pasipriešinimą  $R_{TS}$  kiekviename numatyta greityje pagal formulę:

$$R_{TS} = C_{TS} \frac{1}{2} \rho_S v_S^2 S_S. \text{ kN} \quad (21)$$

Skaičiuojant būtina įvertinti modelinių bandymų baseinų vandens temperatūrą [15].

## 2.5 Regresija pagrįsti metodai

Laivo pasipriešinimo predikcija pagrįsta statistinių regresijų metodais domėtasi daug metų. Vienas iš pagrindinių mokslininkų, kuris prisidėjo prie laivo pasipriešinimo prognozavimo naudojant regresijos analizes, tiek ant bet kurių modelių ar pilnų gabaritų laivų, buvo Holtropas.

### Holtropo ir Menneno metodas

$$R_T = (1 + k_1)R_F + R_W + R_B + R_{TR} + R_{APP}R_A, \text{ kN} \quad (22)$$

$R_T$  – visas pasipriešinimas;

$R_F$  – trinties pasipriešinimas iš ITTC-57;

$1+k_1$  – formos faktorius;

$R_W$  – bangavimo pasipriešinimas;

$R_B$  – bangavimo pasipriešinimas laivams su bulbu;

$R_{TR}$  – papildomas pasipriešinimas esant transui vandenyje;

$R_{APP}$  – laivo išsikišusių dalių pasipriešinimas;

$R_A$  – paviršiaus šiurkštumo pasipriešinimas.

Formos faktorius  $1+k$  apskaičiuojamas pagal formulę:

$$1 + k = c_{13} \left\{ 0,93 + c_{12} \left( \frac{B}{L_R} \right)^{0,92497} \cdot (0,95 - C_p)^{-0,521448} \cdot (1 - C_p + 0,0225lcb)^{0,6906} \right\}, \quad (23)$$

čia:  $C_p$  – išilginio pilnumo koeficientas;

$lcb$  – vandentalpos centro abscisė;

$L_R$  – atspindi bandymo atstumą, kuris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\frac{L_R}{L} = 1 - C_p + 0,06C_p lcb (4C_p - 1). \quad (24)$$

$$C_{12} = \left( \frac{T}{L} \right)^{0,2228446}, \text{ kai } \frac{T}{L} > 0,05. \quad (25)$$

$$C_{12} = 48,20 \left( \frac{T}{L} - 0,02 \right)^{2,078} + 0,479948, \text{ kai } \frac{T}{L} < 0,05. \quad (26)$$

$$C_{12} = 0,479948, \text{ kai } \frac{T}{L} < 0,02, \quad (27)$$

čia:  $T$  – vidutinė laivo grimzlė.

$$C_{13} = 1 + 0,003C_{stern}, \quad (28)$$

čia:  $C_{stern}$  – galimos reikšmės yra  $-10$ ,  $0$  ir  $+10$ , jeigu laivagalio korpuso forma yra V-formos, normali arba U-formos.

Suvilgyto paviršiaus plotą  $S$  galima apytiksliai apskaičiuoti formule:

$$S = L(2T + B)\sqrt{C_M} \left( 0,453 + 0,4425C_B - 0,2862C_M - \frac{0,003467B}{T} + 0,3696C_{WP} \right) + \frac{2,38A_{BT}}{C_B}, \quad (29)$$

čia:  $C_M$  – midelinio španhauto koeficientas;

$C_B$  – vandentalpos pilnumo koeficientas;

$C_{WP}$  – vaterlinijos ploto koeficientas;

$A_{BT}$  – bulbo skersinis pjūvio plotas, kur vandens paviršius kerta forštevenį.

Išsikišusių dalių pasipriešinimas  $R_{APP}$  gali būti nustatytas pagal formulę:

$$R_{APP} = 0,5\sigma v^2 S_{APP} (1 + k_2)_{eq} C_F, \text{ kN} \quad (30)$$

čia:  $S_{APP}$  – išsikišusių dalių suvilgytas paviršiaus plotas.

$1+k_2$  – išsikišusių dalių pasipriešinimo faktorius, parenkamas nuo 1,3-3 atsižvelgiant į vairo ir velenų išdėstymo padėtį.

$(1+k_2)_{eq}$  – apskaičiuojamas pagal formulę:

$$(1 + k_2)_{eq} = \frac{\sum(1+k_2)S_{APP}}{\sum S_{APP}}. \quad (31)$$

Bangavimo pasipriešinimas  $R_w$  nustatomas iš formulės:

$$R_w = c_1 c_2 c_5 \nabla \rho g \exp\{m_1 F_r^d + m_2 \cos(\lambda F_r^{-2})\}, \text{ kN} \quad (32)$$

$$c_1 = 2223105 c_7^{3,78613} \left(\frac{T}{B}\right)^{1,07961} (90 - i_E)^{-1,37565}. \quad (33)$$

$$c_7 = 0,229577 \left(\frac{B}{L}\right)^{0,33333}, \text{ kai } \frac{B}{L} < 0,11. \quad (34)$$

$$c_7 = \frac{B}{L}, \text{ jei } 0,11 < \frac{B}{L} < 0,25. \quad (35)$$

$$c_7 = 0,5 - \frac{0,0625L}{B}, \text{ jei } \frac{B}{L} > 0,25. \quad (36)$$

$c_2$  – bangavimo pasipriešinimo sumažinimo parametras dėl laivo bulbo, jis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$c_2 = \exp(-1,89\sqrt{c_3}). \quad (37)$$

$c_3$  – bangavimo pasipriešinimo įtakos koeficientas dėl laivo bulbo, jis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$c_3 = \frac{0,56A_{BT}^{1,5}}{\{BT(0,31\sqrt{A_{BT}+T_F-h_B})\}}, \quad (38)$$

čia:  $h_B$  – skersinis laivo centras;

$T_F$  – priekinė laivo grimzlė;

$A_{BT}$  – skersinis plotas virš kylio linijos.

$c_5$  – transinio laivagalio įtakos parametras, jis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$c_5 = 1 - \frac{0,48A_T}{BTC_M}, \quad (39)$$

čia:  $A_T$  – panirusio transo skersinis paviršiaus plotas.

Papildomi parametrai apskaičiuojami pagal formules:

$$\lambda = 1,446C_p - \frac{0,03L}{B}, \text{ kai } \frac{L}{B} < 12. \quad (40)$$

$$\lambda = 1,446C_p - 0,036, \text{ kai } \frac{L}{B} > 12. \quad (41)$$

$$m_1 = \frac{0,0140407L}{T} - \frac{1,75254\sqrt[3]{L}}{L} - \frac{4,79323B}{L} - c_{16}. \quad (42)$$

$$c_{16} = 8,07981C_p - 13,8673C_p^2 + 6,984388C_p^3, \text{ kai } C_p < 0,8. \quad (43)$$

$$c_{16} = 1,73014 - 0,7067C_p, \text{ kai } C_p > 0,8. \quad (44)$$

$$m_2 = c_{15}C_p^2 \exp(-0,1F_r^{-2}). \quad (45)$$

$$c_{15} = -1,69385, \text{ kai } \frac{L^3}{V} < 512. \quad (46)$$

$$c_{15} = 0, \text{ kai } \frac{L^3}{V} > 1727. \quad (47)$$

$$c_{15} = -1,69385 + \frac{\frac{L}{V} - 8}{2,36}, \text{ kai } 512 < \frac{L^3}{V} < 1727. \quad (48)$$

$$d = -0,9.$$

$$i_E = 1 + 89 \exp \left\{ - \left( \frac{L}{B} \right)^{0,80856} (1 - C_{WP})^{0,30484} (1 - C_p - 0,0225lcb)^{0,6367} \left( \frac{L_R}{B} \right)^{0,34574} \left( \frac{100V}{L^3} \right)^{0,16302} \right\}. \quad (49)$$

$R_B$  – bangavimo pasipriešinimas laivams su bulbu skaičiuojamas pagal formulę:

$$R_B = \frac{0,11 \exp(-3P_B^{-2}) F_{ri}^3 A_{BT}^{1,5} \rho g}{1 + F_{ri}^2}. \text{ kN} \quad (50)$$

$P_B$  – laivapriekio iškilimo dydžio koeficientas, kuris skaičiuojamas pagal formulę:

$$P_B = \frac{0,56\sqrt{A_{BT}}}{T_F - 1,5h_B}. \quad (51)$$

$F_{ri}$  – Frūdo skaičius pagrįstas laivapriekio panirimu, jis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$F_{ri} = \frac{v}{\sqrt{g(T_F - h_B - 0,25\sqrt{A_{BT}}) + 0,15V^2}}. \quad (52)$$

$R_{TR}$  – papildomas pasipriešinimas dėl panirusio transo, kuris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$R_{TR} = 0,5\rho v^2 A_T c_6. \text{ kN} \quad (53)$$

$c_6$  – Frūdo skaičiaus ir panardinto transo koeficientas, kuris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$c_6 = 0,2(1 - 0,2F_{rT}), \text{ jei } F_{rT} < 5. \quad (54)$$

$$c_6 = 0, \text{ jei } F_{rT} \geq 5. \quad (55)$$

$$F_{rT} = \frac{v}{\sqrt{\frac{2gA_T}{B + BC_{WP}}}}. \quad (56)$$

$R_A$  – modelinio laivo pasipriešinimas įvertinantis paviršiaus šiurkštumą, kuris skaičiuojamas pagal formulę:

$$R_A = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_A. \text{ kN} \quad (57)$$

$C_A$  – paviršiaus šiurkštumo koeficientas, jis skaičiuojamas pagal formulę:

$$C_A = 0,006(L + 100)^{-0,16} - 0,00205 + 0,003 \sqrt{\frac{L}{7,5}} C_B^4 c_2 (0,04 - c_4). \quad (58)$$

$$c_4 = \frac{T_p}{L}, \text{ jei } \frac{T_p}{L} \leq 0,04. \quad (59)$$

$$c_4 = 0,04, \text{ jei } \frac{T_p}{L} > 0,04. \quad (60)$$

## 2.6 Modelinių bandymų metodai

Modeliniai bandymai atliekami specialiose hidroaerodinaminėse laboratorijose. Šiose laboratorijose yra modeliuojamas arba tiesioginis judėjimas (tiriamąjį objekto modelis juda vandenyje ar ore), arba atvirkštinis judėjimas (objekto modelis stovi vietoje, o jį apteka srautas). Tiesioginis judėjimas modeliuojamas bandymu baseinuose, o atvirkštinis – hidrolatakuose, aerodinaminiuose vamzdžiuose. Modeliniai bandymai atliekami testuojant konkretaus laivo modelį. Šie bandymai yra patikimi, brangūs ir užtrunka ganėtinai daug laiko. Modelinių bandymų pagrindiniai reikalavimai:

1. Geometrinis panašumas (tokia pati forma)
2. Dinaminis panašumas (masės pasiskirstymas, hidroelastiškumas)
3. Kinematinis panašumas (greičio mastelis atitinkamomis sąlygomis, turbulencija)

Modelio dydžio pasirinkimas:

1. Didelis modelis:
  - Leidžia išvengti arba sumažinti mastelinį efektą;
  - Leidžia testuoti su visa įranga (tam tikros masės);
2. Mažas modelis:
  - Leidžia išvengti arba sumažinti bangos atspindėjimo nuo sienelės problemas;
  - Galimybė ištestuoti maksimaliu greičiu, kokia yra numatyta tempimo įrangoje;
  - Sumažina kaštus.

Reikalavimai modelio korpusui:

1. Labai tiksliai išlenktas korpusas
2. Labai glotnus korpusas
3. Įprastiems laivams korpuso dydis parenkamas pagal propelerio diametrą
4. Greitaeigiems laivams korpuso dydis parenkamas pagal maksimalų tempimo įrangos greitį ir minimalų svorį.

## 2.7 Skaičiuojamųjų skysčių dinamika (CFD)

Šių dienų hidrodinamikos mokslo pasiekimai ir kompiuterinės technikos išsivystymo lygis leidžia pakeisti fizinių modeliavimą matematiniu – jau galima apskaičiuoti ir vizualizuoti laivo judėjimą, esant skirtingoms aplinkos sąlygoms (bangavimas, vėjas, srovės ir t.t.). Daugiausia tai yra skaičiuojamosios skysčių dinamikos modeliavimo programos (CFD). Naudojant CFD kompiuterinius programinius paketus, įmanoma itin detalai nustatyti ir vizualiai pateikti vandens tėkmę aplink laivą arba jo konstrukcijas (vairus, sraigtus ir kt.). Šios programos naudojamos nagrinėjant teorines ir eksperimentines hidrodinamikos problemas.

Skaičiuojamoji skysčių dinamika prasideda nuo vienos pagrindinės Navier Stokes (toliau NS) lygties. Ši lygtis yra susieta su netiesine diferencialine lygtimi, kuri aprašo srautą.

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + f. \quad (61)$$

Pirmoji prielaida yra ta, jog skystis yra nespūdas, kas veda prie kitos skysčio masės išsaugojimo lygties.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (62)$$

čia:  $\rho$  – tankis, kg/m<sup>3</sup>;

$\mu$  – trinties koeficientas, kuris aprašo klampumą;

$f$  – yra išorinės masės jėgos arba svorio jėga.

NS lygtis yra skysčio impulso išsaugojimas pagal antrąjį Niutono dėsnį. Tam, kad NS lygtis būtų arčiau skaitmeninio sprendimo, ji pertvarkoma pagal RANSE lygtį:

$$\rho \bar{v} \cdot \nabla \bar{v} = -\nabla \bar{p} + \mu \nabla^2 \bar{v} + \bar{f} - \rho \nabla \bar{v} \bar{v}. \quad (63)$$

Tolesnis formulės pertvarkymas susijęs su trinties jėgos ir potencialaus srauto supaprastinamu ir aprašoma srauto greičio potencialo arba Laplace lygtimi:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0. \quad (64)$$

Jeigu išorines jėgas sudaro tik svorio jėga, lygtimi galima užrašyti taip:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} (\nabla \varphi)^2 - gz + \frac{1}{\rho} p = \text{const.} - \text{išraiška gerai žinoma ir vadinama Bernoulli lygtimi.}$$

Egzistuoja du pagrindiniai CFD skysčio dinamikos skaičiavimo metodai: ribinių ir baigtinių elementų metodai. Abu elementai išskaido skystį į daugybę elementų, kurie aprašomi lygtimis. Ribinių elementų metodas naudojamas skysčio srauto potencialui skaičiuoti, o baigtinių elementų metodas naudojamas RANSE skaičiavimams. RANSE naudojamas apskaičiuoti srautui aplink laivo korpusą. Baigtinių elementų metodas arba tinklelio metodas yra universaliausias ir yra pagrįstas baigtinių elementų skirtumu. Baigtinių elementų skirtumą sudaro tinklelis, kuris apima tiriamąją sritį. Nuo sudaryto tinklelio tankio ir formos priklauso rezultatų patikimumas. Jeigu sudarytas retas ir netikslus tinklelis, tai ir rezultatai gali turėti dideles paklaidas [16].

### 3. EKSPERIMENTO APLINKOS SUKŪRIMAS BET KOKIOS FORMOS KATAMARANŲ PASIPRIEŠINIMUI SKAIČIUOTI NAUDOJANT CFD

Pradiniame projektavimo etape labai svarbu nustatyti preliminarų vandens pasipriešinimą katamaranui, jeigu norima įvertinti eksploatacijos kaštus. Remiantis preliminariais duomenimis pradiniame laivo projektavimo etape išlieka galimybė optimizuoti laivo korpusą. Tačiau norint apskaičiuoti vandens pasipriešinimą projektuojamam katamaranui, reikalinga metodika. Tokia metodika gali būti pagrįsta atliekant katamaranų eksperimentinius tyrimus įvertinant likusį pasipriešinimą ir suskirstant jį į grupes, pagal pagrindinius katamarano korpuso parametrus, klirensą ir greitį.

#### 3.1 Katamaranų vandens pasipriešinimo tiriamoji skaičiavimo metodika virškritinių greičių diapazone

Metodika yra pagrįsta skaičiuojant likusį pasipriešinimą, kuris yra suskirstytas į dedamąsias pagal laivo korpuso parametrus, klirensą ir greitį. Klirensas (horizontalus) – tai katamarano korpusų atstumas ties vaterlinija (matuojamas atstumas tarp vidinių bortų metrais), o santykinis klirensas  $\bar{C}$  yra bedimensinis dydis ir apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\bar{C} = \frac{C}{2B}, \quad (65)$$

čia:  $C$  – klirensas, m;

$B$  – korpusų plotis, m.

Pilnas vandens pasipriešinimas  $R_T$  apskaičiuojamas metodikoje pateikta formule:

$$R_T = \frac{1}{2} \rho S (C_{FR} + C_A) v^2 + R_R + R_{APP}, \text{ kN} \quad (66)$$

čia:  $\rho$  – vandens tankis;

$S$  – suvilgytas paviršiaus plotas;

$C_{FR}$  – trinties pasipriešinimo koeficientas;

$C_A$  – korpuso paviršiaus šiurkštumo koeficientas;

$R_R$  – likęs pasipriešinimas;

$R_{APP}$  – išsikišusių dalių pasipriešinimas

Trinties pasipriešinimo koeficientas  $C_{FR}$  apskaičiuojamas pagal metodikoje pateiktą formulę:

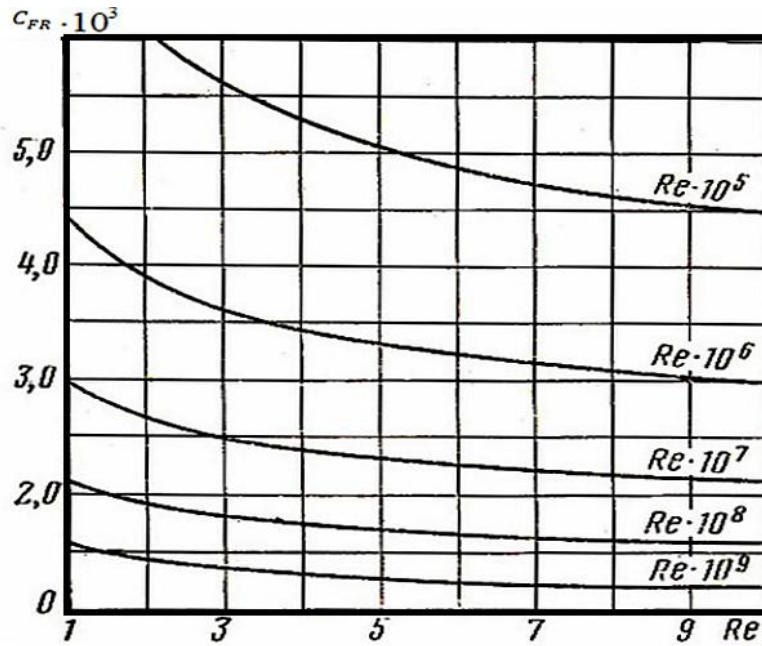
$$C_{FR} = \frac{0,455}{(\log Re)^{2,58}}, \quad (67)$$

čia: Reinoldso skaičius  $Re$  parenkamas iš grafiko 8 pav. arba apskaičiuojamas pagal formulę:

$$Re = \frac{vL}{\vartheta}, \quad (68)$$

čia:  $\vartheta$  – vandens klampumo koeficientas, prie 4°C –  $1,57 \cdot 10^{-6}$ , o prie 15°C –  $1,14 \cdot 10^{-6}$ ;

$v$  – laivo greitis.



