

KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS

Jūros technologijų ir gamtos mokslų fakultetas

Jūrų inžinerijos katedra

Mindaugas Stankevičius

**DAUGIAKORPUSIŲ LAIVŲ KORPUSŲ ĮTAKOS
PASIPRIEŠINIMUI TYRIMAS NAUDOJANT CFD
PROGRAMINĘ ĮRANGĄ**

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

Klaipėda, 2016

Lydraštis

Užduotis

SANTRAUKA

Stankevičius M. . Daugiakorpusių laivų korpusų įtakos pasipriešinimui tyrimas naudojant CFD programinę įrangą. Laivų projektavimo ir statybos magistro studijų programos baigiamasis darbas. Darbo vadovas dr. V. Djačkov, Klaipėdos universitetas: Klaipėda, 2016. – 52 p.

Raktiniai žodžiai: daugiakorpusis, katamaranas, interferencija, skaičiuojami skysčių dinamika, CFD, pasipriešinimas.

Ankstyvosiose daugiakorpusio laivo projektavimo stadijose yra svarbu įvertinti būsimo laivo pasipriešinimą. Nuo to priklauso, kokia bus reikalinga jėgainė ir kiek galutiniame etape jis svers. Abi vertės viena nuo kitos priklausomos. Pagal šiuolaikines metodikas laivo svoris gali būti ganėtinai tiksliai nustatomas projektavimo pradžioje, o tikslios metodikos įvertintini pasipriešinimą daugiakorpusiam laivui ankstyvoje projektavimo stadijoje kol kas nėra.

Darbe išanalizuoti užsienio mokslininkų atlikti tyrimai ir nustatyta, kad sudaryta nemažai metodikų, daugiakorpusių laivų atstumo tarp korpusų (klirenso ir korpusų prasilenkimo) įvertinimui, korpusams su tam tikrais L/B , B/d ir δ , parametrais. Tačiau nėra metodikų leidžiančių įvertinti katamaranų vandens pasipriešinimą keičiant laivo korpuso charakteristikas. Todėl norint paskaičiuoti korpuso konfigūraciją, kuri nepatenka į tuos diapazonus, metodikos netinkamos.

Sprendžiant šias problemas pradėtas matematinis eksperimentas su CFD programa „Flow 3D“. Šie tyrimai atskleidė, kad rezultatai nėra patikimi prie mažų greičių. Todėl darbas turi būti tęsiamas ir gauti eksperimentų duomenys lyginami ir analizuojami, siekiant sudaryti tinkamą metodiką, galinčią įvertinti atstumo tarp korpusų įtaką daugiakorpusio laivo vandens pasipriešinimui, pradinėse projektavimo stadijose.

SUMMARY

Stankevičius M . Research of influence of hulls of multihull ships to resistance using CFD software. Ship design and construction study program master thesis. Work leader dr. V. Djačkov, Klaipeda University: Klaipėda, 2016. – 52 p.

Keywords: multihull, catamaran, interference, computational fluid dynamics, CFD, resistance.

It is important to assess the ship resistance in the early stages of the design of the ship. This should determine what kind of engine and propulsion should be used and what will be the final weight of the ship. Both values are interdependent. According to the contemporary methodologies weight of the ship can be determined accurately enough already at the early design stage. But there is no methodology allowing to assess the resistance also of the multihull ships in the early stages of the design.

According to foreign scholars research results (carried out on this paper) it is found that there are a number of methodologies allowing to assess the distance between the hulls (clearance and hulls of passing) of the multihull ships with the certain L/B , B/d and δ parameters. However, there is no methodology for the assessment of the catamaran water resistance by changing the characteristics of the hull. Therefore, in order to determine the configuration, which does not fall within the above ranges, these methodologies are unsuitable.

Solving these problems the mathematical experiment was started using the program CFD Flow-3D. The experiment showed that the results are not reliable at low speeds. Therefore the work should be continued using different data and the comparable analysis of the results should be made in order to provide an appropriate methodology to assess the influence of the distance between the hulls of multi-ship's water resistance, the initial design stages.

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. CFD skaičiavimo rezultatai katamaranui	34
2 lentelė. CFD skaičiavimo rezultatai, vieno korpuso	34
3 lentelė. Interferencijos faktorius katamarano pasipriešinimui	35

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

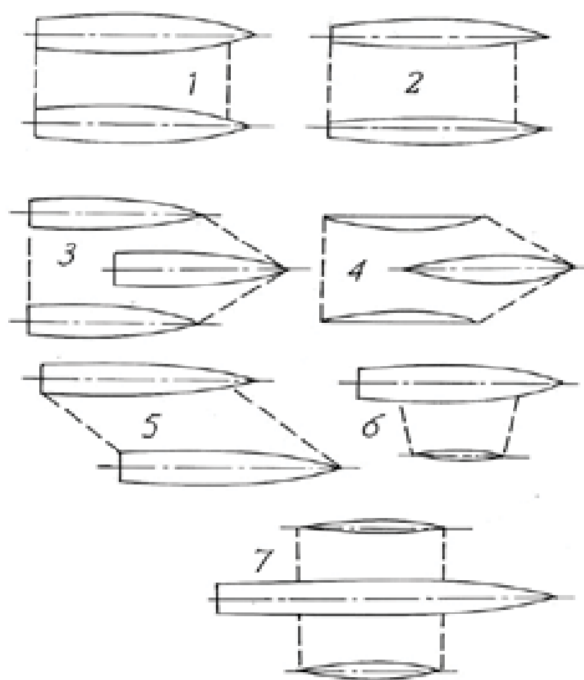
1 pav. Tradicinio korpuso formų daugiakorpusių laivų tipai.....	8
2 pav. Didžiausias dvikorpusis laivas, „Pioneering Spirit“	11
3 pav. Liekamojo pasipriešinimo palyginimas	12
4 pav. Naudojamos galios palyginimas	12
5 pav. Bangavimo pasipriešinimas	15
6 pav. Trinties pasipriešinimo susidarymas	17
7 pav. Laivo korpuso paviršiaus elementą veikiančios jėgos	17
8 pav. Slėgio pokytis einant išilgai laivo	19
9 pav. Formos pasipriešinimo susidarymas ir šio pasipriešinimo dedamosios dalys	20
10 pav. Visas vandens pasipriešinimas laivo judėjimui	20
11 pav. a) Baigtinis kontrolinis tūris V tekės lauke, b) be galo mažas skysčio elementas dV ..	26
12 pav. Laivo korpuso architektūrinis tipas.....	28
13 pav. Laivo korpuso architektūrinis tipas.....	29
14 pav. Skaičiavimų tinklo parametrai	32
15 pav. Skaičiavimų tinklas	32
16 pav. CFD rezultatai, kai: $C = 0,5$; $v = 5.98 \text{ m/s}$	33
17 pav. Interferencijos faktorius nuo Frūdo skaičiaus	36
18 pav. Pasipriešinimas nuo Frūdo skaičiaus	36