8 pav. Reinoldso skaičiaus priklausomybė nuo  $C_{FR}$  grafikas

Korpuso šurkštumo koeficientas  $C_A$  parenkamas iš 1 lentelės

1 lentelė. Korpuso šurkštumo koeficiento reikšmės

Katamarano tipas	Korpuso apkala	$C_A$ reikšmė
Krovininiai	Suvirintas plienas	$0,4-0,5 \cdot 10^{-3}$
Krovininiai	Suvirintas plienas su dideliu banguotumu	$0,6-0,9 \cdot 10^{-3}$
Greitaeigiai keleiviniai	Suvirintas iš lengvo lydinio arba paslepjamomis kniedėmis	$0,3-0,4 \cdot 10^{-3}$
Keleiviniai tranzitinio susisiekimo	Suvirintas plienas	$0,4-0,5 \cdot 10^{-3}$
Keleiviniai ekskursiniai	Suvirintas plienas	$0,5-0,7 \cdot 10^{-3}$
Keleiviniai vietinio ir priemiestinio susisiekimo	Suvirintas plienas	$0,4-0,6 \cdot 10^{-3}$
Keleiviniai	Suvirintas plienas su dideliu banguotumu	$0,6-1 \cdot 10^{-3}$
Buksyrai stūmikai didelės galios	Suvirintas plienas su dideliu banguotumu	$0,5-0,7 \cdot 10^{-3}$
Buksyrai stūmikai mažos galios	Suvirintas plienas	$0,6-0,8 \cdot 10^{-3}$
Techniniai		$0,7-1,2 \cdot 10^{-3}$

Apskaičiavus trinties koeficientą ir parinkus korpuso šurkštumo koeficientą galima apskaičiuoti trinties pasipriešinimą  $R_{FR}$  pagal formulę:

$$R_{FR} = \frac{1}{2} \rho S (C_{FR} + C_A). \quad (69)$$

Likęs pasipriešinimas  $R_R$  apskaičiuojamas pagal formulę:

$$R_R = \frac{1}{2} \rho S C_R v^2, \quad (70)$$

čia:  $C_R$  – likusio pasipriešinimo koeficientas, kuris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$C_R = C_R^{L/B} \cdot \chi_{B/T} \cdot \chi_\delta \cdot K_C, \quad (71)$$

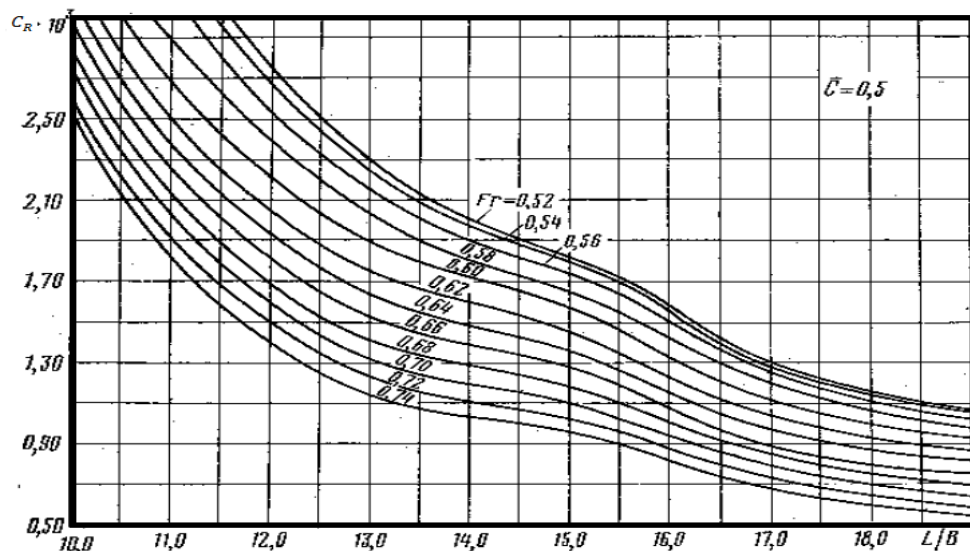
čia:  $C_R^{L/B}$  – likusio pasipriešinimo koeficientas, kuris priklauso nuo santykio L/B;

$\chi_{B/T}$  – dydis įtakojantis likusio pasipriešinimo koeficientą dėl santykio B/T (T – laivo grimzlė);

$\chi_\delta$  – dydis įtakojantis likusio pasipriešinimo koeficientą dėl vandentalpos pilnumo koeficiento.

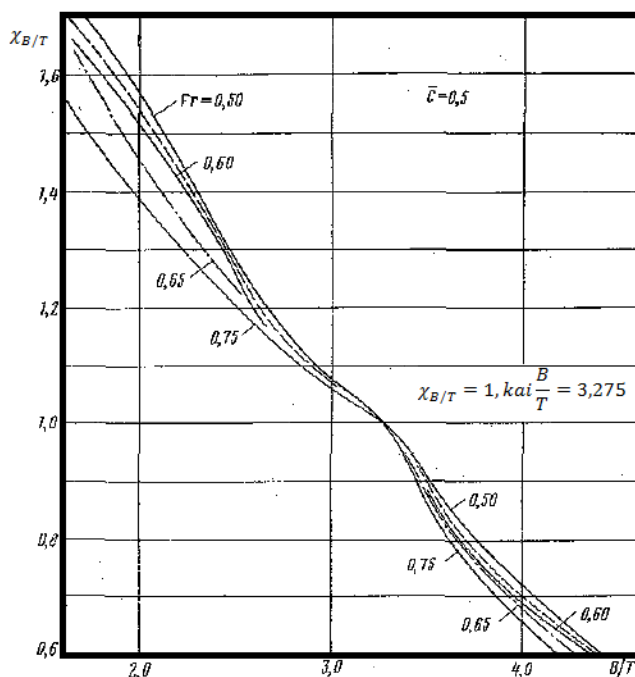
$K_C$  – klirenso kitimo poveikio koeficientas likusiam pasipriešinimui virškritinių greičių diapazone.

Likusio pasipriešinimo koeficientas  $C_R^{L/B}$ , kuris priklauso nuo santykio L/B imamas iš grafiko pavaizduoto 9 pav.



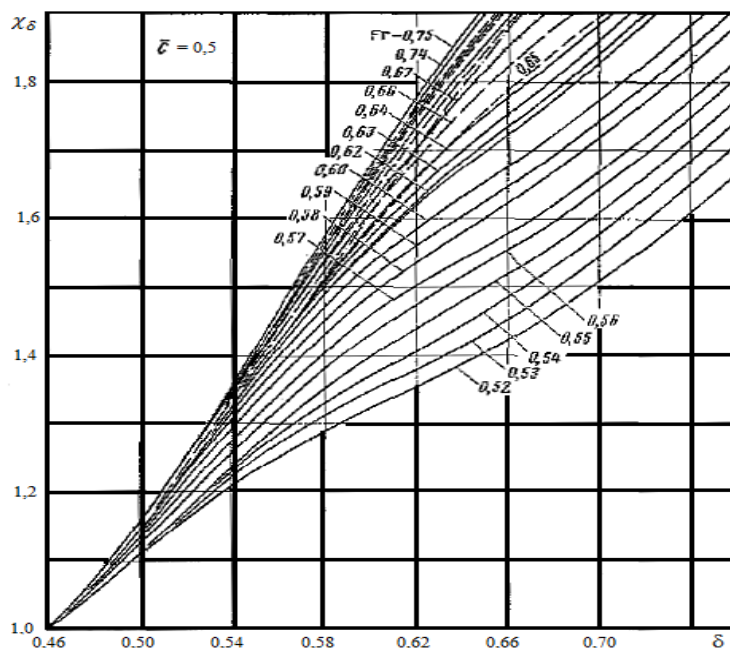
9 pav.  $C_R^{L/B}$  priklausomybės nuo L/B reikšmių grafikas

Dydis įtakojantis likusio pasipriešinimo koeficientą  $\chi_{B/T}$  dėl santykio B/T imamas iš grafiko pavaizduoto 10 pav.



10 pav.  $\chi_{B/T}$  priklausomybės nuo B/T reikšmių grafikas

Dydis įtakojantis likusio pasipriešinimo koeficientą  $\chi_\delta$  dėl vandentalpos pilnumo koeficiento imamas iš grafiko pavaizduoto 11 pav.



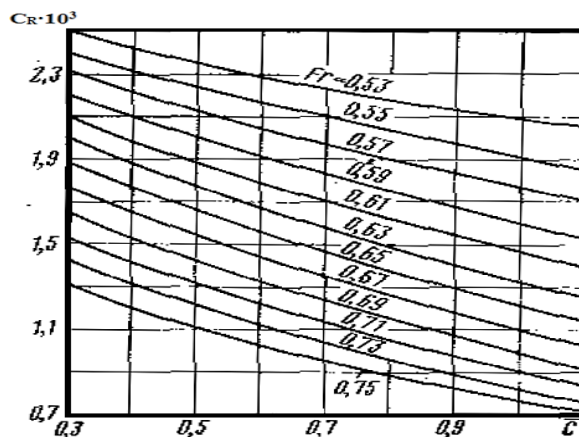
11 pav.  $\chi_\delta$  priklausomybės nuo  $\delta$  reikšmių grafikas

9-11 pav. duomenų grafikai yra pavaizduoti esant santykiniam klirensui 0,5. Visi kiti duomenų grafikai santykiniams klirensams 0,7 ir 0,9 yra pateikti 1 priede.

Klirenso kitimo poveikio koeficientas  $K_C$  likusiam pasipriešinimui virškritinių greičių diapazone apskaičiuojamas pagal formulę:

$$K_C = \frac{C_{R(9 \text{ pav. arba } 1 \text{ priedas})}}{C_{R(12 \text{ pav.})}} \quad (72)$$

Kadangi duomenys grafikuose yra pateikti esant santykiniam klirensui būtent 0,5, 0,7 ir 0,9 negalima tiksliai nusakyti kokie rezultatai būtų esant santykiniam klirensui 0,53, 0,75, 0,8 ir t.t. Tam naudojamas koeficientas  $K_C$ , kuris įvertina galimą nuokrypį nuo eksperimentinių tyrimų rezultatų. Skaitiklis imamas iš arčiausiai esančio santykinio klirenso grafiko, o vardiklis iš 12 pav. esančio grafiko.



12 pav. Likusio pasipriešinimo priklausomybė nuo santykinio klirenso reikšmių grafikas

Išsikišusių dalių pasipriešinimas  $R_{APP}$  skaičiuojamas pagal formulę:

$$R_{APP} = \frac{1}{2} \rho S C_{APP} v^2, \text{ kN} \quad (73)$$

čia:  $C_{APP}$  – išsikišusių dalių pasipriešinimo koeficientas, parenkamas iš 2 lentelės.

2 lentelė. Išsikišusių dalių pasipriešinimo koeficiento reikšmės

Katamarano tipas	$C_{APP}$ reikšmė
Vidaus vandenų	$0,05-0,10 \cdot 10^{-3}$
Keleiviniai	$0,15 \cdot 10^{-3}$
Kroviniai	$0,10 \cdot 10^{-3}$

Visas pasipriešinimas gali būti apskaičiuojamas pagal formulę:

$$R_T = \frac{1}{2} \rho S C_T v^2, \text{ kN} \quad (74)$$

čia:  $C_T$  – viso pasipriešinimo koeficientas, kuris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$C_T = C_R + C_{FR} + C_A + C_{APP}. \quad (75)$$

Metodikoje yra pateikti laivo pagrindiniai duomenys ir gauti rezultatai, jie bus lyginami su pagalbinio įrankio skaičiavimo rezultatais. Metodikos pagrindiniai laivo duomenys pateikti 3 lentelėje.

3 lentelė. Pagrindiniai metodikos laivo parametrai

Parametras	Reikšmė
L	41m
B	2,3m
T	0,82m
$\delta$	0,487
C	3,35m
$\bar{C}$	0,73
S	$215\text{m}^2$
L/B	17,8
B/T	2,8
$C_A$	$0,3 \cdot 10^{-3}$
$C_{APP}$	$0,15 \cdot 10^{-3}$

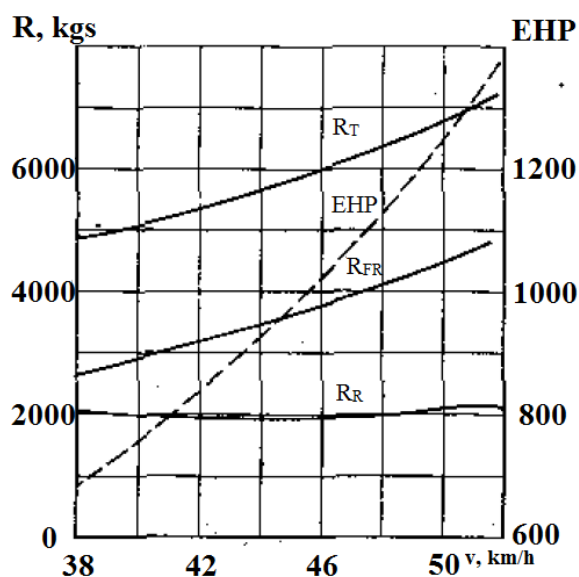
Skaičiuojamieji laivo greičiai:  $v = 10,63; 11,03; 11,63; 12,02; 12,63; 13,03; 13,63; 14,03; 14,43$  m/s.

Metodikoje pateikti eksperimentiniai rezultatai pavaizduoti 4 lentelėje.

4 lentelė. Metodikos eksperimentiniai rezultatai

Parametras	Frūdo skaičius								
	0,53	0,55	0,58	0,60	0,63	0,65	0,68	0,70	0,72
$v, m/s$	10,63	11,03	11,63	12,02	12,63	13,03	13,63	14,03	14,43
$C_R^{L/B} \cdot 10^3$	1,155	1,100	0,985	0,920	0,843	0,790	0,740	0,715	0,690
$\chi_{B/T}$	1,20	1,312	1,275	1,275	1,275	1,282	1,275	1,282	1,265
$\chi_\delta$	1,065	1,057	1,065	1,065	1,080	1,085	1,105	1,115	1,120
$K_c$	0,992	0,990	0,988	0,986	0,982	0,980	0,980	0,980	0,975
$C_R \cdot 10^3$	1,615	1,514	1,320	1,232	1,140	1,074	1,023	1,000	0,950
$R_R, kgs$	2000	2010	1955	1950	1987	1996	2073	2160	2167
$Re \cdot 10^{-8}$	2,77	2,88	3,03	3,14	3,30	3,40	3,56	3,66	3,77
$C_{FR} \cdot 10^3$	1,854	1,845	1,830	1,820	1,808	1,800	1,790	1,783	1,775
$(C_{FR} + C_A) \cdot 10^3$	2,154	2,145	2,130	2,120	2,108	2,100	2,090	2,083	2,075
$R_{FR}, kgs$	2670	2840	3150	3355	3680	3900	4240	4500	4730
$C_T \cdot 10^3$	3,919	3,809	3,600	3,502	3,398	3,324	3,263	3,233	3,175
$R_T, kgs$	4860	5050	5330	5550	5930	6180	6630	6980	7240
EHP	688	743	827	890	998	1073	1200	1307	1391

Visi rezultatai buvo peržvelgti ir perskaičiuoti, kad būtų išvengta spausdinimo klaidų, kurios galėtų turėti didelės įtakos viso eksperimento eigai. Grafinis rezultatų vaizdas pateikiamas 13 pav. [17].



13 pav. Grafinis metodikos rezultatų vaizdas

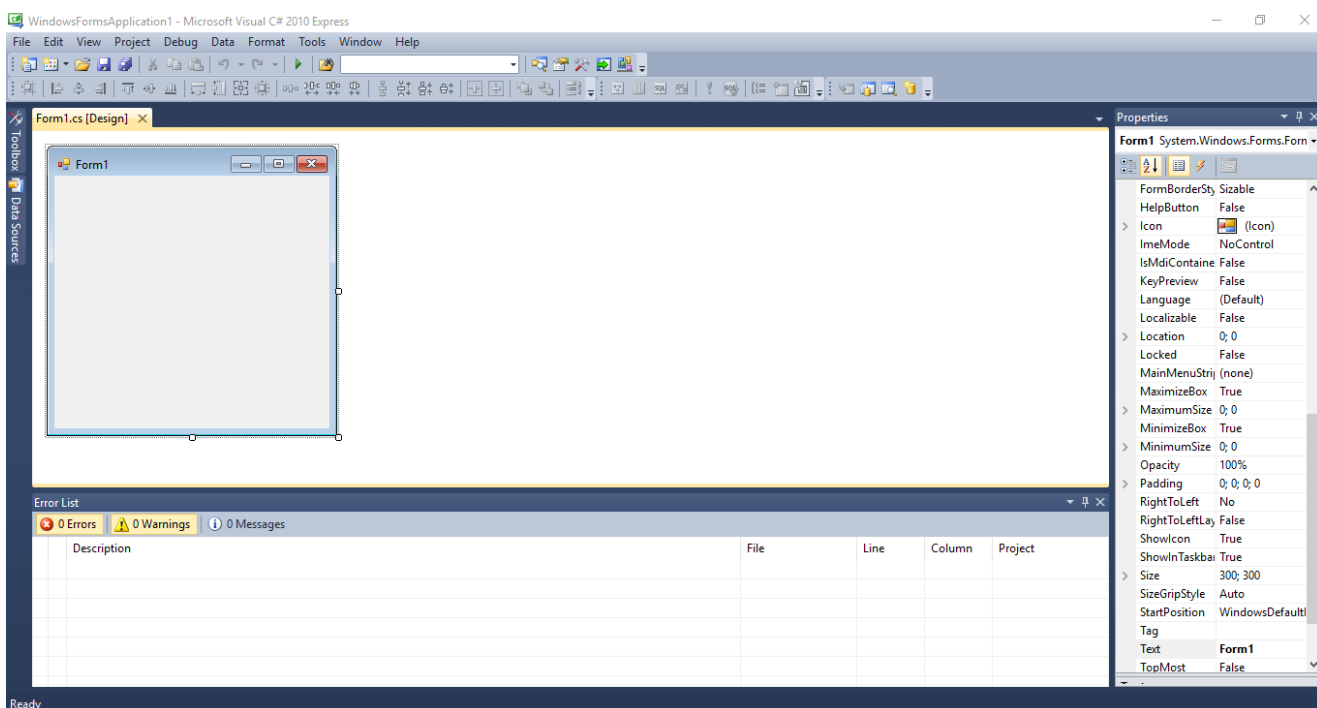
### 3.2 Katamaranų pasipriešinimo skaičiavimo pagalbinio įrankio sukūrimas pagal tiriamąją metodiką

Pagalbinis įrankis yra kuriamas tam, kad apskaičiuotų laivo pasipriešinimą daug greičiau, patogiau ir išsamiau, nes naudojant knygoje ar straipsnyje publikuotą metodiką sugaištame daug laiko reikšmių suradimui grafikuose, skaičiavimams, o norint gauti išsamią metodikos informaciją reikia atlikti daug papildomų veiksmų.

Pagalbinis įrankis bus kuriamas C# kalba dėl 5 pagrindinių priežasčių:

1. Perspektyvumas
2. .NET Framework
3. GVS (grafinė vartotojo sąsaja) kūrimo patogumas ir našumas
4. Visiškai objektinė kalba
5. Patogi programavimo aplinka (Visual Studio) – efektyvūs pagalbininkai, klaidų aptikimas ir taisymas.

Supažindinimas su Visual Studio aplinka pavaizduotas 14 pav.



14 pav. Visual Studio programavimo aplinka

14 pav. pavaizduotą formą ištempiname, įterpiame papildomus programinius įrankius:

1. Teksto laukeliai (angl. TextBox);
2. Etiketės (angl. Label);
3. Mygtukai (angl. Button);

Išdėstome juos, suvedame atitinkamus parametrus, suteikiame reikalingus pavadinimus ir gauname vizualinę įrankio programinę atvaizdą 15 pav.

Klirensas  m  
 Santykinis klirensas   
 Laivo ilgis  m  
 Laivo plotis  m  
 Grimzlė  m  
 Suvilgyto pav. plotas  m<sup>2</sup>  
 δ   
 Vandens tankis ρ  kg/m<sup>3</sup>  
 Vandens klampumas φ  10<sup>-6</sup>

Eksperimentinis laivo greitis  
 km/h  m/s  kts  
 Gauti greičio diapazoną  
 Min  -  Max

Greitis

C šiurkštumo 10<sup>3</sup>  0,3.....1,2 C įsikišusių dalių 10<sup>3</sup>  0,05.....0,15

Frūdo skaičius	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
C liekamasis(L/B)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
x(B/T)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
xδ	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Kc	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
C liekamasis	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
R liekamasis, kN	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Reinoldso sk. 10 <sup>-8</sup>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
C trinties · 10 <sup>3</sup>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
C trinties + C šiurkštumo · 10 <sup>3</sup>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
R trinties, kN	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
C visas	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
R visas, kN	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
P, kW	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
P, AG	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

<->

15 pav. Pagalbinio įrankio formos vaizdas

Turint formą 15 pav. prasideda pagalbinio įrankio skaičiavimo metodikos programavimas, kuris suskirstytas dalimis ir aprašytas žemiau, o visas programinis kodas yra pateiktas 2 priede.

- **Pagrindinių laivo duomenų įvedimas**

Duomenys įvedami į baltai pažymėtus laukelius, skaitinėmis reikšmėmis. Įvedus klirensą šalia apskaičiuojamas ir atvaizduojamas *Santykinis klirensas* pagal 61 formulę. Duomenų įvedimo laukai pavaizduoti 16 pav.

Klirensas  m  
 Santykinis klirensas   
 Laivo ilgis  m  
 Laivo plotis  m  
 Grimzlė  m  
 Suvilgyto pav. plotas  m<sup>2</sup>  
 δ   
 Vandens tankis ρ  kg/m<sup>3</sup>  
 Vandens klampumas φ  10<sup>-6</sup>

16 pav. Pradinių duomenų įvedimo laukai

- **Laivo greičio įvedimas**

Po pagrindinių laivo duomenų suvedimo reikia parinkti laivo plaukimo greitį. Kad tai atliktume, pasirenkame prie *Eksperimentinis laivo greitis* norimą matavimo vienetą *km/h*, *m/s* ar *kts* (mazgai angl. knots) ir paspaudus *Gauti greičio diapazoną Min, Max* laukeliuose atvaizduojamas skaičiuotinas greičio diapazonas, pagal metodiką. Pagal gautą diapazoną vartotojas turi suvesti atitinkamus greičius, kuriais remiantis bus atliekami skaičiavimai. Greičio įvedimo laukai pavaizduoti 17 pav.

17 pav. Greičio įvesties laukai

- **Šiurkštumo ir išsikišusių dalių koeficientų įvedimas**

Šiurkštumo koeficientas  $C_{\text{šiurkštumo}}$  parenkamas iš lentelės 18 pav. lentelių duomenys yra paimti ankščiau minėtos metodikos 1 lentelės pagal katamarano išorinio korpuso paviršių bei katamarano tipą.

C šiurkštumo $10^{-3}$ <input type="text"/> 0,3.....1,2		
Katamarano tipas	Korpuso apkala	$C_A$ reikšmė
Krovininiai	Suvirintas plienas	$0,4-0,5 \cdot 10^{-3}$
Krovininiai	Suvirintas plienas su dideliu banguotumu	$0,6-0,9 \cdot 10^{-3}$
Greitaeigiai keleiviniai	Suvirintas iš lengvo lydinio arba paslepjamomis kniedėmis	$0,3-0,4 \cdot 10^{-3}$
Keleiviniai tranzitinio susisiekimo	Suvirintas plienas	$0,4-0,5 \cdot 10^{-3}$
Keleiviniai ekskursiniai	Suvirintas plienas	$0,5-0,7 \cdot 10^{-3}$
Keleiviniai vietinio ir priemiestinio susisiekimo	Suvirintas plienas	$0,4-0,6 \cdot 10^{-3}$
Keleiviniai	Suvirintas plienas su dideliu banguotumu	$0,6-1 \cdot 10^{-3}$
Buksyrai stūmikai didelės galios	Suvirintas plienas su dideliu banguotumu	$0,5-0,7 \cdot 10^{-3}$
Buksyrai stūmikai mažos galios	Suvirintas plienas	$0,6-0,8 \cdot 10^{-3}$
Techniniai		$0,7-1,2 \cdot 10^{-3}$

18 pav. C šiurkštumo įvesties laukas ir jo reikšmės

Išsikišusių dalių koeficientas  $C$  išsikišusių dalių parenkamas iš lentelės 19 pav. lentelių duomenys yra paimti ankščiau minėtos metodikos 2 lentelės pagal katamarano tipą.

C išsikišusių dalių $10^{-3}$ <input type="text" value="0,05"/> 0,05.....0,15	
<b>Katamarano tipas</b>	<b><math>C_{APP}</math> reikšmė</b>
Vidaus vandenu	$0,05-0,10 \cdot 10^{-3}$
Keleiviniai	$0,15 \cdot 10^{-3}$
Krovininiai	$0,10 \cdot 10^{-3}$

19 pav. C išsikišusių dalių įvedimo laukas ir jo reikšmių lentelė

- **Skaičiavimo rezultatų gavimas ir atvaizdavimas**

Suvedus ankščiau išvardintus punktus pagal metodikoje pateiktus laivo pradinis duomenis, paspaudę mygtuką *Skaičiuoti*, gauname programinio įrankio apskaičiuotus rezultatus 20 pav.

Input parameters:

- Klirensas: 3.35 m
- Santykinis klirensas: 0.73
- Laivo ilgis: 41 m
- Laivo plotis: 2.3 m
- Grimzlė: 0.82 m
- Suvilgyto pav. plotas: 215 m<sup>2</sup>
- δ: 0.487
- Vandens tankis ρ: 1 kg/m<sup>3</sup>
- Vandens klampumas φ: 1.57 · 10<sup>-6</sup>
- L/B: 17.83
- B/T: 2.8

Speed range: 10.42869 - 14.84082

Speed unit:  m/s

Resistance coefficient  $C$  šturkštumo  $10^3$ : 0.3

Greitis	10.63	11.03	11.63	12.03	12.63	13.03	13.63	14.03	14.43	14.8
Frūdo skaičius	0.53	0.55	0.58	0.6	0.63	0.65	0.68	0.7	0.72	0.74
C liekamasis(L/B)	1.173	1.111	1.002	0.934	0.854	0.809	0.757	0.727	0.705	0.676
x(B/T)	1.303	1.294	1.281	1.272	1.272	1.271	1.264	1.258	1.253	1.248
xδ	1.074	1.076	1.079	1.081	1.115	1.137	1.112	1.095	1.12	1.145
Kc	0.993	0.991	0.989	0.987	0.983	0.982	0.981	0.979	0.978	0.978
C liekamasis	1.631	1.534	1.369	1.267	1.19	1.149	1.043	0.981	0.968	0.945
R liekamasis, kgs	2020,06	2045,55	2030,25	2009,86	2081,24	2138,34	2124,07	2116,93	2209,73	2268,87
Reinoldso sk. $10^{-3}$	2.78	2.88	3.04	3.14	3.3	3.4	3.56	3.66	3.77	3.86
C trinties $10^3$	1.848	1.839	1.83	1.821	1.805	1.797	1.783	1.777	1.771	1.765
C trinties + C šturkštumo $10^3$	2.148	2.139	2.13	2.121	2.105	2.097	2.083	2.077	2.071	2.065
R trinties, kgs	2660,44	2853,17	3158,06	3365,06	3681,18	3902,45	4242,02	4481,65	4727,4	4957,86
C visas	3.929	3.823	3.649	3.538	3.445	3.396	3.276	3.208	3.189	3.16
R visas, kgs	4867,11	5098,58	5410,61	5612,52	6024,48	6320,2	6672	6921,83	7278,73	7587,71
P, kW	507	552	617	662	746	808	892	952	1030	1101
P, AG	680	740	828	888	1001	1083	1196	1277	1381	1477

20 pav. Programinio įrankio rezultatų vaizdavimas

Frūdo skaičius apskaičiuotas pagal programiškai aprašytą formulę:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}} \quad (76)$$

- C liekamas ( $L/B$ ),  $\chi(B/T)$  ir  $\chi(\delta)$  reikšmės buvo paimtos iš 9-11 pav. grafikų. Kad programa pati parinktų atitinkamą reikšmę, grafikai buvo perbraižomi AutoCad programa pasinaudojant *Spline* funkcija. Tada pagal tarpinius taškus buvo interpoliuojamos visos likusios reikšmės pasinaudojant Excel programinę įrangą ir *Spline* funkcijos priedu. Pagal Frūdo skaičių, santykius  $L/B$  ir  $B/T$  bei pilnumo koeficientą, programa priskiria atitinkamas reikšmes.
- $K_c$  reikšmės gaunamos programiškai aprašant 72 formulę, o vardiklio reikšmės analogišku būdu su AutoCad ir Excel interpoliuojamos ir programa priskiria reikšmę, atsižvelgdama į Frūdo skaičių, klirensą ir C liekamąjį ( $L/B$ ).
- C liekamas apskaičiuojamas programiškai aprašant 71 formulę.
- R liekamas apskaičiuojamas programiškai aprašant 70 formulę.
- Reinoldso skaičius buvo parenkamas iš metodikoje pateiktų duomenų. Tarpinės reikšmės buvo gautos pasinaudojant Excel programiniu įrankiu ir *Spline* skaičių interpoliacija. Programa parenka Reinoldso skaičių atsižvelgdama į trinties koeficientą  $C_{FR}$  (programoje *C trinties*). Pradinė Reinoldso ir  $C_{FR}$  priklausomybės duomenų lentelė pateikiama 3 priede.
- C trinties apskaičiuojamas programiškai aprašant formulę 67.
- C trinties + C šiurkštumo apskaičiuojamas programiškai aprašant C trinties ir C šiurkštumo sumą.
- R trinties apskaičiuojamas programiškai aprašant formulę 69.
- C visas apskaičiuojamas programiškai aprašant formulę 75.
- R visas apskaičiuojamas programiškai aprašant formulę 74.
- P apskaičiuojamas programiškai aprašant R visas ir greičio sandaugą.
- Programa turi galimybę konvertuoti matavimo vienetus kN į kgs ir atvirkščiai.

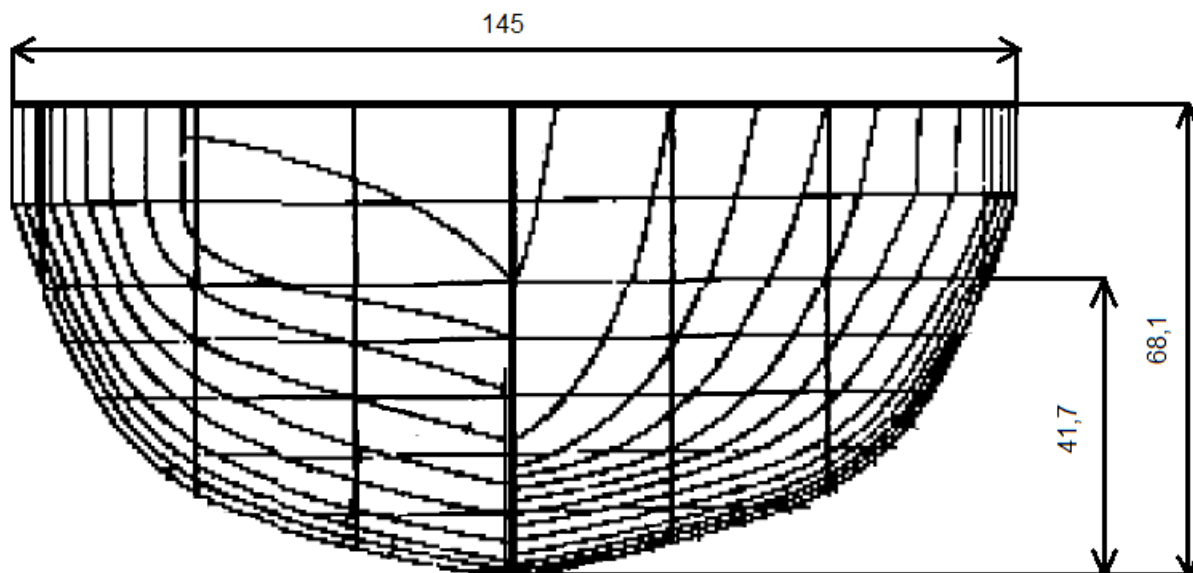
### 3.3 Laivo 3D modelio kūrimas pagal metodikoje pateiktą laivo teorinį brėžinį

Laivo 3D modeliavimą atliksime pasinaudodami DelftShip programine įranga. Delftship programa pasirinkta dėl 5 pagrindinių priežasčių:

- Bazinis programinis paketas yra nemokamas;
- Labai patogus naudojimui, nesudėtinga vartotojo sąsaja;
- Kūrėjų teigimu – labai tikslus;
- Galimybė patikrinti laivo sandarumą, tiksliau vandens praleidimo vietas (angl. *leak points*);
- Skaičiuoja hidrostazines charakteristikas.

Laivo teorinis brėžinys – tai laivo korpuso išorinio paviršiaus projekcijos į tris viena kitai statmenas plokštumas. Tai diametralioji plokštuma (vertikali išilginė), pagrindinė plokštuma

(horizontali plokštuma, kertanti kilio liniją) ir midelio španto plokštuma (vertikali skersinė plokštuma, sutampanti su dešimtu teoriniu špantu). Laivo korpuso teorinis brėžinys yra vienas pagrindinių techninių dokumentų. Juo naudojamosi rengiant laivo projektą, nustatant korpuso formą, įvertinant laivo jūrines savybes, sudarant darbo brėžinius, gaminant laivo korpuso konstrukcijas. Laivo teorinis brėžinys paimtas iš tiriamosios metodikos pavaizduotas 21 pav.



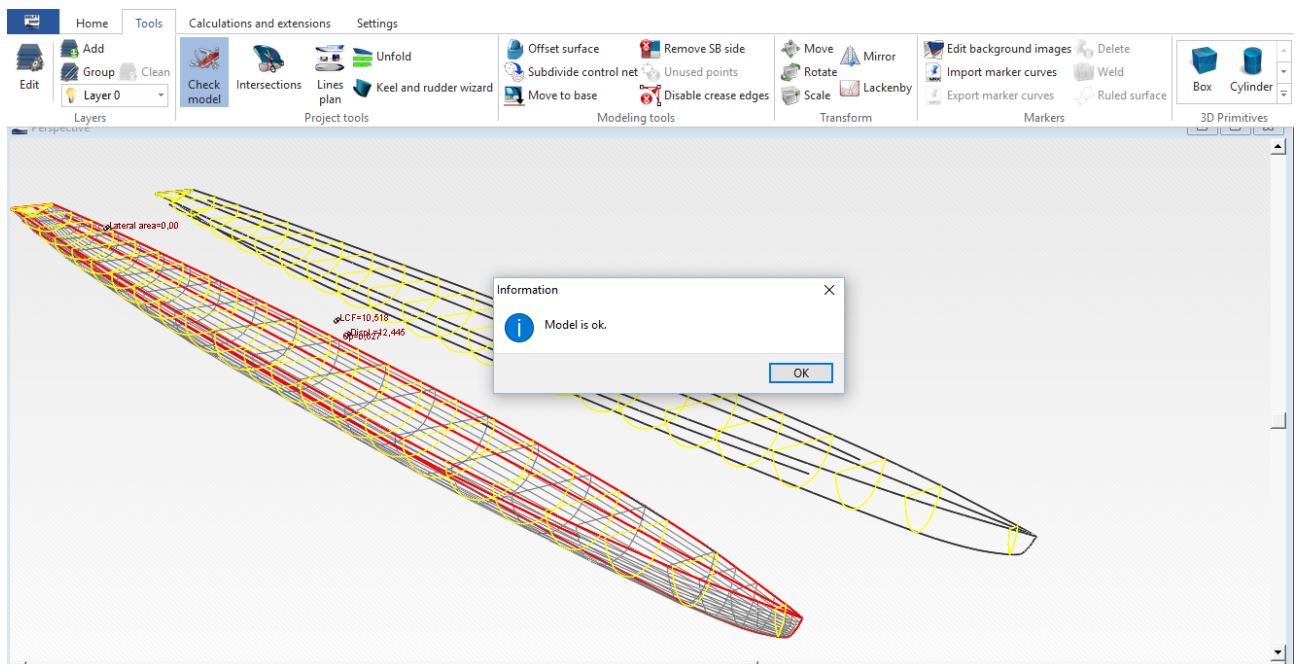
21 pav. Laivo teorinis brėžinys pagal tiriamąją metodiką

Pagal 21 pav. pavaizduotą laivo teorinį brėžinį (metodikoje nurodyta, kad  $L/B = 15$ ) pasinaudodami DelftShip programinę įrangą modeliuojame 3D laivą. Modeliavimo pradžioje įvedame pagrindinius laivo matmenis 22 pav.