TURINYS

IVADAS	8
I. DAUGIAKORPUSIŲ LAIVŲ TYRIMŲ APŽVALGA.....	10
1.1 Mokslininkų atliktų tyrimų apžvalga	12
II. VANDENS PASIPRIŠINIMAS LAIVO JUDĖJIMUI.....	15
2.1 Pasipriešinimo atsiradimas.....	15
2.2 Vandens pasipriešinimo laivo judėjimui susidarymas	16
III. LAIVO PASIPRIEŠINIMO NUSTATYMO METODIKŲ ANALIZĖ	22
3.1 Natūriniai eksperimentai	23
3.2 Modeliniai eksperimentai.....	23
3.3 Skaičiuojamoji skysčių dinamika (CFD)	25
IV. MATEMATINIS EKSPERIMENTAS.....	28
4.1 Eksperimento planavimas	28
4.2 Flow3D paruošimas eksperimentui.....	30
4.3 Eksperimentinis tyrimas ir rezultatų apdorojimas.....	33
V. EKSPERIMENTO REZULTATŲ ANALIZĖ.....	35
IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS.....	37
LITERATŪRA.....	38
PRIEDAI.....	40

IVADAS

Daugiakorpusiai (katamaranai, trimaranai, kvadramaranai, pentamaranai) laivai tai laivai su daugiau nei vienu korpusu. Korpusu skaičius nuo dviejų iki penkių. Daugiakorpusiai populiarūs tuo, kad esant vienodai su vienkorpusiais laivais vandentalpai, turi didesnę denio plotą, didesnę keleivių talpą, mažesnę grimzlę, didesnę greitį ir geresnę eigumą. Didesnis denio plotas reiškia, kad daugiakorpusiai laivai yra ekonomiškesni gabenant daugelį rūšių „tūrinių“ krovinių kaip pavyzdžiui keleivius kajutėse, konteinerius, automobilius ir kitas ratuotas transporto priemones, laboratorijas, ginklus, įskaitant lėktuvus ir sraigtasparnius ir t.t. Be to lyginant juos su vienkorpusiais laivais daugiakorpusiai laivai yra saugesni, dėl jų didesnio ir lengviau pasiekiamo skersinio stovumo ir didesnių virš vandeninių tūrių. Daugiakorpusiai laivai gali susidėti iš įvairaus skaičiaus korpusų iš tradicinės ir netradicinės formos ir iš korpusų su mažu vaterlinijos plotu (MVP) (1 pav.).



1 pav. Tradicinio korpuso formų daugiakorpusių laivų tipai.

1,2 – katamaranas su simetriniais ir nesimetriniais korpusais, 3,4 – trimaranas su simetriniais ir nesimetriniais korpusais, 5 – katamaranas su prasilenkiančiais korpusais, 6 – laivas su vienu autrigeriu (proa) 7 – laivas su dviem autrigeriais. (Dubrovsky, 2005, 4 p.)¹¹

Dauguma daugiakorpusių laivų yra keleiviniai arba keleiviniai-krovininiai, kadangi jie puikiai pritaikyti gabenti keleivius ir yra pirmaujantys greitaiegių keltų rinkoje. Dažniausiai šie laivai gabena keleivius palyginti nedideliais atstumais, dideliu greičiu ir aukšto komforto ir saugumo sąlygomis.

Problemos aktualumas.

Daugiakorpusių laivų dalis pasipriešinimo priklauso nuo korpusų sąveikos, todėl svarbu išanalizuoti atstumo tarp korpusų įtaką, ir turėti galimybę taikyti pasipriešinimo skaičiavimuose. Žinoma, kad nuo to, kaip vanduo priešinasi laivo judėjimui, priklauso ne tik laivo greitis ir kuro sunaudojimas, bet ir galutinis rezultatas ženkliai laivo eksploatacijos sąnaudų dalis. Vis dar aktuali problema daugiakorpusių laivų vandens pasipriešinimo įvertinimas, tam kad būtų galima apskaičiuoti laivo korpuso pasipriešinimą projektavimo metu ir priimti optimizavimo sprendimus jam sumažinti.

Darbo tikslas ir uždaviniai.

Šio darbo tikslas įvertinti daugiakorpusių laivų, atstumo tarp korpusų įtaką laivo pasipriešinimui.

Uždaviniai:

1. Atlikti matematinį eksperimentą.
2. Nustatyti atstumo tarp vienodų korpusų įtaką bendram laivo pasipriešinimui.
3. Palyginti skaičiavimo rezultatus gautus skaičiuojant katamarano pasipriešinimą su dvigubu vienkorpūsio laivo pasipriešinimu;

I. DAUGIAKORPUSIŲ LAIVŲ TYRIMŲ APŽVALGA

Daugiakorpusiais laivais labiau susidomėta buvo praėjusio amžiaus 8-ąjį dešimtmetį. Iš pradžių buvo atkreiptas dėmesys į vidaus vandens katamaranus. Projektavimo metu didžiausias dėmesys skirtas stovumui, eigumui ir bendram stiprumui, taip pat katamaranų statybos technologijos ypatumams.

Praėjusio amžiaus 9-ąjį dešimtmetį išsiplėtė katamaranų taikymo sritis - dėl daugybės privalumų lyginant su vienkorpusiais laivais jie pradėti naudoti atviroje jūroje. Didelis denio plotas, geros tinkamumo jūrai plaukianti charakteristikos, didelis greitis ir aukštas komforto lygis paskatino daugiakorpusių keleivinių keltų statybos augimą. Įvairių tipų daugiakorpusiai laivai turi didesnę denio plotą palyginus su vienkorpusiais laivais. Didesnio denio ploto privalumo kaina keleiviniuose laivuose yra didesnis laivo plotis. Tai gali būti laivo statybos ir statymo į doką problema. (Dubrovsky, 2005, 5 p.)⁷