General	Notes	Main particulars	Hydrostatics
Length		<input type="text" value="21,7500"/> (m)	
Beam		<input type="text" value="1,4500"/> (m)	
Draft		<input type="text" value="0,4170"/> (m)	
Midship location		<input type="text" value="10,8750"/> (m)	<input checked="" type="checkbox"/> Default at 0.5*L
Height base plane		<input type="text" value="0,0000"/> (m)	
Aft perpendicular		<input type="text" value="0,0000"/> (m)	
Long. reference point		<input type="text" value="Aft perpendicular"/> (v)	

22 pav. DelftShip pagrindinių matmenų įvedimas

Pagal teorinį brėžinį, pasinaudodami tinkleliu, suteikiame španhautams, laivagaliui ir laivaprieikiui formą. Gavus projektuojamo laivo korpuso formą patikriname, ar nėra vandeniui paralaidžių vietų pasinaudodami tikrinimo įrankiu *Tools > Check model* 23 pav.



23 pav. DelftShip 3D modelio španhautų formos ir modelio tikrinimas

Patikrinus modelį apskaičiuojame hidrostatinės charakteristikas pasinaudodami *Calculations and extensions > Design hydrostatics*. Detali ataskaita ir teorinis laivo brėžinys yra pateikiami 4 priede. Pagrindinės charakteristikos:

Laivo ilgis – 21,75 m;

Laivo plotis – 1,45 m;

Laivo grimzlė – 0,417 m;

Vandentalpa – 6,22x2 t;

Pilnumo koeficientas – 0,462

Išilginio pilnumo koeficientas – 0,627

Suvilgytas paviršiaus plotas – 29,06x2 m<sup>2</sup>.

Modeliuojant laivą pagal pateiktą teorinį brėžinį, buvo pastebėta, kad neatitinka vandentalpos koeficientas su duota dokumentacijoje. Buvo priimta išvada, kad laivą reikia praplatinti iki tinkamo vandentalpos koeficiento, manoma, kad galėjo būti įsivėlusį spausdinimo klaida. Atliekant tolimesnius skaičiavimus bus įvertinama ši paklaida. Visas sumodeliuoto laivo korpuso brėžinys pateiktas 5 priede.

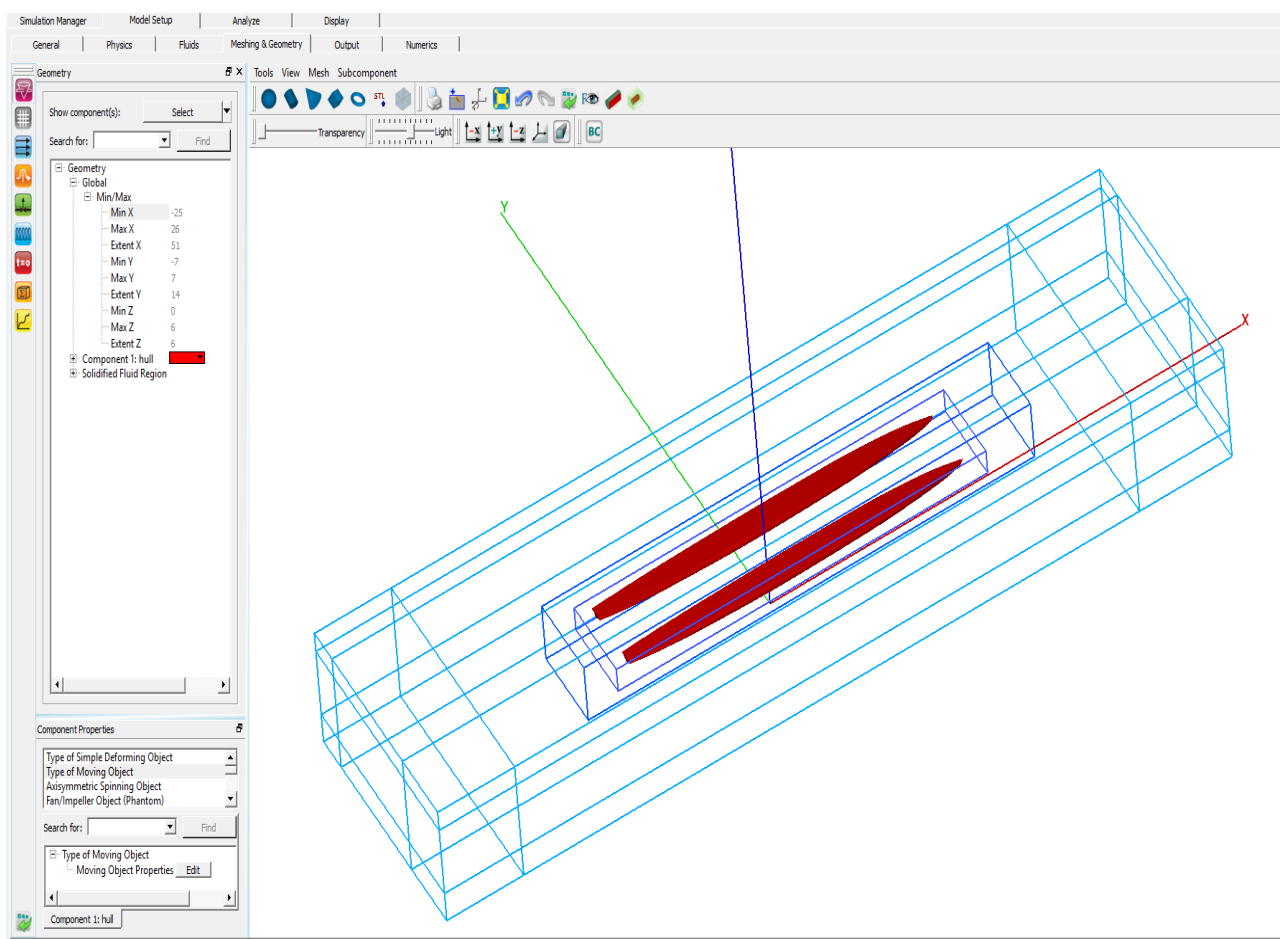
### 3.4 Sumodeliuoto laivo pasipriešinimo skaičiavimas naudojant Flow3D

Pasipriešinimo skaičiavimams atlikti pasirinkta Flow3D programinė įranga. Geometrinio modelio kūrimas buvo atliktas su DelftShip programa, todėl pasinaudojant ja eksportuojame laivo modelį į STL formatą, kuris bus naudojamas Flow3D. Nauja simuliacija Flow 3D programoje galima pradėti pasinaudojus įrankių *Add New simulation*.

Flow3D simuliacijos pagrindiniai nustatymai:

- Simulacijos trukmė *Finish time* – 41 s;
- Tekmės metodas *Flow mode* – nesuspaudžiamas *incompressible*;
- Skysčių skaičius *Number of fluid* – vienas skystis *one fluid*;
  - Vandens tankis –  $1000 \text{ kg/m}^3$
  - Vandens klampis – 0,001
- Simuliacijos matavimo vienetai *Simulation Units* – SI;
- Temperatūros matavimo vienetai *Temperature units* – Kelvinai;
- Versija *Version* – Dvigubas tikslumas *Double precision*;
- Procesorių skaičius *Number of processors* – Visi galimi procesoriai *All available processors*.

Įkeliame sumodeliuoto laivo korpusą STL formate paspausdami *Model Setup > Meshing and Geometry > Add Component* ir pasirenkame DelftShip eksportuotą STL failą. Įkelta geometrija pavaizduota 24 pav.



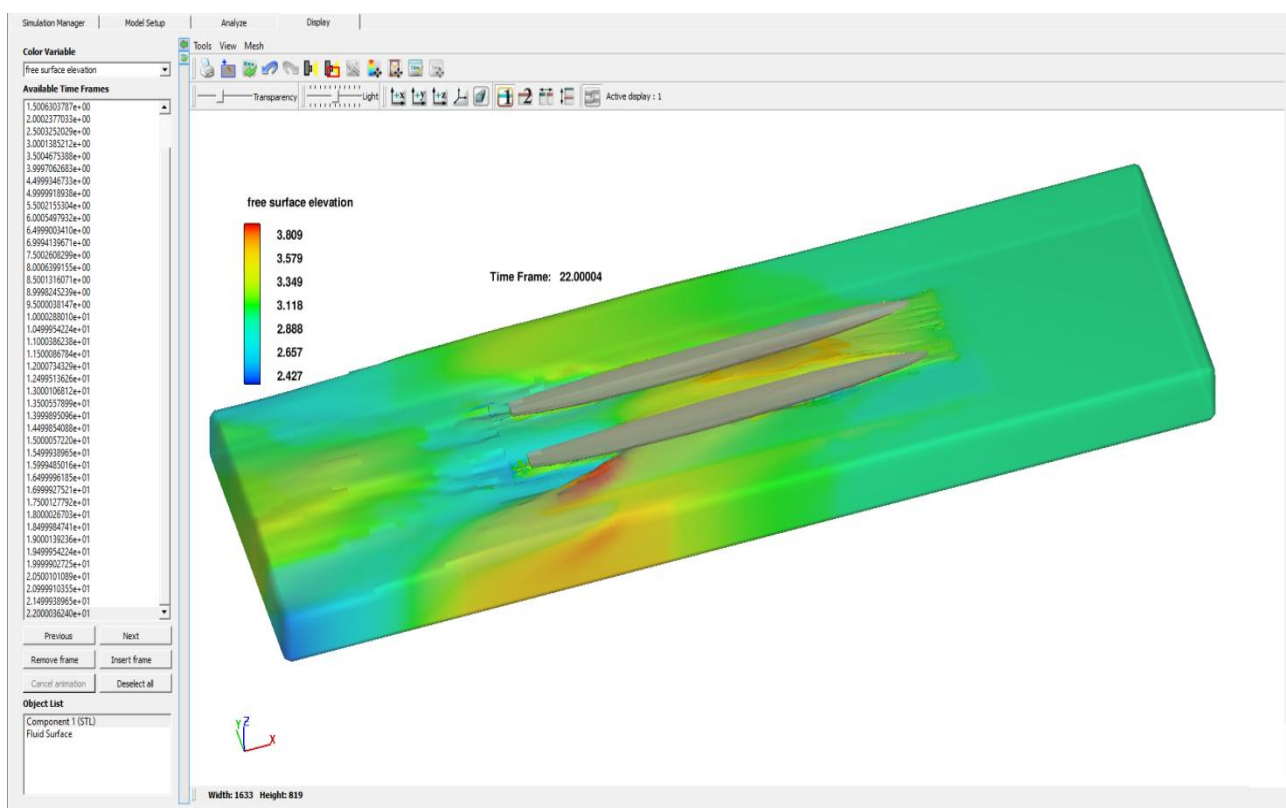
24 pav. Geometrijos atvaizdavimas su Flow3D

Nustatome tinklelių dydį ir celių skaičių:

- 1 tinklelio – dydis 0,4, viso celių 1000;
- 2 tinklelio – dydis 0,2, viso celių 1000;
- 3 tinklelio – dydis 0,05, viso celių 1000;

Uždavus modeliui tam tikrą greitį, parenkame, kad laivas galėtų judėti z ir y koordinatinių ašyse (nes tiriame virškritinių greičių diapazone, kai laivas pradeda glisuoti) ir paleidžiame simulaciją paspausdami *Simulate – Run simulation*.

Simuliacijos analizė pasinaudojant 3D vaizdu pavaizduota 25 pav. Matomas hidrodinaminis pėdsakas, laivapriekinės ir laivagalinės bangos, o pasipriešinimas skaičiuojamas ir įrašomas į tekstinį failą.



25 pav. Simuliacijos vaizdas naudojant Flow3D

Eksperimento metu buvo išanalizuota tiriamoji metodika [17], o pagal metodikoje pateiktus grafikus ir formules sukurtas programinis įrankis, kuris palengvina ir pagreitina vandens pasipriešinimo skaičiavimus. Sumodeliuotas 3D laivo modelis pagal metodikoje pateiktą laivo brėžinį ir atlikti 3D laivo modelio vandens pasipriešinimo skaičiavimai su programiniu įrankiu ir Flow3D.

## 4. SKAIČIAVIMO METODIKŲ REZULTATŲ PALYGINIMAS IR ANALIZĖ

Siekiant nustatyti ar eksperimento metu sukurta CFD aplinka pagal metodikoje pateiktus kriterijus yra tinkama skaičiuoti vandens pasipriešinimą, būtina įvertinti gautų rezultatų tikslumą. Pagalbinio programinio įrankio ir tiriamosios metodikos rezultatų tikslumas lemia programinio įrankio vartojamumą tolimesniems skaičiavimams, todėl būtina įvertinti galimą paklaidą.

Pagal pateiktus rezultatus tiriamojoje metodikoje iš 4 lentelės ir programinio įrankio skaičiavimo rezultatų pavaizduotų 20 pav. viso pasipriešinimo rezultatai pateikiami 5 lentelėje esant 9 skirtingiems laivo greičiams.

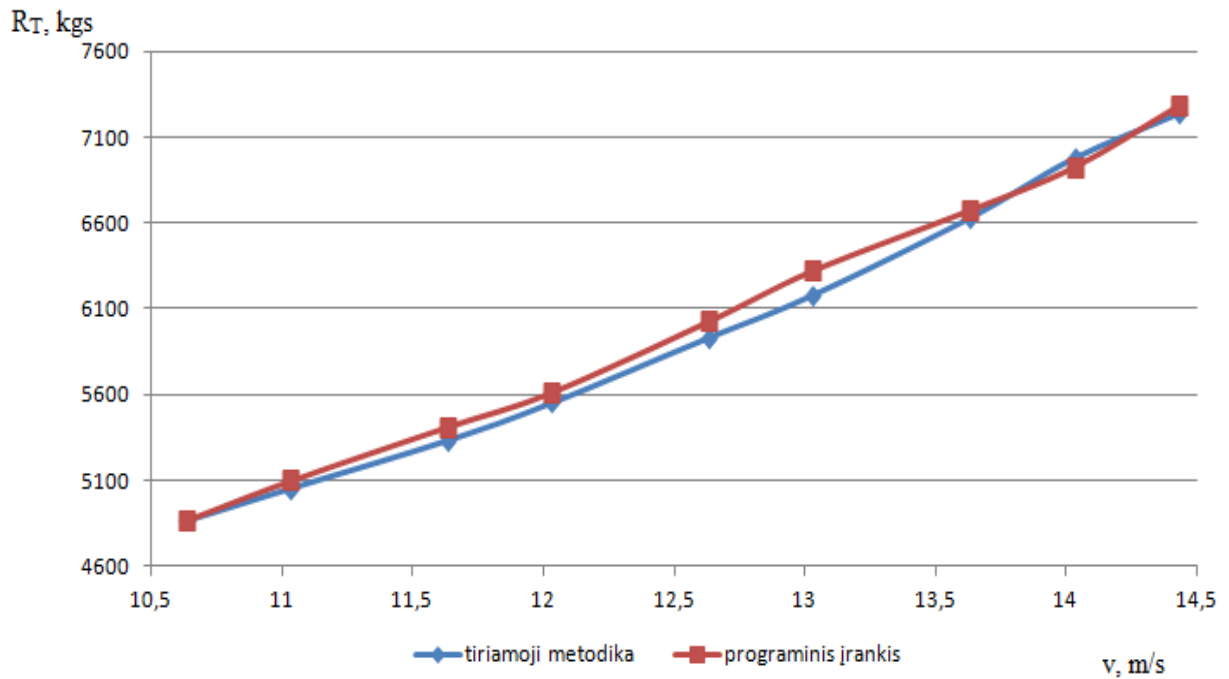
**5 lentelė. Tiriamosios metodikos ir programinio įrankio viso pasipriešinimo rezultatai**

Metodika	Laivo greitis, m/s								
	10,63	11,03	11,63	12,03	12,63	13,03	13,63	14,03	14,43
Tiriamoji metodika $R_T$ , kgs	4860	5050	5330	5550	5930	6180	6630	6980	7240
Prog. įrankis $R_T$ , kgs	4867	5099	5411	5613	6024	6320	6672	6922	7279

Iš 5 lentelėje pateiktų duomenų nustatyta, kad didžiausia paklaida yra 2,2%. Ši paklaida galėjo atsirasti dėl šių priežasčių:

1. Dėl Excel *Spline* skaičių interpoliacijos, pagal kurią buvo skaičiuojamos tarpinės grafikų reikšmės.
2. Dėl rezultatų suapvalinimo.
3. Dėl tikimybės, kad grafike galėjo įsivelti nedidelė klaida.
4. Naudojant AutoCad *Spline* funkciją buvo netiksliai išlenktos grafiko linijos.
5. Dėl grafikų spausdinimo kokybės trūkumo.

2,2% paklaida yra leistina, tam kad programinis įrankis būtų naudojamas skaičiuojant vandens pasipriešinimą remiantis tiriamąja metodika. Grafiškai atvaizduotame duomenų palyginime 26 pav. matome, kad programinio įrankio kreivė yra labai arti tiriamosios metodikos kreivės, tačiau skirtingo dėsningumo. Siekiant patobulinti programinį įrankį, būtina išanalizuoti dėsningumų skirtumus ir juos suvienodinti.



26 pav. Tiriamosios metodikos ir programinio įrankio duomenų palyginimo grafikas

CFD ir programinio įrankio rezultatų palyginimui buvo naudojamas DelftShip programa sumodeliuotas 3D laivo modelis pagal tiriamojoje metodikoje pateiktą laivo teorinį brėžinį. Klirensas – 2m, o pagal 3D modelio laivo plotį santykinis klirensas bus 0,69. Šis santykinis klirensas parinktas todėl, kad yra labai arti pateiktų  $C_R^{L/B}, \chi_{B/T}, \chi_\delta$  grafikų ( $\bar{C} = 0,7$ ) įvertinant duomenų patikimumą.

Flow3D ir programinio įrankio visi skaičiavimo rezultatai pateikti 6 ir 7 priede, o palyginamajai analizei viso pasipriešinimo rezultatai pateikti 6 lentelėje.