Praėjusio amžiaus 7-ojo dešimtmečio viduryje didėja greitaeigių keleivinių keltų skaičius, 9-ojo dešimtmečio viduryje atsiranda greitaeigiai automobilių-keleivių keltai, kurių skaičius taip pat nuolat didėja. Nuo 1990 iki 1997 metų greitaeigių eksploatuojamų keltų skaičius padidėjo 43% (nuo 570 iki 814 vnt.), be to, jų vidutinė keleivių talpa padidėjo apytiksliai 40%. Vadinasi, bendra keleivių talpa per tą laiką išaugo beveik du kartus. Greitaeigiai keltai intensyviausiai vystėsi praėjusio amžiaus 10-ojo dešimtmečio pabaigoje, kada jų ilgis padidėjo iki 140 m, keliamoji galia - iki 500 automobilių, keleivių talpa - iki 1500 žmonių

Katamaranai paprastai siejami su didelio greičio laivais. „Luciano Federico L“ (1997m.) yra vienas greičiausių katamaranų keltų pasaulyje ir gali talpinti iki 450 keleivių ir 52 automobilių. Tai 1130 tipo katamaranas, kurio korpuso ilgis 77.32m, plotis 19m ir grimzlė 2.15m. Jo pasiekiamas kreiserinis greitis 58 mazgai. Kaip pats greičiausias keltas pasaulyje jis yra įtrauktas net į Gineso rekordų knygą (<http://maritime-connector.com/ferry/>)

Projektas, kuris savyje talpina daugiakorpusių laivo privalumus lyginant su vienkorpusiais yra kompanijos „Allseas Gloup S.A.“ vis dar statomas dvigubo korpuso laivas „Pioneering Spirit“: 382 m ilgio ir 124 m pločio. Projekto pradžia 2009m, o planuojama eksploatacijos pradžia šiuo daugiafunkciniu ofšorinio serviso laivu, 2016 metų vasara. Išsikišę korpusai priekyje sudaro lanką, kuris yra lyg „lizdas“, 122 m ilgio ir 59 m pločio. Tai leidžia apglėbti platformą ir pašalinti visą naftos platformos antstatą vienu pakėlimu. Kranai/verstuvai laivagalyje pakels iš vandens ir pasikraus visa platformos povandeninę dalį. Taip pat laivas aprūpintas ir vamzdžių bei kabeliu tiesimo įranga leisiančia tiesti rekordinių dydžių vamzdžius net labai giliuose vandenyse. (<http://allseas.com/equipment/pioneering-spirit/>)

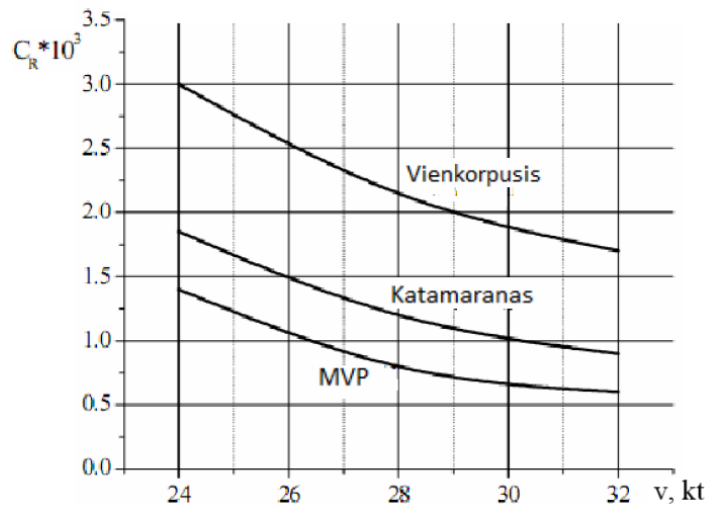


2 pav. Didžiausias dvikorpusis laivas, „Pioneering Spirit“. (Allseas 2016). (Allseas Group S.A.)

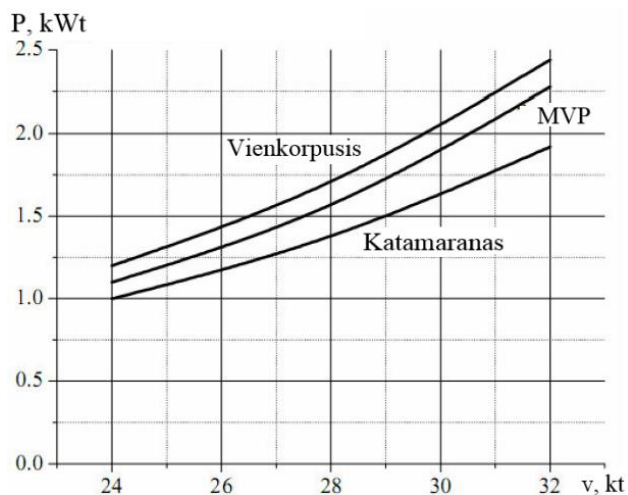
Dėl didesnio antvandeninės dalies tūrio daugiakorpusiai laivai gali užtikrinti papildomą plūdrumo atsargą ir padidintą apsaugą nuo pažeidimo ir užliejimo. Dėl vidinių korpuso tūrių padalinimo į dalis, tik dar labiau užtikrinamas stabilumas korpuso pažeidimo atveju.

Taip pat daugiakorpusiai laivai turi didesnę vandens suvilgytą plotą negu vienkorpusiai, tai gali būti kompensuojama didesniu korpuso matmenų santykiu, kas sumažina bangavimo pasipriešinimą. Dėl didesnio suvilgyto paviršiaus ploto, visas buksyravimo pasipriešinimas daugiakorpusių laivų yra mažesnis negu vienkorpusių laivų su tuo pačiu denio plotu, plaukiant dideliais greičiais. (Dubrovsky, 2005, 1 p.)⁷

Kelis palyginimus galima pamatyti (3) ir (4) paveikslėliuose, kur pavaizduotos liekamojo pasipriešinimo ir naudojamos palyginimas trijų tipų laivams turintiems vienoda tonažą 100 (t) ir ilgį 35 (m). (Dubrovsky, 2005, 2 p.)⁷



3 pav. Liekamojo pasipriešinimo palyginimas. (Dubrovsky, 2005, 5 p.)⁷



4 pav. Naudojamos galios palyginimas. (Dubrovsky, 2005, 5 p.)⁷

1.1 Mokslininkų atliktų tyrimų apžvalga

Projektuojant daugiakorpūsius laivus labai svarbu įvertinti jų bangavimo ir bendrą pasipriešinimą. Bendrą katamarano pasipriešinimą sudaro: trinties pasipriešinimas, liekamasis pasipriešinimas (nagrinėjamas, kai nėra korpusų sąveikos) ir papildomas pasipriešinimas, atsirandantis dėl greičių ir slėgių sąveikos. Papildomą pasipriešinimą sudaro bangavimo pasipriešinimas, atsirandantis dėl korpusų bangų sistemų sąveikos, trinties pasipriešinimas, atsirandantis dėl greičių tarp korpusų padidėjimo, ir formos pasipriešinimas. Pagrindinį vaidmenį papildomam pasipriešinimui turi bangavimo pasipriešinimas ir trinties pasipriešinimas, kurie didėja, didinant greitį (Дубровский, 1968, 12-16 c.)¹⁷.

Modelinius ir matematinius eksperimentus atliko Stefano Zaghi, Riccardo Broglia ir Andrea di Mascio. Savo darbe jie analizavo greitaeigių katamaranų klirenso tarp korpusų įtaką bangų

interferencijai, Frūdo skaičių keičiant nuo 0,2-0,8. Modelinių bandymų ir matematinių eksperimentų skaičiavimo rezultatai derėjo tarpusavyje. Tyrimo rezultatai parodė, kad prie Frūdo skaičiaus iki 0,45 atstumas tarp korpusų turi nedidelę įtaką bangų interferencijai. Kai Frūdos skaičius daugiau už 0,45 bangų interferencijos įtaka didėja, o šią įtaką galima sumažinti didinant atstumą tarp korpusų. Vis dėl to, autorių išvados buvo, kad reikia atlikti daugiau matematinių eksperimentų, kad geriau suprasti naudingosios interferencijos priežastis. (Zaghi, et al., 2010, 528-533 p.)¹³

Daugiakorpusių laivų pasipriešinimą nedidelio gylio vandenyse tyrė A. Aubault ir R.W. Yeung. Jie pasiūlė matematinį modelį pasipriešinimui skaičiuoti. Autorių pasipriešinimo modelis susideda iš atskirų korpusų pasipriešinimo ir papildomo pasipriešinimo, kurį sudaro bangavimo pasipriešinimas, atsirandantis dėl korpusų bangų sistemų sąveikos. Korpusų įtaka vienas kitam įvertinama integruojant pagal bangos kampą. Nagrinėjama pasipriešinimo priklausomybė nuo atstumo tarp korpusų (klirenso ir korpusų prasilenkimo). Skaičiavimai atlikti 60 serijos korpusų katamaranui, esant dideliame Frūdo skaičiui (0,8 ir 1,3). Autoriai išskiria problemą, kai reikia įtraukti papildomų korpusų parametrus atliekant pasipriešinimo skaičiavimus trims 60 serijos korpusams (trimaranui). (Aubault, et al., 2009, 1-4 p.)¹

M.R. Javanmardi, E. Jahanbakhsh, M.S. Seif, H.Sayyaadi tyrė trimarano hidrodinamines savybes. Autoriai tyrė įtaką vandens pasipriešinimui nuo atstumo tarp korpusų ir korpusų prasilenkimo, prie greičių, - nuo 4 iki 6 m/s. Autoriai pateikė pasiūlymą, kaip išdėstyti korpusus prie tam tikrų greičių, kad kuo mažesnę įtaką laivo pasipriešinimui turėtų laivinės bangos. (Javanmardi, et al., 2008, 11-17 p.)⁸

Taip pat šie autoriai analizavo trimarano manevringumą. Autoriai tyrė tris trimarano variantus su skirtingais korpusų išilginiais atstumais: kai autrigeriai priekis sutampa su pagrindinio korpuso priekiu, taip pat kai autrigeriai galai sutampa su pagrindinio korpuso galu, trečias variantas kai autrigeriai išdėstyti viduryje. Gauti rezultatai parodė, kad kai visi trys korpusų priekiai sutampa nepageidaujama kombinacija manevringumui, laivo pasvyrant apsisukimo metu autrigeriai pakyla virš vandens, taip pat gaunamas didžiausias laivo apsisukimo spindulys. Kai korpusai išdėstyti per vidurį gaunamas mažiausias laivo apsisukimo spindulys, kai korpusų galai sutampa apsisukimo spindulys nežymiai didesnis, bet apsisukimui reikalinga mažiausia traukos jėga, taigi tai palankiausias korpusų išdėstymas pasipriešinimo atžvilgiu. Gauti rezultatai naudingi trimaranų projektavimo pradinėse stadijose. (Javanmardi, et al., 2008, 249-256 p.)⁹

George Zaraphonitis, Dimitris Spanos, Apostolos Papanikolaou atliko modelinius bandymus ir matematinį eksperimentą analizuojant simetrinių ir nesimetrinių greitaeigių katamaranų pasipriešinimą. Autoriai analizavo tris katamaranų tipus: simetrinį, nesimetrinį su lygiu bortu į vidinę pusę, o išlenktu į išorinę ir nesimetrinį su lygiu bortu išorinėje pusėje ir išlenktu vidinėje.

Bandymų ir matematinio eksperimento derėjo tarpusavyje.

Asimetrinio korpuso katamaranas su išlenktu laivo šonu į vidų bendras pasipriešinimas išaugo, lyginant su simetriniu katamaranu. Priešingo tipo katamarano su plokščiu bortu į vidų korpusų sąveika žymiai mažesnė, be to autoriai nustatė, kad ir klirenso kitimas tokio tipo korpuso bendram pasipriešinimui daro mažiau įtakos. (Zaraphonitis, et al., 2007, 1-13 p.)¹⁴

Thomas Mynard, Prasanta K Sahoo, Jon Mikkelsen ir Dan MacGreek atliko matematinį eksperimentą ir modelinius bandymus, siekiant įvertinti bangų pasipriešinimo trimaranui, analizę. Matematinis eksperimentas atliktas su CFD programa „Shipflow“ ir „Plono kūno metodu“ keičiant prasilenkimą tarp korpusų. Matematinų eksperimentų metodų rezultatai gerai tarpusavyje dera, o modelinio eksperimento metu gautos pasipriešinimo koeficiento reikšmės truputi didesnės. Autoriai priėjo išvados, kad reikia tolimesnių eksperimentinių tyrimų, varijuojant korpuso atstumais (klirenso atstumu ir korpuso prasilenkimu), kad patvirtinti matematinio ekperimento rezultatus ir pasiūlyti regresijos modelį greitam pasipriešinimo įvertinimui trijų korpusų laivams. (Mynard, et al., 2008, 117-132 p.)¹⁰

Md Shahjada Tarafder, Kazuo Suzuki pasiūlė matematinį modelį paremtą potencialų metodu, galintį apskaičiuoti bangų sukeliama pasipriešinimą katamaranui plaukiant giliame vandenyje. Autoriai nustatė, kad bangos profilis iš vidinės korpuso pusės dėl bangų interferencijos, labiau įtakoja pasipriešinimą, negu iš išorinės korpuso pusės. Šiuo metodu nustatyta, kad naudingas bangų interferencijos poveikis yra kai Frūdo skaičius (0,39-0,42). Taip pat nustatė, kad prie didelių greičių ($Fr > 0,8$) interferencijos įtaka pasipriešinimui maža. (Tarafder, et al., 2007, 1892-1900 p.)¹³