6 lentelė. Flow3D ir programinio įrankio viso pasipriešinimo rezultatai

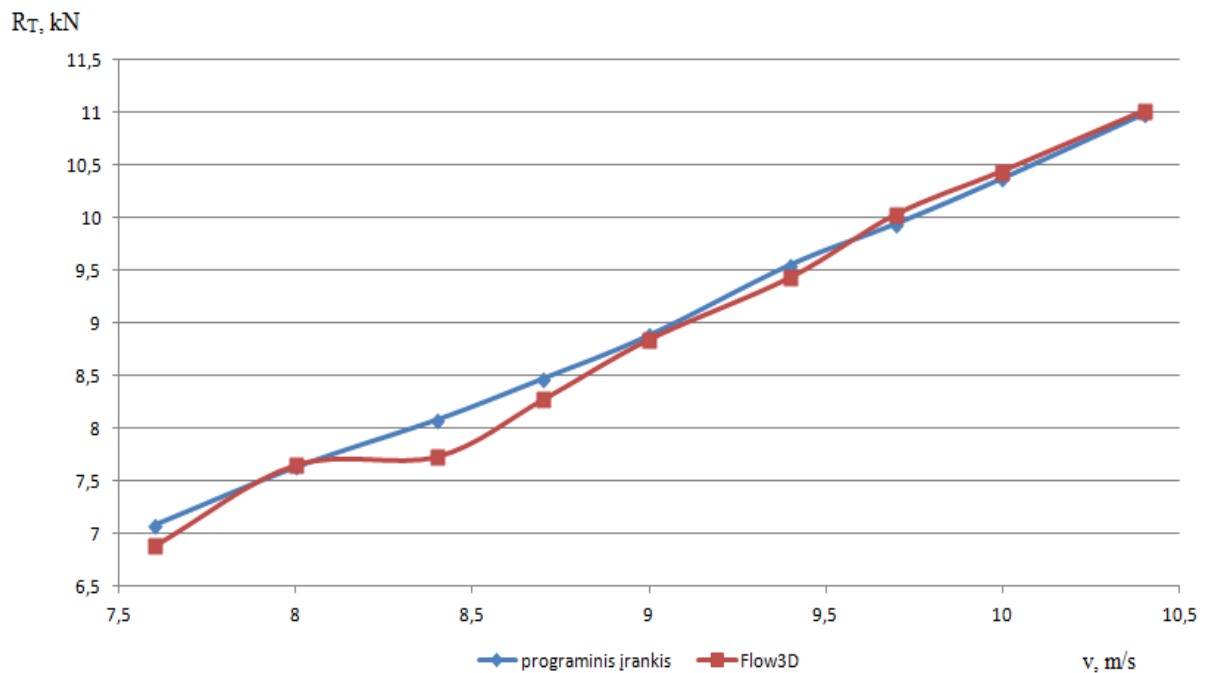
Metodika	Laivo greitis, m/s								
	7,6	8	8,4	8,7	9	9,4	9,7	10	10,4
Flow3D $R_T$ , kN	6,88	7,65	7,73	8,27	8,84	9,43	10,03	10,44	11,01
Prog.įrankis $R_T$ , kN	7,08	7,63	8,08	8,47	8,88	9,55	9,94	10,37	10,98

Iš 6 lentelėje pateiktų duomenų nustatėme, kad didžiausia paklaida yra 4,3% esant 8,4 m/s. Ši paklaida galėjo atsirasti dėl šių priežasčių:

1. DelftShip programos sumodeliuoto 3D laivo ir metodikoje pateiktos vandentalpos koeficiento reikšmės nesutapo, todėl 3D modelis buvo nežymiai padidintas.
2. Programinio įrankio paklaida 2,2%.

3. Nepakankamas tinklelio dydis ir celių skaičius aplink korpusą.
4. Įkėlus STL failą į Flow3D suprastėjo 3D laivo modelio geometriją.
5. Flow3D reikšmės gautos išvedus vidurkį iš paskutinių 10 rezultatų.

4,3% paklaida yra prie ribos, tam kad eksperimento metu sukurta CFD aplinka tikėtų vandens pasipriešinimo skaičiavimams pagal nurodytus kriterijus metodikoje. Tačiau atsižvelgus į paklaidos atsiradimo priežastis galima teigti, jog sukurta aplinka yra tinkama skaičiuoti katamaranų vandens pasipriešinimą. Grafiškai atvaizduotame duomenų palyginime 27 pav. matome, kad Flow3D kreivė yra labiausiai nutolusi nuo programinio įrankio kreivės ties 8,4 m/s, todėl būtų tikslinga perskačiuoti vandens pasipriešinimą esant 8,4 m/s greičiui ir patikslinti gautą rezultatą.



27 pav. Flow3D ir programinio įrankio duomenų palyginimas

Palyginamojoje analizėje buvo įvertinti programinio įrankio ir tiriamosios metodikos bei programinio įrankio ir Flow3D gauti rezultatai. Buvo nustatytos maksimalios paklaidos, jų atsiradimo priežastys, tinkamumas vartojimui ir siūlomos rekomendacijos.

## 5. IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

1. Išanalizavus katamaranų pasipriešinimo skaičiavimų metodikų palyginimus su CFD nustatyta, kad nebuvo gauti patikimi duomenys visame Frūdo skaičiaus diapazone ( $0,1 < Fr < 1$ ). Nors išanalizuota literatūra aktuali pasirinktai temai, tačiau trūksta informacijos, kad būtų galima sukurti eksperimento aplinką bet kokios formos katamaranų pasipriešinimui skaičiuoti naudojant CFD.
2. Pagal tiriamojoje metodikoje pateiktą laivo teorinį brėžinį buvo sumodeliuotas 3D laivo modelis naudojant DelftShip programinę įrangą ir nustatyta, kad metodikoje pateiktas vandentalpos pilnumo koeficientas  $\delta - 0,47$  nesutampa su 3D laivo modelio  $\delta_m - 0,43$ . Laivo modelis buvo padidintas, todėl tai turėjo įtakos skaičiavimo rezultatų tikslumui.
3. Buvo sukurtas programinis įrankis, kuris skaičiuoja vandens pasipriešinimą remiantis tiriamąja metodika virškritinių greičių diapazone ir nustatyta, kad paklaida siekia iki 2,2%, kuri yra leistina tam, kad programinis įrankis būtų naudojamas skaičiuojant vandens pasipriešinimą remiantis tiriamąja metodika.
4. Atlikta programinio įrankio ir CFD skaičiavimų rezultatų palyginamoji analizė, kurioje apskaičiuota, kad didžiausia paklaida yra 4,3% ties 8,4m/s greičiu. Įvertinus paklaidos atsiradimo priežastis nustatyta, kad sukurta aplinka yra tinkama skaičiuoti katamaranų vandens pasipriešinimui, tačiau rekomenduojama perskaičiuoti vandens pasipriešinimą esant 8,4m/s greičiui ir patikslinti gautus rezultatus.
5. Rekomenduojama atlikti kitos formos katamaranų pasipriešinimo skaičiavimus su programiniu įrankiu ir CFD, kad būtų išanalizuotas programinis įrankis kitų katamaranų formų atžvilgiu.
6. Flow3D skaičiavimo rezultatų tikslumui reikėjo parinkti ilgesnę simuliacijos trukmę nei 40 s, nes nepavyko gauti nusistovėjusio pasipriešinimo rezultatų.
7. DelftShip programine įranga sukurtas 3D laivo modelis buvo modifikuotas, nes 11, 12 ir 13 španhautai nežymiai pasislinko dėl korpuso išlyginimo (laivo teoriniame brėžinyje 12 španhautas forštevenio pusėje nesutampa su 12 španhautų achterštevinio pusėje).
8. Nepavyko labai tiksliai perbraižyti grafikų ( $\chi_\delta$ , kai  $\bar{C} = 0,9$  ir  $\chi_{B/T}$ , kai  $\bar{C} = 0,5; 0,7; 0,9$ ) naudojant AutoCad programinę įrangą, nes grafikų kokybė prasta.

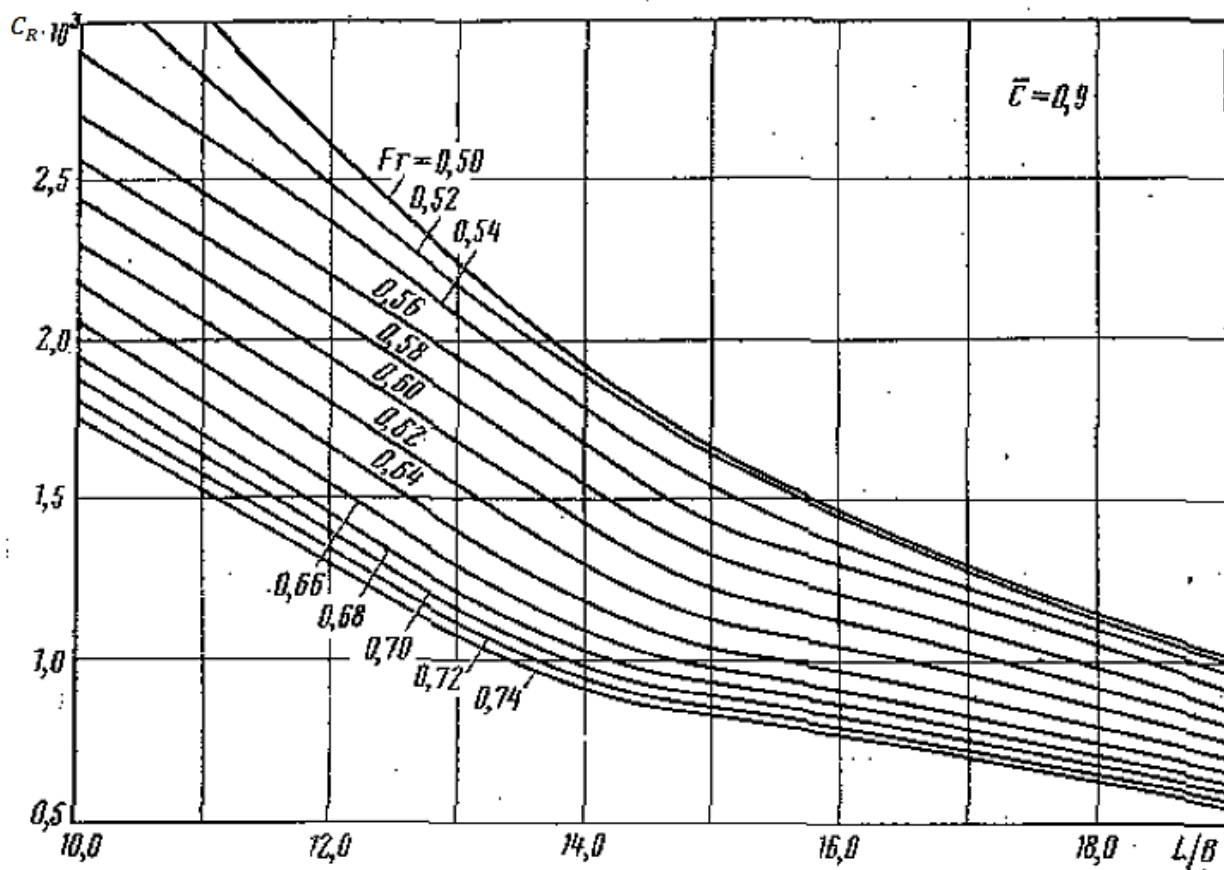
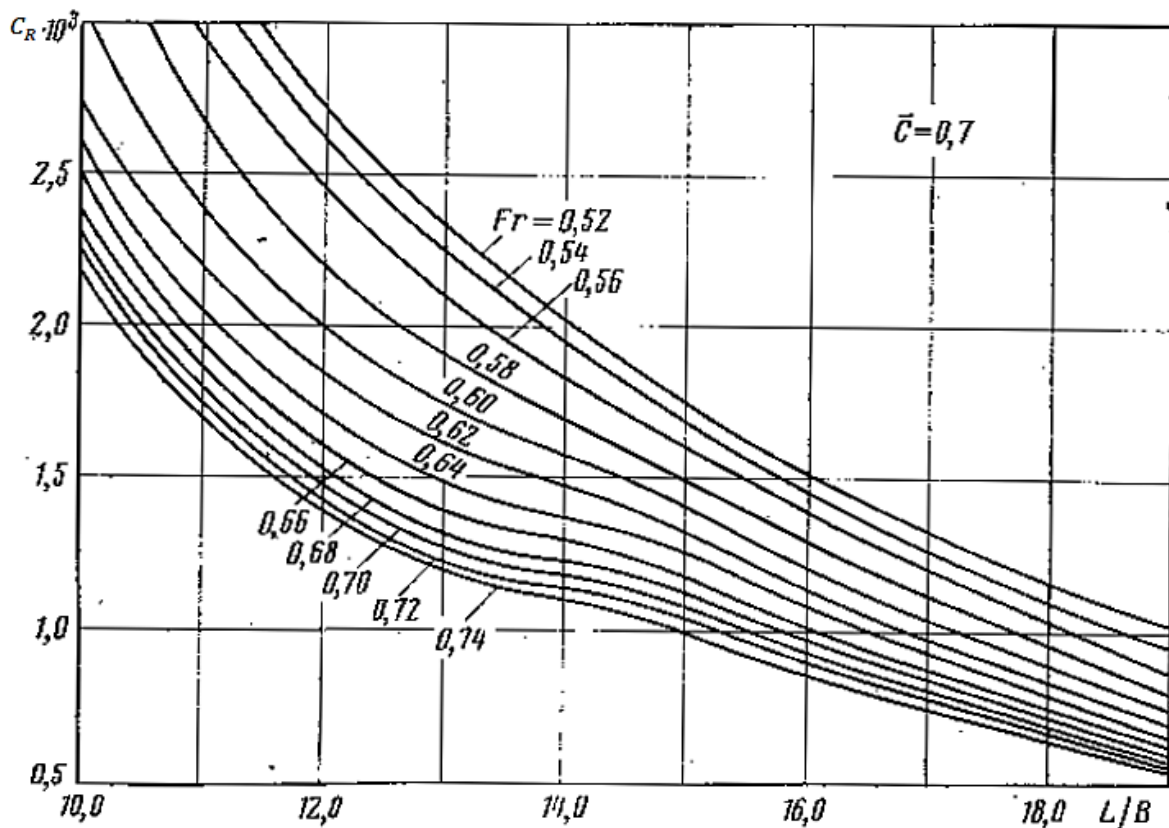
## LITERATŪRA

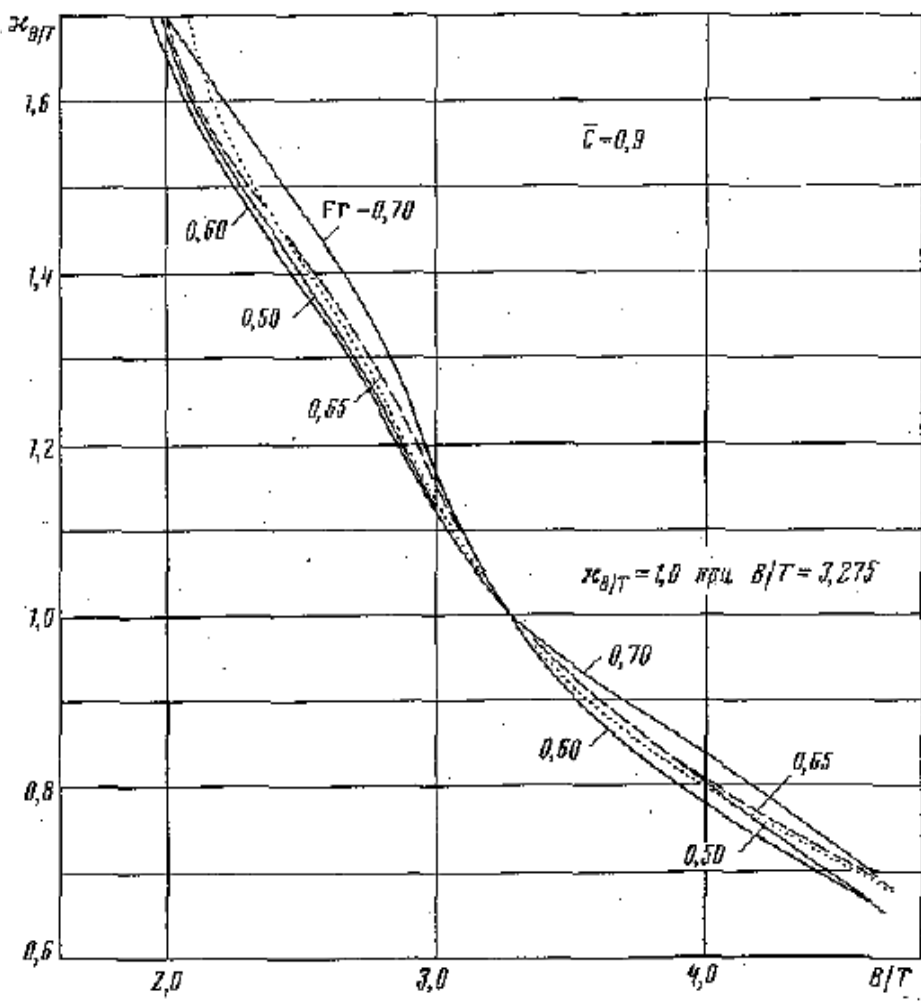
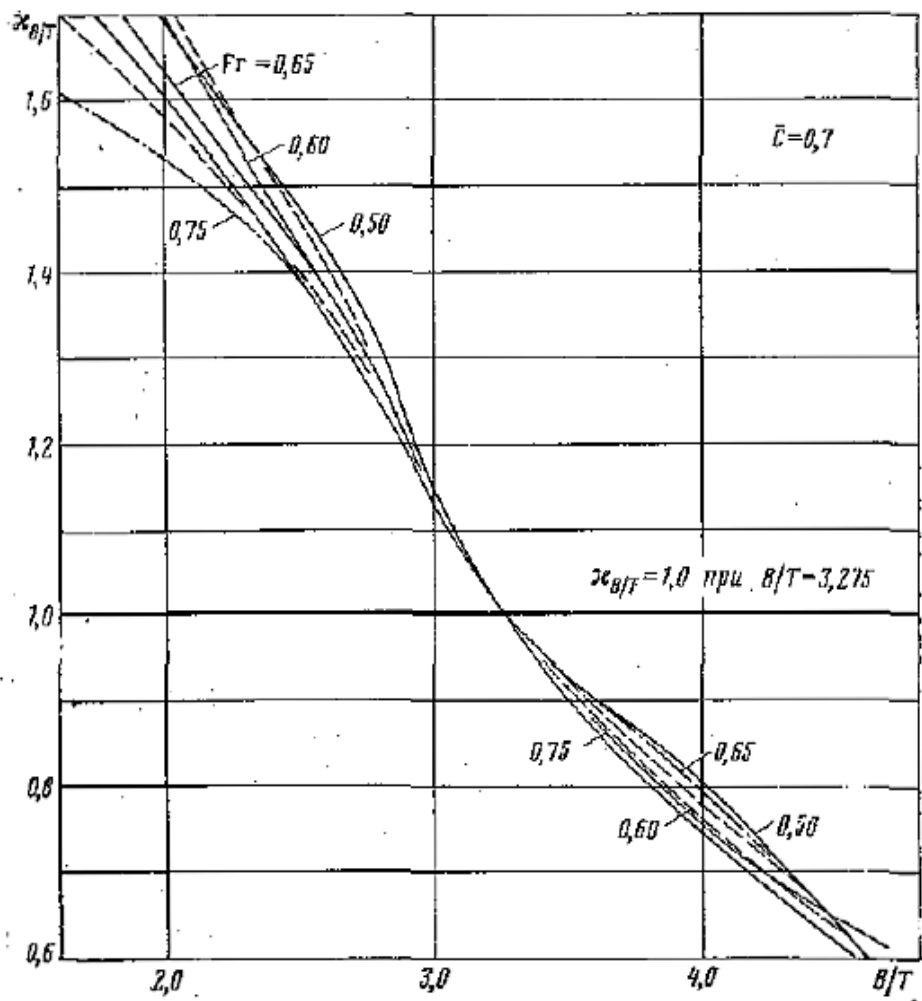
1. Adair G. W. Williams. 2008. Aerodynamic Forces on High-Speed Multihulled Marine Vehicles.
2. A. Ebrahimi, M. Rad and A. Hajilouy. 2013. Experimental and numerical studies on resistance of a catamaran vessel with non-parallel demihulls
3. ZHA Ruo-si, YE Hai-xuan, SHEN Zhi-rong , WAN De-cheng. 2014. Numerical computations of resistance of high speed catamaran in calm water.
4. Xuan P. Pham, Kishore Kantimahanthi, Prasanta K. Sahoo, Wave Resistance Prediction of Hard-Chine Catamarans through Regression Analysis.
5. Rui Deng, Ley Yu. 2015. Discussion of Grid Generation for Catamaran Resistance Calculation
6. A. Souto Iglesias, R. Zamora, D. Fernández & C. López Pavón. Catamaran wave resistance and central wave cuts for CFD validation
7. Prasanta K. Sahoo, Lawrence J Doctors, Luke Pretlove. 2006. CFD PREDICTION OF THE WAVE RESISTANCE OF A CATAMARAN WITH STAGGERED DEMIHULLS
8. Teresa Castiglione, Sergio BOVA, 2015. HYDRODYNAMIC ANALYSIS OF A CATAMARAN IN CALM WATER AND IN WAVES.
9. George Zaraphonitis, Dimitris Spanos, Apostolos Papanikolaou. Numerical and Experimental Study on the Wave Resistance of Fast Displacement Asymmetric Catamarans
10. Prasanta K Sahoo, Nicholas A Browne, Marcos Salas. Experimental and CFD Study of Wave Resistance of High-Speed Round Bilge Catamaran Hull Forms
11. Stonkus V. 2006. Laivo teorija. Klaipėda: Klaipėdos universiteto leidykla. Prieiga per internetą: [http://vddb.library.lt/fedora/get/LTeLABa-0001:B.03~2006~ISBN\\_9955-18-168-0/DS.001.0.01.BOOK](http://vddb.library.lt/fedora/get/LTeLABa-0001:B.03~2006~ISBN_9955-18-168-0/DS.001.0.01.BOOK)
12. Čerka J. 2008. Laivu projektavimas ir statyba: mokymo medžiaga.
13. Marine Insight Naval Architecture. Prieiga per internetą: <http://www.marineinsight.com/naval-architecture/various-methods-for-ship-resistance-evaluation/>
14. Técnico Lisboa. Lecture 8. Resistance of a ship based on statistical methods. Prieiga per internetą: [https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779577315267/RP\\_Lecture8.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779577315267/RP_Lecture8.pdf)
15. Resistance & Propulsion of Ships. Prediction of resistance using model tests. Prieiga per internetą: <http://www.engr.mun.ca/~bveitch/courses/r-p/Assignments/ITTC-calculation-procedures-Lab1.pdf>
16. Petter Vangbo. 2011. CFD in conceptual ship design. Prieiga per internetą: [https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/237948/492068\\_FULLTEXT01.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/237948/492068_FULLTEXT01.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
17. Алферьев М. Я., Мадорский Г, С. 1976. Транспортные катамараны внутреннево плавания. Москва: Транспорт.