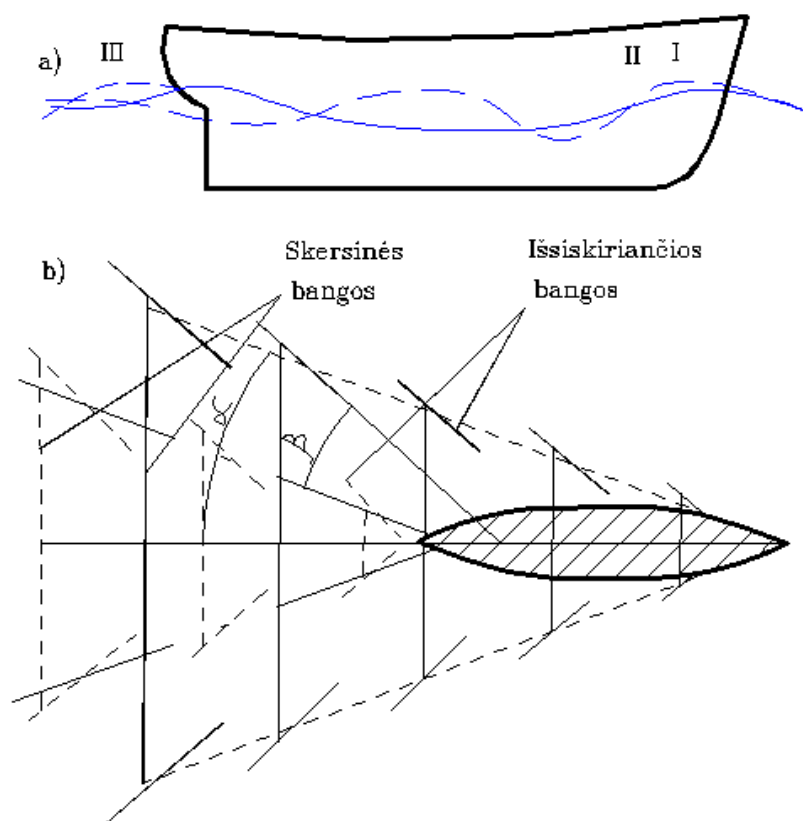
Išanalizavus šiuos tyrimus galima teigti, kad pakankamai neblogai yra ištirta vandens pasipriešinimo įtaka dviejų korpusų laivo eigumui. Sudaryta nemažai metodikų, daugiakorpusių laivų atstumo tarp korpusų (klirenso ir korpusų prasilenkimo) įvertinimui, korpusam su tam tikrais L/B , B/d ir δ , parametrais. Tačiau nėra metodikų leidžiančių įvertinti katamaranų vandens pasipriešinimą varijuojant laivo korpuso charakteristikomis plačiame diapazone. Todėl norint paskaičiuoti korpuso konfigūraciją, kuri nepatenka į tuos diapazonus, metodikos netinkamos.

II. VANDENS PASIPRIŠINIMAS LAIVO JUDĖJIMUI

2.1 Pasipriešinimo atsiradimas

Laivui tolygiai plaukiant tiesiu kursu, laivo korpusas nuolat judina artimiausią vandens masę, t.y., aplinkiniam vandeniui perduoda dalį energijos. Dalis šios energijos, kuri buvo suteikta vandeniui laivo įsibėgėjimo metu, lieka pastovi; kita dalis, kuri eikvojama vandeniui sužadinti, išsisklaido aplinkoje. Ši energija, tenkanti laivo nuplaukto kelio vienetui, lygi vandens pasipriešinimui laivo judėjimui. Visas vandens pasipriešinimas susideda iš trijų pagrindinių dalių: trinties pasipriešinimo R_F , formos pasipriešinimo R_{VP} , bangavimo pasipriešinimo R_W . Be šių pagrindinių pasipriešinimo dalių, dar yra išsikišančių dalių pasipriešinimo R_{AP} , oro pasipriešinimas R_{AA} , ir kai kurios kitos pasipriešinimo dalys (vėjo ir bangų sukeltas pasipriešinimas, baseino gylio ir kanalo pločio įtakos pasipriešinimas ir t.), būdingos plaukiojant tam tikromis sąlygomis.

Laivaprieikinės bangos yra skirstomos į laivaprieikines išsiskiriančias ir laivaprieikines skersines bangas. Taip pat ir laivagalines.



5 pav. Bangavimo pasipriešinimas: I – slėgio pokytis vandenyje laivui judant; II – laivaprieikinė banga; III – laivagalinė banga (a – slėgio pasikeitimas vandenyje arti laivo korpuso, b – laivinių bangų sistema). (Čerka J. 2005)⁴

Laivui plaukiant susidaro laivinės bangos (5 pav.), kurios pakeičia vandens dalelių greičius sraute. Laivinių bangų susidarymas susietas su tuo, kad laivui plaukiant arti laivo korpuso, vandenyje slėgis pakinta, o vandens paviršių, visur veikia vienodas oro slėgis. Laivapriekyje ir laivagalyje vandens lygis pakyla, o ties laivo mideliu nusileidžia. Iš pusiausvyros padėties išvestos vandens dalelės, sunkio jėgos veikiamos, pradeda svyruoti – judėti apskritimu. Pasikeitus greičiams sraute, persiskirsto ir slėgis išilgai laivo.

Laivui judant, laivagalyje susidaro sukuriuojantis vandens srautas, iš dalies judantis kartu su laivu. Tai hidrodinaminis pėdsakas, kuriame slėgis mažesnis nei aplinkiniame sraute. Šių trijų slėgio atstojamųjų projekcija į laivo judėjimo kryptį sudaro visą formos pasipriešinimą laivo judėjimui.

Pirmosios dvi dedamosios pasipriešinimo dalys priklauso nuo vandens klampumo, trečioji – nuo vandens tankio. Tačiau patikimai teoriškai apskaičiuoti galima tik trinties pasipriešinimą, o formos ir bangavimo pasipriešinimas tegali būti įvertintas tik apytikriai, nes šios dvi pasipriešinimo dalys priklauso nuo daugelio laivo korpuso formos charakteristikų ir nuo reiškinių, vykstančių vandenyje arti laivo korpuso. Inžinerinėje praktikoje formos ir bangavimo pasipriešinimas sujungiamas į vieną ir vadinamas likusiuoju pasipriešinimu. Tuomet visas vandens pasipriešinimas laivo judėjimui laikomas susidedančiu iš dviejų dalių.

2.2 Vandens pasipriešinimo laivo judėjimui susidarymas

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, bangavimo. (V. Stonkus, 2009)¹².

Visas vandens pasipriešinimas susideda iš trijų pagrindinių dalių: trinties pasipriešinimo R_F , formos pasipriešinimui R_{VP} , bangavimo pasipriešinimo R_W . Be šių pagrindinių pasipriešinimo dalių, dar yra išsikišančių dalių pasipriešinimas R_{AP} , oro pasipriešinimas R_{AA} ir kai kurios kitos pasipriešinimo dalys (vėjo ir bangų sukeltas pasipriešinimas, baseino gylio ir kanalo pločio įtakos pasipriešinimas ir t.t.), būdingos plaukiojant tam tikromis sąlygomis.

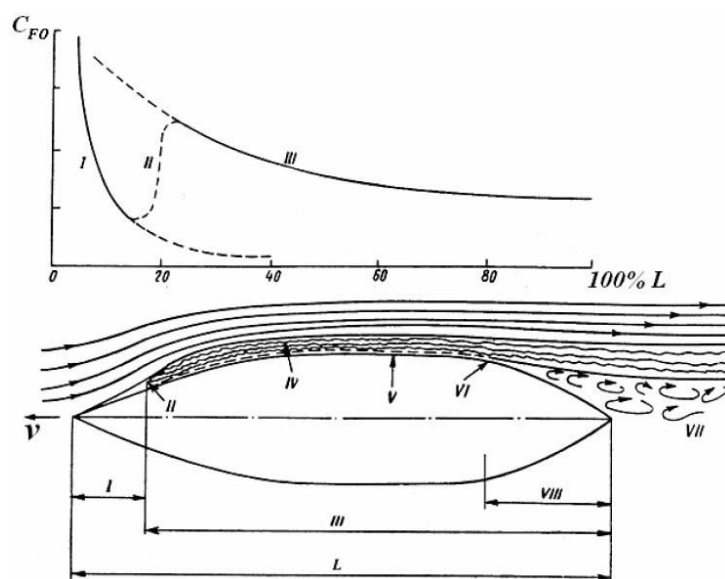
Laivo eigumo uždaviniuose nagrinėjamas atvirkštinis judėjimas: sąlyginai laikoma, kad laivas stovi vietoje, o jį aplenkia vandens srautas greičiu lygiu laivo greičiui. Dėl vandens klampumo arti laivo korpuso esančio vandens dalelės juda lėčiau nei tos, kurios yra toli nuo laivo korpuso. Taip arti laivo susidaro vandens sluoksnis, kuriame vandens dalelių greičiai mažesni – tai pasienio sluoksnis. Atsižvelgiant į srauto santykinį greitį, kuris šiuo atveju vertinamas Reinoldso skaičiumi Re :

$$R_e = \frac{vL}{\nu}, \quad (3)$$

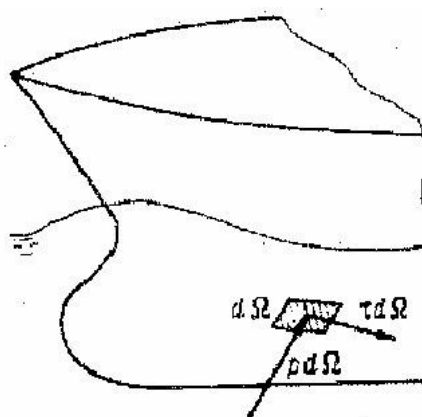
čia ν - vandens kinematinis klampumo koeficientas,
Pasienio sluoksnyje prie laivo korpuso dėl vandens klampumo susidaro tangentiniai įtempimai tarp atskirų vandens dalelių, judančių skirtingais greičiais (6 pav.). Šių įtempimų atstojamosios projekcija į laivo judėjimo kryptį vadinama trinties pasipriešinimu R_F :

$$R_F = \int_{\Omega} \tau \cos(\tau, v) d\Omega, \quad (4)$$

Čia τ - elementari trinties jėga, veikianti paviršiaus plotelyje $d\Omega$, N (7 pav.);
 v - srauto greitis, m/s .



6 pav. Trinties pasipriešinimo susidarymas: I – laminarinis, II – pereinamasis ir III – turbulentinis tekėjimo režimas pasienio sluoksnyje; IV – pasienio sluoksnio riba; V – laminarinis posluksnis; VI – pasienio sluoksnio riba; VII – hidrodinaminis pėdsakas; VIII – sūkurių zona. (Čerka J. 2005. 9p.)⁴



7 pav. Laivo korpuso paviršiaus elementą veikiančios jėgos

($d\Omega$ – paviršiaus elemento plotas, $p d$ – elementarus slėgis, τ – elementari trinties jėga). (Čerka J. 2005. 10 p.)⁴

Skaičiavimuose reali laivo korpuso povandeninė dalis pakeičiama ekvivalentine techniškai lygia plokšte. Šios plokštės plotas yra lygus laivo suvilgytojo paviršiaus plotui, o paviršiaus nelygumai tokie, kad tolesnis jų mažinimas nebeturi įtakos trinties pasipriešinimo dydžiui. Realus laivo korpuso paviršius yra nelygus ir šis nelygumas laikui esant didėja, nes yra pažeidžiamas dažų sluoksnis, korpuso paviršius apauga. Paviršiaus nelygumai vertinami vidutiniu kvadratinio nelygumų aukščiu k_δ .

$$k_\delta = \sqrt{\frac{\sum k_i^2}{n}}, \quad (5)$$

čia k_i – i-tojo nelygumo aukštis

μm ;

n – bendras nelygumų

skaičius.

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

$$k_{kr} = 1 + 0,01 \left(\frac{11,25 - L/B}{5} + 2,5 \right) \left(1,3 - \frac{B}{10d} \right) (0,35 + \varphi). \quad (6)$$

Tuomet visas trinties pasipriešinimo koeficientas C_F būtų

$$C_F = C_{F0} k_{kr} + C_A, \quad (7)$$

čia C_F – laivo korpuso trinties pasipriešinimo koeficientas,

C_{F0} – techniškai lygios plokštės trinties pasipriešinimo koeficientas,

C_A – nelygumų įtakos trinčiai koeficientas.