## **PRIEDAI**

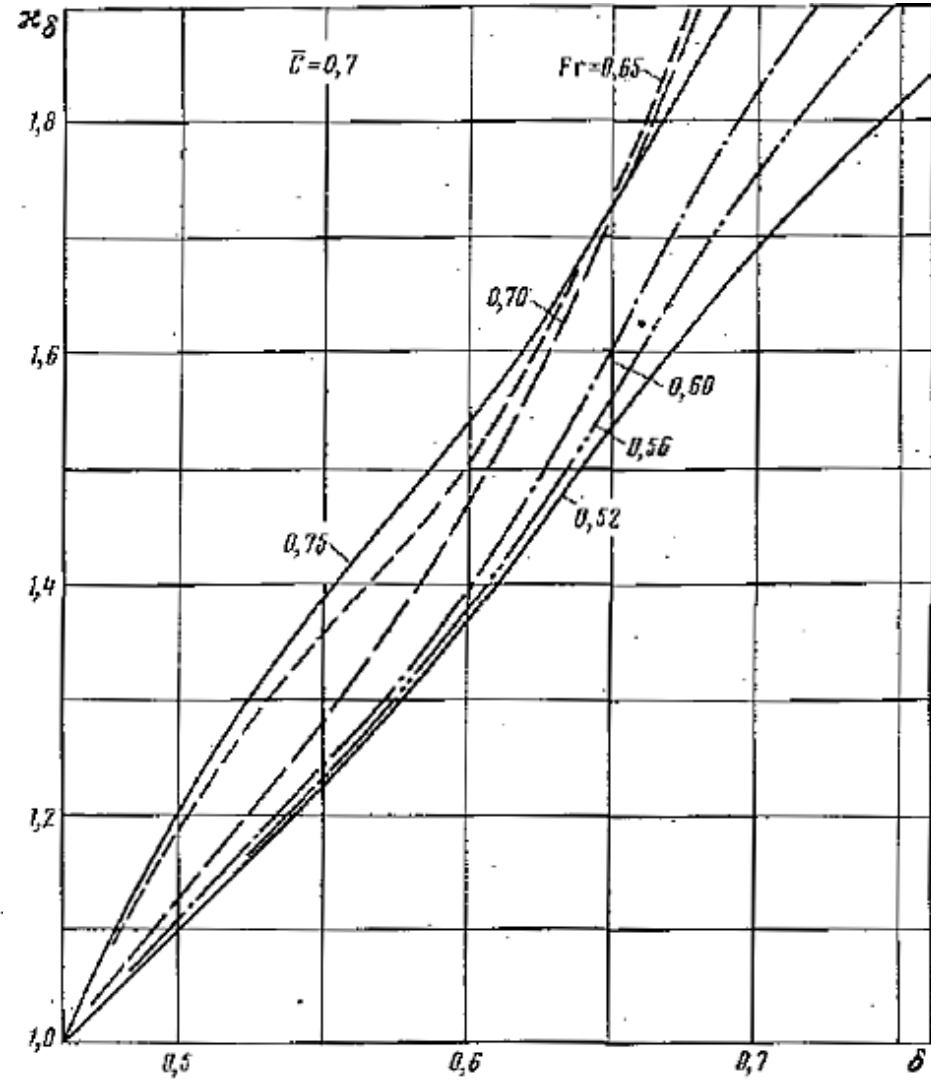
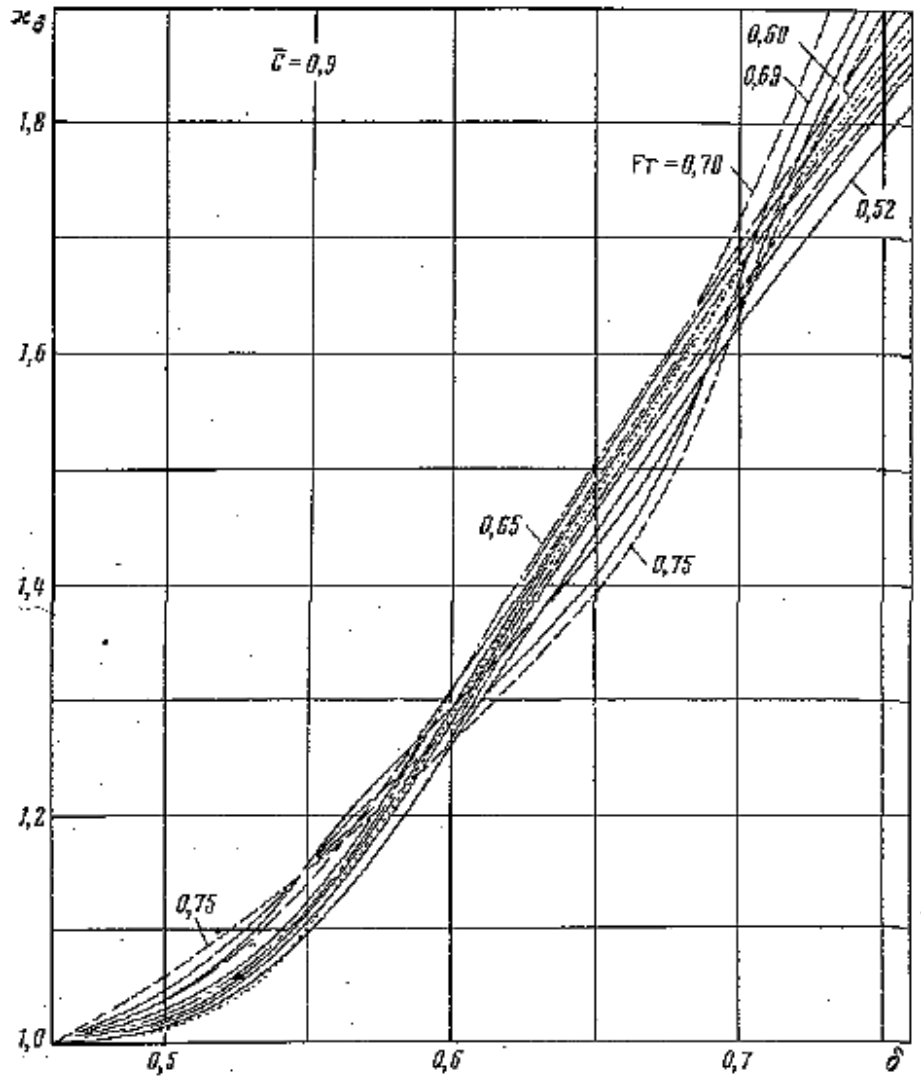
# 1 PRIEDAS

$C_R^{L/B}$   $\chi_{B/T}$   $\chi_\delta$  reikšmių grafikai santykiniams klirensams 0,7 ir 0,9





I PRIEDO TĒSINYS



1 PRIEDO TĖSINYS

## 2 PRIEDAS

Programinio įrankio kodas yra pateikiamas cd laikmenoje, nes jį sudaro 50753 programavimo eilutės kartu su viso darbo elektronine versija



### 3 PRIEDAS

Reinoldso skaičiaus priklausomybė nuo  $C_{FR}$  reikšmės

Re	$C_{FR}$	Re	$C_{FR}$	Re	$C_{FR}$	Re	$C_{FR}$	Re	$C_{FR}$
$1,0 \cdot 10^5$	$7,14 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^6$	$4,47 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^7$	$3,00 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^8$	$2,12 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^9$	$1,57 \cdot 10^{-3}$
$1,25 \cdot 10^5$	$6,81 \cdot 10^{-3}$	$1,25 \cdot 10^6$	$4,30 \cdot 10^{-3}$	$1,25 \cdot 10^7$	$2,90 \cdot 10^{-3}$	$1,25 \cdot 10^8$	$2,06 \cdot 10^{-3}$	$1,25 \cdot 10^9$	$1,52 \cdot 10^{-3}$
$1,50 \cdot 10^5$	$6,54 \cdot 10^{-3}$	$1,50 \cdot 10^6$	$4,15 \cdot 10^{-3}$	$1,50 \cdot 10^7$	$2,82 \cdot 10^{-3}$	$1,50 \cdot 10^8$	$2,01 \cdot 10^{-3}$	$1,50 \cdot 10^9$	$1,49 \cdot 10^{-3}$
$1,75 \cdot 10^5$	$6,32 \cdot 10^{-3}$	$1,75 \cdot 10^6$	$4,02 \cdot 10^{-3}$	$1,75 \cdot 10^7$	$2,76 \cdot 10^{-3}$	$1,75 \cdot 10^8$	$1,97 \cdot 10^{-3}$	$1,75 \cdot 10^9$	$1,46 \cdot 10^{-3}$
$2,0 \cdot 10^5$	$6,14 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^6$	$3,92 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^7$	$2,70 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^8$	$1,94 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^9$	$1,44 \cdot 10^{-3}$
$2,5 \cdot 10^5$	$5,88 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^6$	$3,77 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^7$	$2,61 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^8$	$1,88 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^9$	$1,40 \cdot 10^{-3}$
$3,0 \cdot 10^5$	$5,66 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^6$	$3,67 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^7$	$2,53 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^8$	$1,83 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^9$	$1,37 \cdot 10^{-3}$
$3,5 \cdot 10^5$	$5,47 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^6$	$3,57 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^7$	$2,47 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^8$	$1,79 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^9$	$1,35 \cdot 10^{-3}$
$4,0 \cdot 10^5$	$5,32 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^6$	$3,49 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^7$	$2,43 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^8$	$1,76 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^9$	$1,32 \cdot 10^{-3}$
$4,5 \cdot 10^5$	$5,20 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^6$	$3,43 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^7$	$2,39 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^8$	$1,74 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^9$	$1,31 \cdot 10^{-3}$
$5,0 \cdot 10^5$	$5,10 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^6$	$3,37 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^7$	$2,35 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^8$	$1,72 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^9$	$1,29 \cdot 10^{-3}$
$6,0 \cdot 10^5$	$4,92 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^6$	$3,26 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^7$	$2,28 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^8$	$1,68 \cdot 10^{-3}$	$6,0 \cdot 10^9$	$1,27 \cdot 10^{-3}$
$7,0 \cdot 10^5$	$4,76 \cdot 10^{-3}$	$7,0 \cdot 10^6$	$3,18 \cdot 10^{-3}$	$7,0 \cdot 10^7$	$2,23 \cdot 10^{-3}$	$7,0 \cdot 10^8$	$1,65 \cdot 10^{-3}$	$7,0 \cdot 10^9$	$1,24 \cdot 10^{-3}$
$8,0 \cdot 10^5$	$4,65 \cdot 10^{-3}$	$8,0 \cdot 10^6$	$3,11 \cdot 10^{-3}$	$8,0 \cdot 10^7$	$2,20 \cdot 10^{-3}$	$8,0 \cdot 10^8$	$1,62 \cdot 10^{-3}$	$8,0 \cdot 10^9$	$1,22 \cdot 10^{-3}$
$9,0 \cdot 10^5$	$4,56 \cdot 10^{-3}$	$9,0 \cdot 10^6$	$3,06 \cdot 10^{-3}$	$9,0 \cdot 10^7$	$2,17 \cdot 10^{-3}$	$9,0 \cdot 10^8$	$1,60 \cdot 10^{-3}$	$9,0 \cdot 10^9$	$1,21 \cdot 10^{-3}$
—	—	—	—	—	—	—	—	$1,0 \cdot 10^{10}$	$1,20 \cdot 10^{-3}$

## Design hydrostatics report

Designer

Created by

Comment

Filename

Katamaranas.fbm

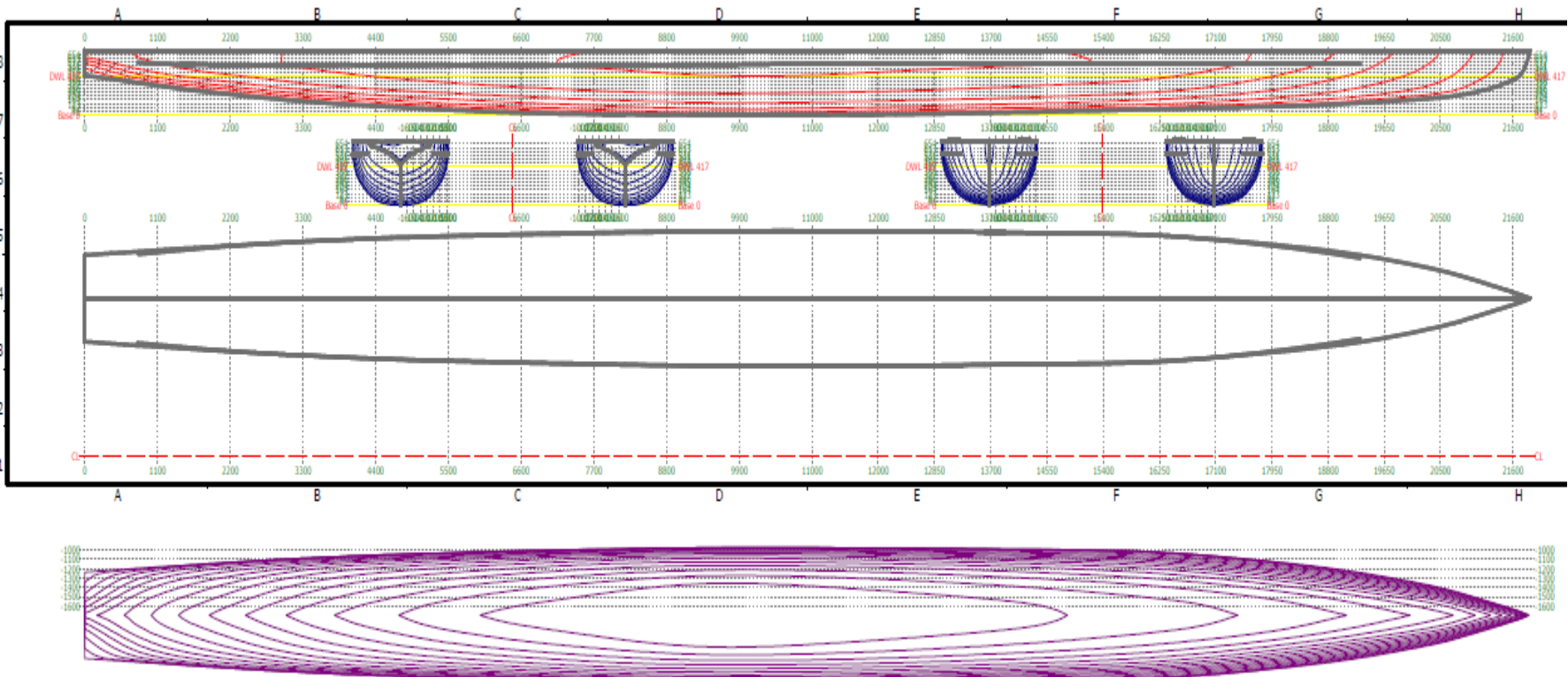
<b>Design length</b>	21,750 (m)	<b>Midship location</b>	10,875 (m)
<b>Length over all</b>	21,856 (m)	<b>Relative water density</b>	1,0250
<b>Design beam</b>	1,450 (m)	<b>Mean shell thickness</b>	0,0000 (m)
<b>Maximum beam</b>	-1,943 (m)	<b>Appendage coefficient</b>	1,0000
<b>Design draft</b>	0,417 (m)		

Volume properties		Waterplane properties	
Moulded volume	12,142 (m <sup>3</sup> )	Length on waterline	21,591 (m)
Total displaced volume	12,142 (m <sup>3</sup> )	Beam on waterline	4,798 (m)
Displacement	12,445 (tonnes)	Entrance angle	0,000 (Degr.)
Block coefficient	0,9232	Waterplane area	47,123 (m <sup>2</sup> )
Prismatic coefficient	0,6268	Waterplane coefficient	1,4942
Vert. prismatic coefficient	0,6179	Waterplane center of floatation	10,518 (m)
Wetted surface area	58,116 (m <sup>2</sup> )	Transverse moment of inertia	142,10 (m <sup>4</sup> )
Longitudinal center of buoyancy	10,869 (m)	Longitudinal moment of inertia	1325,0 (m <sup>4</sup> )
Longitudinal center of buoyancy	-0,028 %		
Vertical center of buoyancy	0,263 (m)		

Midship properties		Initial stability	
Midship section area	0,891 (m <sup>2</sup> )	Transverse metacentric height	11,966 (m)
Midship coefficient	1,4730	Longitudinal metacentric height	109,39 (m)

# 5 PRIEDAS

DelftShip laivo teorinis brėžinys



**6 PRIEDAS**

flscon: version 10.1.1.05 win64 2013	1.2000172E+01 -7.3371719E+03	3.1799427E+01 -6.2500063E+03
	1.2600076E+01 -7.1282061E+03	3.2400940E+01 -6.6179404E+03
FLOW-3D 16:51:52 05/20/2016 xrda	1.3199867E+01 -7.0603730E+03	3.3000122E+01 -6.6428081E+03
hydr3d: version 10.1.1.05 win64 2013	1.3800627E+01 -7.1696748E+03	3.3599529E+01 -7.4416489E+03
Title	1.4399289E+01 -6.9517246E+03	3.4199760E+01 -7.7734482E+03
5	1.4999720E+01 -6.8161450E+03	3.4800995E+01 -7.9086187E+03
hydr3d: version 10.1.1.05 win64 2013	1.5599386E+01 -6.8034321E+03	3.5400101E+01 -7.7961240E+03
	1.6200117E+01 -6.8729414E+03	3.5999378E+01 -7.1104478E+03
Mesh Block 1	1.6800173E+01 -7.0570981E+03	3.6599056E+01 -6.6084404E+03
printing fhxmvb	1.7399996E+01 -6.9391011E+03	3.7199234E+01 -6.5277974E+03
	1.7999735E+01 -7.0189556E+03	3.7799526E+01 -6.7846069E+03
1 71 2.419E-04 4.200E+01	1.8600794E+01 -7.7522227E+03	3.8400082E+01 -7.0737041E+03
time fhxmvb	1.9200516E+01 -7.2495347E+03	3.8999672E+01 -6.6385581E+03
3.0088457E-04 -3.1470869E+05	1.9799540E+01 -7.0724219E+03	3.9600132E+01 -6.7996963E+03
5.9936255E-01 -7.1972417E+03	2.0399340E+01 -7.2421714E+03	4.0199181E+01 -6.7528696E+03
1.1997740E+00 -6.0932764E+03	2.1000843E+01 -7.1207422E+03	4.0799236E+01 -6.6745054E+03
1.8006586E+00 -6.7502783E+03	2.1599424E+01 -6.8979966E+03	
2.4000320E+00 -6.9424902E+03	2.2199741E+01 -7.0603604E+03	
3.0003231E+00 -7.3354106E+03	2.2799612E+01 -7.2251777E+03	
3.5994861E+00 -6.9769658E+03	2.3400009E+01 -7.1866719E+03	
4.1999860E+00 -7.2729927E+03	2.4000429E+01 -7.4316211E+03	
4.8003612E+00 -7.2245986E+03	2.4599440E+01 -8.3556348E+03	
5.4003701E+00 -7.3466343E+03	2.5200285E+01 -8.0630273E+03	
5.9996138E+00 -7.2104141E+03	2.5800190E+01 -7.2668237E+03	
6.5994759E+00 -7.5843076E+03	2.6400537E+01 -7.1453135E+03	
7.1994677E+00 -7.8525918E+03	2.7000542E+01 -6.9591494E+03	
7.8003535E+00 -7.4340610E+03	2.7600430E+01 -6.9079619E+03	
8.4003830E+00 -7.6982529E+03	2.8199841E+01 -7.0824834E+03	
9.0002527E+00 -7.6707998E+03	2.8799875E+01 -7.0895957E+03	
9.6005878E+00 -7.1817197E+03	2.9399721E+01 -8.0452583E+03	
1.0199878E+01 -7.0698350E+03	2.9999224E+01 -7.8728193E+03	
1.0800398E+01 -6.8805132E+03	3.0599218E+01 -8.4312158E+03	
1.1400747E+01 -7.3845054E+03	3.1200663E+01 -7.0900981E+03	

## 6 PRIEDO TĖSINYS

CFD skaičiavimų rezultatai 8 m/s greičiu

flscon: version 10.1.1.05 win64	9.5994768E+00	-7.8384248E+03	2.8200346E+01	-7.9576675E+03
2013	1.0200233E+01	-7.4272681E+03	2.8799892E+01	-7.9066416E+03
FLOW-3D 23:05:01 05/03/2016	1.0800249E+01	-7.5257607E+03	2.9399897E+01	-7.9632568E+03
vwke	1.1400462E+01	-7.5442769E+03	3.0000008E+01	-7.8413916E+03
hydr3d: version 10.1.1.05 win64	1.1999998E+01	-7.0260869E+03	3.0599754E+01	-7.9425532E+03
2013	1.2599188E+01	-8.0080239E+03	3.1200066E+01	-7.7342964E+03
Title	1.3199454E+01	-7.5436025E+03	3.1799345E+01	-7.8141997E+03
5	1.3799875E+01	-6.9468613E+03	3.2399624E+01	-8.1522354E+03
hydr3d: version 10.1.1.05 win64	1.4399773E+01	-7.4256367E+03	3.2999531E+01	-7.6651685E+03
2013	1.5000378E+01	-7.1740728E+03	3.3600002E+01	-7.9381948E+03
	1.5600573E+01	-7.5820381E+03	3.4200672E+01	-7.7887207E+03
Mesh Block 1	1.6200380E+01	-7.2672261E+03	3.4799892E+01	-7.7321338E+03
printing fhxmvb	1.6800749E+01	-7.3760747E+03	3.5400154E+01	-7.5555537E+03
1 101 2.874E-04 6.000E+01	1.7399340E+01	-7.1032217E+03	3.6000278E+01	-7.7185557E+03
time fhxmvb	1.7999660E+01	-7.2989229E+03	3.6600346E+01	-7.7493042E+03
2.8741473E-04 -3.4690250E+05	1.8600128E+01	-7.3359165E+03	3.7200302E+01	-7.7599624E+03
6.0046077E-01 -7.4378613E+03	1.9199736E+01	-7.3486489E+03	3.7800209E+01	-7.5963564E+03
1.2006289E+00 -6.8218955E+03	1.9799377E+01	-7.5065684E+03	3.8399910E+01	-7.6225659E+03
1.8002874E+00 -7.2552510E+03	2.0400101E+01	-7.1396504E+03	3.9000305E+01	-7.6613359E+03
2.3999174E+00 -7.9771182E+03	2.0999500E+01	-7.4381348E+03	3.9599667E+01	-7.5937876E+03
3.0002041E+00 -7.5904541E+03	2.1599503E+01	-7.5863203E+03	4.0199612E+01	-7.5815972E+03
3.5996425E+00 -8.1436816E+03	2.2199566E+01	-7.5452529E+03	4.0800484E+01	-7.6463442E+03
4.1993828E+00 -7.6581680E+03	2.2799398E+01	-7.6111440E+03		
4.7993698E+00 -7.6050195E+03	2.3399414E+01	-7.5122983E+03		
5.4004374E+00 -7.9541875E+03	2.3999498E+01	-7.7337739E+03		
6.0007658E+00 -7.4463428E+03	2.4599649E+01	-7.9765430E+03		
6.5997324E+00 -8.1811680E+03	2.5199497E+01	-7.7961875E+03		
7.2000494E+00 -7.8133970E+03	2.5799522E+01	-7.8135547E+03		
7.8004560E+00 -7.5573174E+03	2.6399611E+01	-7.7756968E+03		
8.3997650E+00 -8.0346870E+03	2.6999613E+01	-7.9918604E+03		
8.9999933E+00 -7.4846958E+03	2.7600193E+01	-7.8971538E+03		

flscon: version 10.1.1.05 win64 2013  
 FLOW-3D 19:51:55 05/25/2016 xrda  
 hydr3d: version 10.1.1.05 win64 2013  
 Title  
 5  
 hydr3d: version 10.1.1.05 win64 2013

Mesh Block 1  
 printing fhxmvb

1	71	2.419E-04	4.200E+01
	time		fhxmvb
2.7515506E-04	-3.8058206E+05		
6.0073513E-01	-8.6228428E+03		
1.2005801E+00	-7.2497261E+03		
1.8006268E+00	-8.6142783E+03		
2.3993959E+00	-8.2966230E+03		
2.9997332E+00	-8.1668872E+03		
3.6005540E+00	-8.5930693E+03		
4.1997843E+00	-8.0368032E+03		
4.8006525E+00	-7.9678096E+03		
5.3995776E+00	-8.2830547E+03		
6.0000415E+00	-8.0677090E+03		
6.6003361E+00	-8.2748623E+03		
7.1993151E+00	-7.8947246E+03		
7.8003216E+00	-8.1614282E+03		
8.4003658E+00	-8.1419971E+03		
9.0001545E+00	-8.3055088E+03		
9.6008492E+00	-8.4221738E+03		
1.0199694E+01	-8.3581992E+03		
1.0800829E+01	-8.1211299E+03		

1.1399399E+01	-8.0287832E+03
1.1999925E+01	-7.9449912E+03
1.2600525E+01	-7.7805063E+03
1.3200089E+01	-8.2968945E+03
1.3799123E+01	-7.7533193E+03
1.4400377E+01	-7.5257720E+03
1.5000001E+01	-8.1590107E+03
1.5600259E+01	-8.1300615E+03
1.6200632E+01	-7.8599565E+03
1.6800030E+01	-8.0008926E+03
1.7399202E+01	-7.7251387E+03
1.8000704E+01	-8.1128760E+03
1.8600492E+01	-8.0335000E+03
1.9199413E+01	-8.0761519E+03
1.9799902E+01	-7.7801514E+03
2.0399477E+01	-8.8653682E+03
2.0999155E+01	-8.4532734E+03
2.1599655E+01	-8.9068545E+03
2.2200449E+01	-7.8672642E+03
2.2799458E+01	-7.3340981E+03
2.3399376E+01	-8.0877554E+03
2.4000647E+01	-7.9541191E+03
2.4599813E+01	-7.4153618E+03
2.5200172E+01	-8.4737842E+03
2.5800552E+01	-8.1838643E+03
2.6400171E+01	-7.5220488E+03
2.6999620E+01	-7.8507515E+03
2.7599262E+01	-7.8566821E+03
2.8200348E+01	-7.8463281E+03
2.8800236E+01	-8.0288433E+03
2.9400795E+01	-7.9196484E+03

2.9999939E+01	-7.9105640E+03
3.0599993E+01	-7.5979243E+03
3.1199114E+01	-8.1565088E+03
3.1799278E+01	-7.6900913E+03
3.2400002E+01	-7.9004253E+03
3.3000359E+01	-7.5601650E+03
3.3600449E+01	-7.5426123E+03
3.4199917E+01	-7.6898350E+03
3.4799969E+01	-8.8465947E+03
3.5399441E+01	-7.8453379E+03
3.6000145E+01	-7.8166177E+03
3.6600101E+01	-7.4626943E+03
3.7199657E+01	-7.6206509E+03
3.7800381E+01	-8.0678955E+03
3.8399696E+01	-7.6279849E+03
3.9000118E+01	-7.6248296E+03
3.9600216E+01	-7.5150010E+03
4.0199688E+01	-7.5862783E+03
4.0799664E+01	-7.5927109E+03
4.2599297E+01	-7.5042441E+03
4.3200329E+01	-7.5811831E+03
4.3800743E+01	-7.3924116E+03
4.4400513E+01	-7.9513247E+03
4.5000057E+01	-7.9075986E+03
4.5599636E+01	-7.8738472E+03
4.6199928E+01	-7.9933784E+03
4.6800659E+01	-7.5996084E+03
4.7400288E+01	-7.7008608E+03
4.7999409E+01	-7.7429297E+03

CFD skaičiavimų rezultatai 8,4 m/s greičiu

## 6 PRIEDO TĘSINYS

flscon: version 10.1.1.05 win64 2013  
 FLOW-3D 20:55:12 05/09/2016 mcpb  
 hydr3d: version 10.1.1.05 win64 2013  
 Title  
 5  
 hydr3d: version 10.1.1.05 win64 2013

Mesh Block 1  
 printing fhxmvb  
 1 80 2.667E-04 4.740E+01  
 time fhxmvb  
 2.6665805E-04 -4.0681272E+05  
 6.0054100E-01 -8.6374062E+03  
 1.2002397E+00 -7.9354873E+03  
 1.8003846E+00 -8.8267979E+03  
 2.4003162E+00 -8.8677607E+03  
 2.9996393E+00 -8.1833770E+03  
 3.5993841E+00 -9.0518867E+03  
 4.2004938E+00 -8.1830356E+03  
 4.8001895E+00 -8.5544502E+03  
 5.3996038E+00 -8.7635996E+03  
 6.0000906E+00 -8.6713252E+03  
 6.6005325E+00 -8.1296343E+03  
 7.2001452E+00 -8.8898672E+03  
 7.7991991E+00 -8.5744229E+03  
 8.4003935E+00 -8.4946787E+03  
 8.9999447E+00 -8.6672246E+03  
 9.6002340E+00 -8.8096602E+03  
 1.0200130E+01 -8.6836016E+03  
 1.0800261E+01 -8.5678604E+03  
 1.1400648E+01 -8.4366768E+03

1.1999614E+01 -8.4965674E+03  
 1.2599806E+01 -8.3148428E+03  
 1.3199767E+01 -8.4089688E+03  
 1.3800302E+01 -8.5734854E+03  
 1.4399449E+01 -8.0939634E+03  
 1.4999960E+01 -8.1360723E+03  
 1.5600014E+01 -8.6803418E+03  
 1.6199846E+01 -8.4230586E+03  
 1.6800047E+01 -1.0706836E+04  
 1.7400185E+01 -1.0099129E+04  
 1.7999670E+01 -1.0601980E+04  
 1.8599604E+01 -9.3345332E+03  
 1.9199379E+01 -7.9443550E+03  
 1.9799639E+01 -8.5020762E+03  
 2.0400249E+01 -8.1716147E+03  
 2.1000462E+01 -8.3181475E+03  
 2.1599430E+01 -8.0457451E+03  
 2.2199606E+01 -8.0005850E+03  
 2.2800282E+01 -8.5800674E+03  
 2.3400331E+01 -7.9823452E+03  
 2.4000015E+01 -7.9735474E+03  
 2.4599428E+01 -8.1915366E+03  
 2.5200699E+01 -7.8968140E+03  
 2.5799707E+01 -8.1514565E+03  
 2.6400200E+01 -7.9652695E+03  
 2.6999645E+01 -7.9932935E+03  
 2.7600657E+01 -8.0398174E+03  
 2.8199097E+01 -8.1386460E+03  
 2.8799149E+01 -8.2622461E+03  
 2.9400263E+01 -8.2342568E+03  
 3.0000589E+01 -8.4154941E+03

3.0600443E+01 -8.1039502E+03  
 3.1199566E+01 -8.0878394E+03  
 3.1799532E+01 -7.9202471E+03  
 3.2400566E+01 -7.9199014E+03  
 3.2999420E+01 -7.6770918E+03  
 3.3600250E+01 -8.0693306E+03  
 3.4199596E+01 -7.9006680E+03  
 3.4799679E+01 -7.9698706E+03  
 3.5399879E+01 -8.3964453E+03  
 3.6000271E+01 -8.0300635E+03  
 3.6599724E+01 -8.1462109E+03  
 3.7199768E+01 -8.1250732E+03  
 3.7800327E+01 -8.2207412E+03  
 3.8399555E+01 -8.3902471E+03  
 3.8999508E+01 -8.3848496E+03  
 3.9599499E+01 -8.3306123E+03  
 4.0199802E+01 -8.2096738E+03  
 4.0799961E+01 -8.4248320E+03

CFD skaičiavimų rezultatai 8,7 m/s greičiu

## 6 PRIEDO TĖSINYS

flscon: version 10.1.1.05 win64 2013  
 FLOW-3D 06:08:59 05/12/2016 xfwj  
 hydr3d: version 10.1.1.05 win64 2013  
 Title  
 5  
 hydr3d: version 10.1.1.05 win64 2013

Mesh Block 1  
 printing fhxmvb  
 1 81 2.587E-04 4.800E+01  
 time fhxmvb  
 2.5869525E-04 -4.3387256E+05  
 6.0042495E-01 -9.1778438E+03  
 1.2002268E+00 -8.3256543E+03  
 1.8006220E+00 -9.0281084E+03  
 2.4006417E+00 -9.2397236E+03  
 3.0001166E+00 -8.6932520E+03  
 3.6000991E+00 -9.3111367E+03  
 4.1999364E+00 -8.4069600E+03  
 4.7998061E+00 -7.7525303E+03  
 5.4004364E+00 -1.0036127E+04  
 5.9994249E+00 -9.1808896E+03  
 6.5999889E+00 -8.7266533E+03  
 7.1991634E+00 -8.9299844E+03  
 7.8009624E+00 -8.4518496E+03  
 8.3996897E+00 -8.5969795E+03  
 9.0002441E+00 -9.0492012E+03  
 9.5996170E+00 -8.8539521E+03  
 1.0199727E+01 -8.6679824E+03  
 1.0800094E+01 -8.8368369E+03  
 1.1399844E+01 -8.6825986E+03

1.2000339E+01 -9.1255264E+03  
 1.2599510E+01 -8.6527793E+03  
 1.3199020E+01 -8.9293574E+03  
 1.3800857E+01 -8.6970420E+03  
 1.4399831E+01 -8.4498945E+03  
 1.4999930E+01 -8.5857832E+03  
 1.5599768E+01 -8.5403809E+03  
 1.6199703E+01 -8.7253232E+03  
 1.6800320E+01 -8.4820801E+03  
 1.7400640E+01 -8.6773809E+03  
 1.7999508E+01 -8.5655596E+03  
 1.8599579E+01 -8.5030508E+03  
 1.9199776E+01 -8.6527715E+03  
 1.9800636E+01 -8.7257891E+03  
 2.0400547E+01 -8.5621025E+03  
 2.1000160E+01 -8.6773926E+03  
 2.1599478E+01 -8.6371094E+03  
 2.2200531E+01 -8.7889883E+03  
 2.2799847E+01 -8.3828779E+03  
 2.3400457E+01 -8.5070010E+03  
 2.4000267E+01 -8.3863486E+03  
 2.4599461E+01 -8.5166465E+03  
 2.5199646E+01 -8.5703203E+03  
 2.5799845E+01 -9.0540654E+03  
 2.6399586E+01 -8.3913037E+03  
 2.7000481E+01 -8.7693789E+03  
 2.7599539E+01 -8.5946621E+03  
 2.8199570E+01 -8.5016689E+03  
 2.8799761E+01 -8.6631230E+03  
 2.9399876E+01 -7.1462466E+03  
 3.0000715E+01 -9.6238730E+03