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

$$C_{F0} = \frac{0,45}{(\lg R_e)^{2,58}}. \quad (8)$$

Jei tekėjimo režimas yra laminarinis, tai atskirus paviršiaus nelygumus srautas apteka sklandžiai, o jei turbulentinis srautui net ir esant labai arti paviršiaus, susidaro laminarinis posluoksnis, kurio storis Reinoldso skaičiui didėjant (t.y. didėjant srauto greičiui) mažėja. Taigi

didesni nelygumai pradeda išlysti iš šio posluoksniu, kol galų gale visai atsiduria turbuliantiniame sraute, ir greitis nebeturi pastebimos įtakos trinties pasipriešinimui.

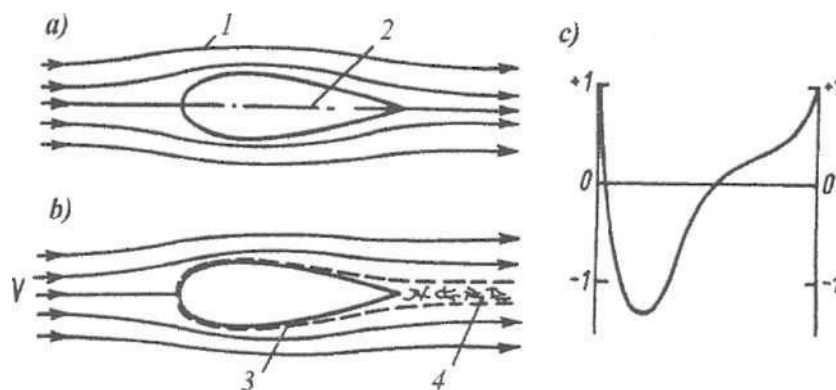
Laivui plaukiant susidaro laivinės bangos, kurios pakeičia vandens dalelių greičius sraute. Laivinių bangų susidarymas susietas su tuo, kad laivui plaukiant arti laivo korpuso vandenyje slėgis pakinta (5 pav.), o vandens pusiausvyros padėties paviršių visur veikia vienodas oro slėgis. Laivapriekyje ir laivagalyje vandens lygis pakyla, o ties laivo mideliu nusileidžia. Iš pusiausvyros padėties išvestos vandens dalelės, sunkio jėgos veikiamos, pradeda svyruoti – judėti apskritimu. Pasikeitus greičiams sraute, persiskirsto ir slėgis išilgai laivo. Suprojektavę slėgio pokyčio atstojamąją į laivo judėjimo kryptį turėsime bangavimo pasipriešinimą R_W :

$$R_W = \int_{\Omega} p_n d\Omega, \quad (9)$$

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

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

$$p + \frac{\rho v^2}{2} = const. \quad (10)$$

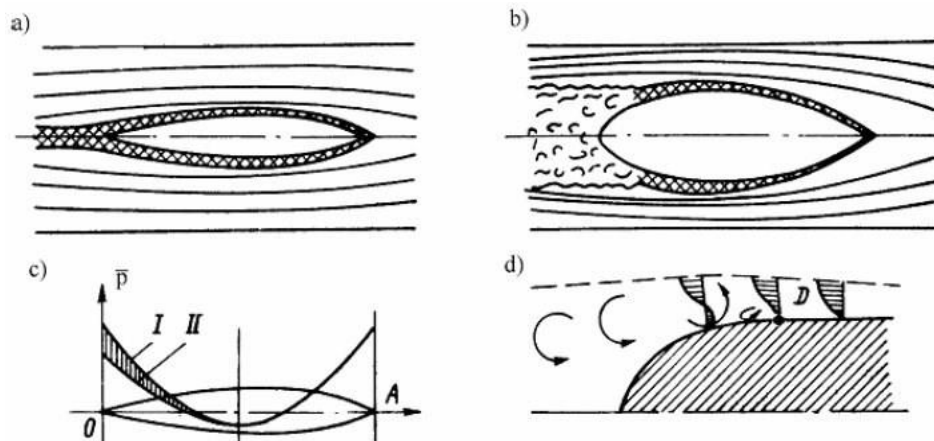


8 pav. Slėgio pokytis einant išilgai laivo (a – laminarinis srautas, b – turbulentinis srautas, c – slėgio kitimas): 1 – laivą aptekantis srautas, 2 – laivas, 3 – pasienio sluoksnis, 4 – hidrodinaminis pėdsakas. (Čerka J. 2005. 12 p.)⁴

Slėgių pokyčio suma, matoma 9 pav., sudaro vieną iš formos pasipriešinimo dedamųjų dalių. Kita formos pasipriešinimo susidarymo priežastis – pasienio sluoksnio atitrūkimas laivagalyje, nes artėjant prie laivagalio slėgis didėja $\partial P / \partial x > 0$, vandens dalelės juda su neigiamu pagreičiu. Ten, kur $\partial v_x / \partial n = 0$ – greičio epiūros liestinė sutampa su normale laivo korpusui ir greičio gradientas lygus nuliui – yra pasienio sluoksnio atitrūkimo taškas. Iki šio taško yra konfuzinė pasienio sluoksnio dalis, o už šio taško į laivagalį – difuzinė.

Trečioji priežastis – laivagalyje susidaro sukuriuojantis vandens srautas, iš dalies judantis kartu su laivu. Tai hidrodinaminis pėdsakas, kuriame slėgis mažesnis nei aplinkiniame sraute. Šių trijų

slėgio atstojamųjų projekcija į laivo judėjimo kryptį sudaro visą *formos* pasipriešinimą laivo judėjimui R_{VP} . (Čerka J. 2005. 8-13 p.)⁴