3.0599848E+01 -8.0234956E+03  
 3.1200418E+01 -8.8696377E+03  
 3.1799044E+01 -8.5007275E+03  
 3.2399464E+01 -8.4548389E+03  
 3.3000710E+01 -8.9781582E+03  
 3.3600719E+01 -8.9536963E+03  
 3.4200470E+01 -8.9364004E+03  
 3.4799889E+01 -8.8098613E+03  
 3.5400013E+01 -8.8591318E+03  
 3.5999428E+01 -8.8827002E+03  
 3.6600697E+01 -9.0185029E+03  
 3.7199471E+01 -8.6022812E+03  
 3.7799198E+01 -9.2553623E+03  
 3.8400219E+01 -8.9610889E+03  
 3.8999260E+01 -8.8356582E+03  
 3.9600571E+01 -8.8478506E+03  
 4.0199917E+01 -8.5752236E+03  
 4.0800823E+01 -8.6046680E+03

CFD skaičiavimų rezultatai 9 m/s greičiu

**6 PRIEDO TĘSINYS**

flscon: version 10.1.1.05 win64 2013  
 FLOW-3D 16:39:20 05/15/2016 bkkq  
 hydr3d: version 10.1.1.05 win64 2013  
 Title  
 5  
 hydr3d: version 10.1.1.05 win64 2013

Mesh Block 1  
 printing fhxmvb  
 1 69 2.488E-04 4.080E+01  
 time fhxmvb  
 2.4882422E-04 -4.7123784E+05  
 6.0048866E-01 -9.4532520E+03  
 1.2006291E+00 -9.1767646E+03  
 1.7998576E+00 -8.4780693E+03  
 2.3998730E+00 -1.0356314E+04  
 3.0000257E+00 -9.4362842E+03  
 3.5997875E+00 -9.4637793E+03  
 4.1995320E+00 -9.7951504E+03  
 4.7997403E+00 -7.8502520E+03  
 5.4005404E+00 -9.8067871E+03  
 5.9996819E+00 -9.7897832E+03  
 6.5999665E+00 -9.7837725E+03  
 7.2005963E+00 -9.2461201E+03  
 7.8007259E+00 -9.5978066E+03  
 8.4002676E+00 -9.5048955E+03  
 9.0007820E+00 -9.3756445E+03  
 9.6006880E+00 -9.8478721E+03  
 1.0200685E+01 -9.5648770E+03  
 1.0799890E+01 -9.3540723E+03  
 1.1399857E+01 -9.1911309E+03

1.1999706E+01 -9.3479746E+03  
 1.2599552E+01 -9.4850625E+03  
 1.3199487E+01 -9.3919951E+03  
 1.3800406E+01 -9.7242109E+03  
 1.4399345E+01 -9.7207129E+03  
 1.5000380E+01 -9.7937881E+03  
 1.5600227E+01 -9.9264590E+03  
 1.6199747E+01 -9.8024355E+03  
 1.6799603E+01 -9.7916143E+03  
 1.7400198E+01 -9.8050166E+03  
 1.8000000E+01 -1.0289678E+04  
 1.8599874E+01 -1.0414199E+04  
 1.9200098E+01 -1.0490342E+04  
 1.9800085E+01 -1.1023860E+04  
 2.0400244E+01 -1.1402178E+04  
 2.0999748E+01 -1.1665668E+04  
 2.1599874E+01 -1.1642272E+04  
 2.2200336E+01 -1.1322269E+04  
 2.2800135E+01 -1.1802957E+04  
 2.3400232E+01 -1.1884187E+04  
 2.4000025E+01 -1.1354823E+04  
 2.4600155E+01 -1.1172536E+04  
 2.5199757E+01 -1.0596179E+04  
 2.5799948E+01 -9.7538916E+03  
 2.6399958E+01 -1.0387912E+04  
 2.7000179E+01 -9.3035361E+03  
 2.7600012E+01 -9.8210850E+03  
 2.8200691E+01 -9.7437012E+03  
 2.8800537E+01 -9.3358945E+03  
 2.9399984E+01 -9.3127119E+03  
 2.9999357E+01 -9.2794102E+03

3.0600208E+01 -9.2859189E+03  
 3.1200542E+01 -9.2549951E+03  
 3.1800438E+01 -9.0079619E+03  
 3.2400703E+01 -9.3517236E+03  
 3.3000549E+01 -9.1488857E+03  
 3.3600216E+01 -9.2229395E+03  
 3.4199585E+01 -9.4579404E+03  
 3.4800148E+01 -8.3811797E+03  
 3.5399158E+01 -9.6587646E+03  
 3.5999786E+01 -9.5299736E+03  
 3.6599945E+01 -9.5699336E+03  
 3.7200253E+01 -9.8191055E+03  
 3.7800571E+01 -9.4937461E+03  
 3.8399429E+01 -9.8146016E+03  
 3.9000565E+01 -9.4063223E+03  
 3.9599445E+01 -9.1225127E+03  
 4.0200943E+01 -9.4959424E+03  
 4.0799995E+01 -9.3568193E+03

CFD skaičiavimų rezultatai 9,4 m/s greičiu

## 6 PRIEDO TĘSINYS

flscon: version 10.1.1.05 win64 2013  
 FLOW-3D 16:51:52 05/20/2016 xrda  
 hydr3d: version 10.1.1.05 win64 2013  
 Title  
 5  
 hydr3d: version 10.1.1.05 win64 2013

Mesh Block 1  
 printing fhxmvb  
 1 71 2.419E-04 4.200E+01  
 time fhxmvb  
 2.4192505E-04 -5.0022269E+05  
 5.9960008E-01 -1.0272350E+04  
 1.1999235E+00 -9.7402568E+03  
 1.8002441E+00 -9.6742070E+03  
 2.4001386E+00 -1.0777629E+04  
 3.0005467E+00 -9.2849980E+03  
 3.6001947E+00 -1.0107168E+04  
 4.2000618E+00 -9.9119951E+03  
 4.8000026E+00 -1.0002116E+04  
 5.3992538E+00 -1.0376929E+04  
 6.0000119E+00 -9.5335186E+03  
 6.5998797E+00 -1.0298981E+04  
 7.2007170E+00 -9.7414043E+03  
 7.8005052E+00 -9.7726074E+03  
 8.4006882E+00 -9.9024160E+03  
 9.0005598E+00 -9.7660635E+03  
 9.5996494E+00 -9.3267090E+03  
 1.0199640E+01 -1.0119446E+04  
 1.0799313E+01 -9.8768506E+03  
 1.1400654E+01 -9.5823369E+03

1.2000082E+01 -9.7612852E+03  
 1.2599776E+01 -1.0096302E+04  
 1.3199900E+01 -9.8278965E+03  
 1.3800610E+01 -1.0254461E+04  
 1.4400157E+01 -1.0709477E+04  
 1.4999518E+01 -1.0248105E+04  
 1.5600108E+01 -1.0056248E+04  
 1.6200308E+01 -1.0083259E+04  
 1.6800400E+01 -1.0499490E+04  
 1.7400425E+01 -1.0244562E+04  
 1.8000422E+01 -1.0296801E+04  
 1.8599520E+01 -9.6774932E+03  
 1.9200134E+01 -9.6841074E+03  
 1.9799416E+01 -9.6892705E+03  
 2.0399439E+01 -9.5416240E+03  
 2.0999187E+01 -9.6630303E+03  
 2.1599421E+01 -9.6931250E+03  
 2.2200903E+01 -9.2484971E+03  
 2.2800047E+01 -1.0230380E+04  
 2.3400629E+01 -9.8511416E+03  
 2.3999609E+01 -9.4525430E+03  
 2.4600332E+01 -1.0049795E+04  
 2.5199106E+01 -9.9040547E+03  
 2.5800879E+01 -9.5553965E+03  
 2.6399525E+01 -9.7424336E+03  
 2.7000769E+01 -1.0048674E+04  
 2.7600304E+01 -9.7863438E+03  
 2.8199688E+01 -9.8261338E+03  
 2.8799913E+01 -9.8812324E+03  
 2.9399961E+01 -1.0128118E+04  
 3.0000423E+01 -9.5382109E+03

3.0600750E+01 -9.8933613E+03  
 3.1200066E+01 -9.9230176E+03  
 3.1800201E+01 -9.9428213E+03  
 3.2400623E+01 -1.0066886E+04  
 3.3000042E+01 -9.8613066E+03  
 3.3600883E+01 -1.0377896E+04  
 3.4200188E+01 -9.8787617E+03  
 3.4800529E+01 -1.0020464E+04  
 3.5400120E+01 -1.0047686E+04  
 3.6000530E+01 -1.0050784E+04  
 3.6599770E+01 -1.0026336E+04  
 3.7200272E+01 -1.0200188E+04  
 3.7799168E+01 -1.0041620E+04  
 3.8399826E+01 -1.0047596E+04  
 3.9000214E+01 -1.0135275E+04  
 3.9599461E+01 -9.8610078E+03  
 4.0199207E+01 -9.9295244E+03  
 4.0800419E+01 -9.9192158E+03

CFD skaičiavimų rezultatai 9, 7 m/s greičiu

## 6 PRIEDO TĘSINYS

## 6 PRIEDO TĖSINYS

CFD skaičiavimų rezultatai 10 m/s greičiu

flscon: version 10.1.1.05 win64	9.5994759E+00	-1.0792751E+04	2.8200781E+01	-1.0495479E+04
2013	1.0200401E+01	-1.0942184E+04	2.8800171E+01	-1.0576233E+04
FLOW-3D 15:18:34 05/28/2016	1.0799675E+01	-1.0619899E+04	2.9399843E+01	-1.0412095E+04
jnom	1.1399728E+01	-1.0809483E+04	2.9999800E+01	-1.0608473E+04
hydr3d: version 10.1.1.05 win64	1.2000137E+01	-1.0424765E+04	3.0600040E+01	-1.0677473E+04
2013	1.2599569E+01	-1.0072759E+04	3.1200586E+01	-1.0942118E+04
Title	1.3200394E+01	-1.0777331E+04	3.1799469E+01	-1.1194984E+04
5	1.3800344E+01	-9.9646758E+03	3.2400398E+01	-1.1275310E+04
hydr3d: version 10.1.1.05 win64	1.4399490E+01	-1.0164447E+04	3.2999691E+01	-1.1290643E+04
2013	1.5000630E+01	-1.0445157E+04	3.3599560E+01	-1.1115038E+04
	1.5600014E+01	-1.0276661E+04	3.4199989E+01	-1.0716825E+04
Mesh Block 1	1.6200329E+01	-1.0119139E+04	3.4799942E+01	-1.0574404E+04
printing fhxmvb	1.6799599E+01	-1.0289922E+04	3.5399456E+01	-1.0396083E+04
1 92 2.354E-04 5.460E+01	1.7400063E+01	-1.0792015E+04	3.5999542E+01	-1.0353138E+04
time fhxmvb	1.7999727E+01	-1.0336882E+04	3.6599598E+01	-1.0381451E+04
2.3541648E-04 -5.3002850E+05	1.8599436E+01	-1.0598097E+04	3.7200432E+01	-1.0302659E+04
5.9949476E-01 -1.1172104E+04	1.9200584E+01	-1.0647382E+04	3.7800114E+01	-1.0149930E+04
1.2004784E+00 -1.0069830E+04	1.9799574E+01	-1.0977351E+04	3.8399982E+01	-1.0784976E+04
1.7997251E+00 -9.8706572E+03	2.0399935E+01	-1.0580469E+04	3.9000469E+01	-1.0580526E+04
2.3995452E+00 -1.1360718E+04	2.0999397E+01	-1.0408665E+04	3.9600323E+01	-1.0408111E+04
2.9995368E+00 -9.6556943E+03	2.1599695E+01	-1.0508833E+04	4.0199898E+01	-1.0638340E+04
3.6003022E+00 -1.1031753E+04	2.2199331E+01	-1.0588230E+04	4.0800293E+01	-1.0412176E+04
4.1994281E+00 -1.0856597E+04	2.2799870E+01	-1.0487941E+04		
4.8003497E+00 -1.0715170E+04	2.3400372E+01	-1.0329763E+04		
5.3996210E+00 -1.0811610E+04	2.4000439E+01	-1.0541148E+04		
6.0003152E+00 -1.1053072E+04	2.4599474E+01	-9.9102949E+03		
6.5999475E+00 -1.0962382E+04	2.5200497E+01	-9.7592236E+03		
7.1998262E+00 -1.0731165E+04	2.5800375E+01	-1.0505066E+04		
7.8002920E+00 -1.0880960E+04	2.6399548E+01	-1.0632474E+04		
8.3996563E+00 -1.0625263E+04	2.6999584E+01	-1.0454249E+04		
9.0003605E+00 -1.1010564E+04	2.7599239E+01	-1.0249667E+04		

flscon: version 10.1.1.05 win64 2013  
 FLOW-3D 17:02:02 05/22/2016 wkei  
 hydr3d: version 10.1.1.05 win64 2013  
 Title  
 5  
 hydr3d: version 10.1.1.05 win64 2013

Mesh Block 1  
 printing fhxmvb  
 1 82 2.273E-04 4.860E+01  
 time fhxmvb  
 2.2728978E-04 -5.7104281E+05  
 6.0012263E-01 -1.1909449E+04  
 1.1999338E+00 -1.0887948E+04  
 1.7995821E+00 -1.1071197E+04  
 2.3998566E+00 -1.1799163E+04  
 3.0001385E+00 -1.0782555E+04  
 3.5991631E+00 -1.1576909E+04  
 4.2001324E+00 -1.1148111E+04  
 4.8003039E+00 -1.1223067E+04  
 5.3999858E+00 -1.1140145E+04  
 6.0005498E+00 -1.1753370E+04  
 6.5994263E+00 -1.1490712E+04  
 7.2000990E+00 -1.1161017E+04  
 7.8000813E+00 -1.1131173E+04  
 8.4001675E+00 -1.1106686E+04  
 8.9998245E+00 -1.1688570E+04  
 9.6004877E+00 -1.1136516E+04

1.0199687E+01 -1.1263149E+04  
 1.0800159E+01 -1.1645748E+04  
 1.1399773E+01 -1.1074003E+04  
 1.2000734E+01 -1.1816333E+04  
 1.2599601E+01 -1.1786034E+04  
 1.3200273E+01 -1.1646997E+04  
 1.3800162E+01 -1.1186769E+04  
 1.4400128E+01 -1.1637474E+04  
 1.5000057E+01 -1.1484660E+04  
 1.5600046E+01 -1.1146091E+04  
 1.6199923E+01 -1.1731114E+04  
 1.6800421E+01 -1.1510381E+04  
 1.7400015E+01 -1.1111409E+04  
 1.8000027E+01 -1.1965242E+04  
 1.8600105E+01 -1.3524634E+04  
 1.9200090E+01 -1.3542619E+04  
 1.9800003E+01 -1.3876994E+04  
 2.0400055E+01 -1.5297445E+04  
 2.0999910E+01 -1.5778585E+04  
 2.1599945E+01 -1.5082894E+04  
 2.2200027E+01 -1.4179670E+04  
 2.2799973E+01 -1.5311876E+04  
 2.3400124E+01 -1.6217592E+04  
 2.3999910E+01 -1.6536482E+04  
 2.4599991E+01 -1.5947102E+04  
 2.5199867E+01 -1.6204744E+04  
 2.5800108E+01 -6.2684883E+03  
 2.6400003E+01 -1.8531902E+04

2.6999907E+01 -1.6220100E+04  
 2.7599981E+01 -1.5908712E+04  
 2.8199902E+01 -1.5551117E+04  
 2.8799988E+01 -1.6815537E+04  
 2.9399860E+01 -1.6863568E+04  
 2.9999975E+01 -1.5658188E+04  
 3.0600107E+01 -1.5904222E+04  
 3.1199896E+01 -1.5076793E+04  
 3.1800114E+01 -1.5059538E+04  
 3.2400116E+01 -1.4475877E+04  
 3.3000130E+01 -1.3021922E+04  
 3.3600178E+01 -1.2747583E+04  
 3.4199989E+01 -1.0754818E+04  
 3.4800507E+01 -1.2580631E+04  
 3.5400517E+01 -1.1431485E+04  
 3.5999702E+01 -1.1347089E+04  
 3.6599316E+01 -1.1148841E+04  
 3.7199821E+01 -1.0248766E+04  
 3.7799595E+01 -1.1256081E+04  
 3.8400265E+01 -1.0233793E+04  
 3.9000458E+01 -1.1195480E+04  
 3.9599930E+01 -1.1933047E+04  
 4.0199955E+01 -1.0742151E+04  
 4.0799873E+01 -1.0586509E+04

CFD skaičiavimų rezultatai 10,4 m/s greičiu

## 6 PRIEDO TĘSINYS

## 7 PRIEDAS

Programinio įrankio skaičiavimo rezultatai

Klirensas  m

Santykinis klirensas

Laivo ilgis  m

Laivo plotis  m

Grimzlė  m

Suvilgyto pav. plotas  m<sup>2</sup>

δ

Vandens tankis ρ  kg/m<sup>3</sup>

Vandens klampumas φ

L/B

B/T

Skaičiuoti

Restart

Ekspimentinis laivo greitis

km/h  m/s  kts

Gauti greičio diapazoną

Min  -  Max

	Greitis									
	7,6	8	8,4	8,7	9	9,4	9,7	10	10,4	10,8
C šiurkštumo $10^{-3}$	0,4    0,3.....1,2									
C išsikišusių dalių $10^{-3}$	0,15    0,05.....0,15									
Frūdo skaičius	0,52	0,55	0,58	0,6	0,62	0,64	0,66	0,68	0,71	0,74
C liekamasis(L/B)	1,758	1,656	1,505	1,42	1,337	1,271	1,191	1,14	1,074	1,009
x(B/T)	0,931	0,927	0,923	0,921	0,925	0,929	0,93	0,928	0,924	0,921
xδ	1,023	1,025	1,027	1,029	1,033	1,036	1,038	1,037	1,039	1,051
Kc	1,002	1,003	1,004	1,004	1,005	1,006	1,006	1,007	1,007	1,007
C liekamasis	1,678	1,578	1,433	1,351	1,283	1,231	1,156	1,103	1,04	0,984
R liekamasis, kN	2,82	2,93	2,94	2,97	3,02	3,16	3,16	3,21	3,27	3,34
Reinoldso sk. $10^{-5}$	1,65	1,74	1,83	1,89	1,96	2,04	2,11	2,17	2,26	2,35
C trinties $\cdot 10^{-3}$	1,99	1,973	1,96	1,95	1,94	1,94	1,929	1,917	1,905	1,892
C trinties + C šiurkštumo $\cdot 10^{-3}$	2,39	2,373	2,36	2,35	2,34	2,34	2,329	2,317	2,305	2,292
R trinties, kN	4,01	4,41	4,84	5,17	5,51	6,01	6,37	6,73	7,24	7,77
C visas	4,218	4,101	3,943	3,851	3,773	3,721	3,635	3,57	3,495	3,426
R visas, kN	7,08	7,63	8,08	8,47	8,88	9,55	9,94	10,37	10,98	11,61
P, kW	54	61	68	74	80	90	96	104	114	125
P, AG	72	82	91	99	107	120	129	139	153	168