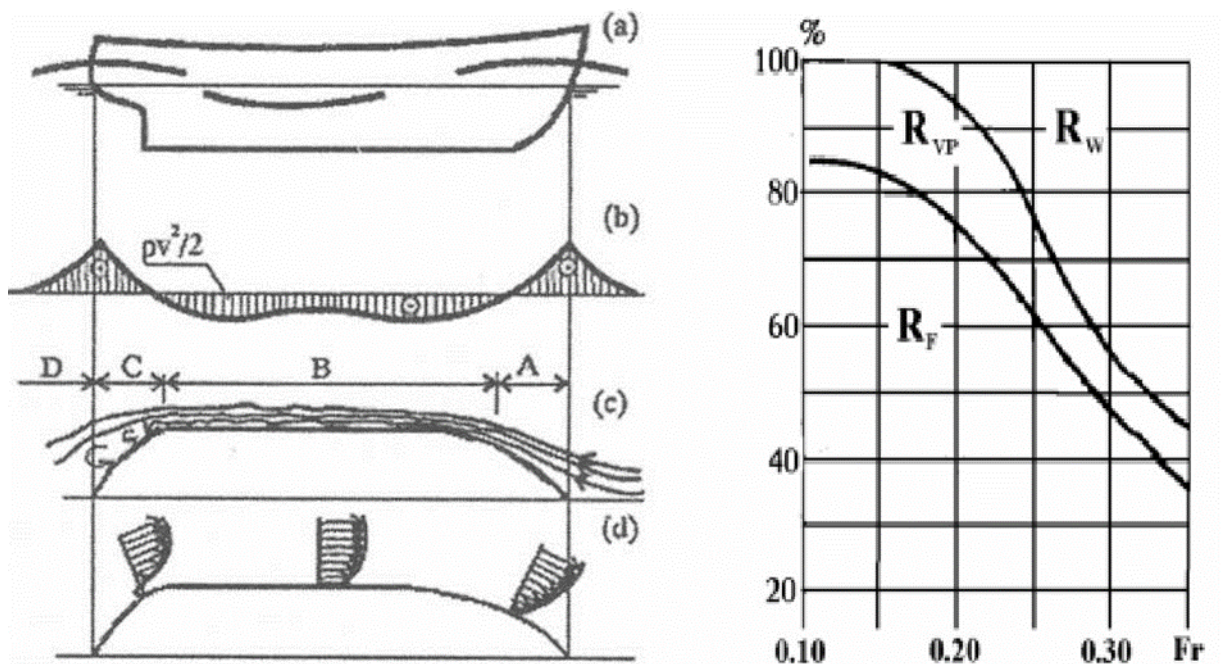


9 pav. Formos pasipriešinimo susidarymas ir šio pasipriešinimo dedamosios dalys:

a – pasienio sluoksnis esant sklandžiam aptekėjimui, b – hidrodinaminis pėdsakas, c – slėgio pasiskirstymas išilgai laivo (I – idealiame skystyje, II - vandenyje), d – pasienio sluoksnio atitrūkimas laivagalyje. (Čerka J. 2005 12 p.)⁴

Taigi visas vandens pasipriešinimas laivo judėjimui (10 pav.) susideda iš trijų pagrindinių dalių:

$$R = R_F + R_{VP} + R_W. \quad (11)$$



10 pav. Visas vandens pasipriešinimas laivo judėjimui (a – vandens lygio pokytis einant išilgai laivo; b – slėgio pokytis išilgai laivo; c – pasienio sluoksnis ir hidrodinaminis pėdsakas; d – srauto greičiai įvairiose laivo vietose; e – viso pasipriešinimo dedamosios dalys procentais atsižvelgiant į laivo greitaėgiškumą). (Čerka J. 2005. 13 p.)⁴

Pirmosios dvi dedamosios pasipriešinimo dalys (R_F , R_{VP}) priklauso nuo vandens klampumo, trečioji (R_W) – nuo vandens svarumo. Tačiau patikimai teoriškai apskaičiuoti galima tik trinties pasipriešinimą, o formos ir bangavimo pasipriešinimas tegali būti įvertintas tik apytikriai, nes šios dvi pasipriešinimo dalys priklauso nuo daugelio laivo korpuso charakteristikų ir nuo reiškinų, vykstančių vandenyje arti laivo korpuso. Inžinerinėje praktikoje formos ir bangavimo pasipriešinimas sujungiamas į vieną ir vadinamas likusiuoju pasipriešinimu R_R . Tuomet visas vandens pasipriešinimas judėjimui laikomas susidedančiu iš dviejų dalių:

$$R = R_F + R_R. \quad (12)$$

Skyriuje apžvelgta, kaip susidaro pasipriešinimas laivo judėjimui vandenyje. Atliekant matematinį eksperimentą CFD, bus pasinaudota (12) formulės išraiška imant duomenis iš skaičiavimo rezultatų.

III. LAIVO PASIPRIEŠINIMO NUSTATYMO METODIKŲ ANALIZĖ

Ypatingą vietą ir svarbą vertinant laivo jūrines savybes turi eksperimentiniai tyrimai. Tai vienas iš pagrindinių etapų kuriant naujus laivus, laivinę techniką, gerinant laivų jūrines bei eksploatacines savybes. Yra daugybė klausimų, susijusių su laivo jūrinėmis savybėmis, į kuriuos šiandieną pakankamai patikimai galima atsakyti tik atlikus atitinkamus eksperimentus. Atliekami tiek natūriniai, tiek modeliniai eksperimentai.

Pagrindinės priežastys, dėl kurių reikia atlikti modelinius arba natūrinius eksperimentus, yra:

- patikimų teorinių metodų laivo jūrinėms savybėms įvertinti nebuvimas;
- ne visuomet įmanomas išorinių veiksnių (vėjo, bangavimo ir kt.) poveikio tikslus teorinis įvertinimas;
- būtinybė patikrinti naujas skaičiavimų metodikas, naujas teorijas;
- siekis gauti duomenų naujiems empiriniams skaičiavimo metodams;
- neįmanomas tikslus laivo statybos ar remonto technologinių procesų matematinis aprašymas.

Vykdomi matematiniai ir fiziniai eksperimentai. Atliekant matematinį eksperimentą, tiriamasis objektas yra aprašomas matematinėmis formulėmis, keičiant išorines sąlygas ar objekto parametrus įvertinama jų įtaka laivo jūrinėms savybėms. Jei matematinis eksperimentas neįmanomas, reikia atlikti fizinį eksperimentą. Šiuo atveju prieš pradedant patį eksperimentą yra vykdomas matematinis eksperimento planavimas. Jo tikslas - preliminariai numatyti galimą tiriamojo objekto matematinį modelį, iki minimumo sumažinti eksperimento trukmę ir apimtį, optimizuoti eksperimento eigą.

Reikia pažymėti, kad laivo hidroaeromechanikos eksperimentai reikalauja nemažai laiko, lėšų aparatūrai ir brangiai laboratorinei įrangai. Todėl jų atlikimo metodika paprastai kruopščiai rengiama keliais etapais:

- parengiama teorinė paties eksperimento programa ir metodika;
- sudaromas rezultatų fiksavimo ir apdorojimo planas;
- tikrinama eksperimento eiga fiksuojant ir apdorojant rezultatus nedideliu mastu;
- jei reikia, tikslinama ir koreguojama eksperimento programa ir metodika; • atliekami pagrindiniai išsamūs eksperimentai. (Čerka, 2009, 133)⁶

3.1 Natūriniai eksperimentai

Natūriniai eksperimentai dažnai trunka labai ilgai ir yra pernelyg brangūs, bet tais atvejais, kai tiriamasis objektas ir jo sąveika su aplinka yra labai sudėtinga, pirmenybė teikiama natūriniams eksperimentams. Pavyzdžiui, praktiškai neįmanomas natūrinis eksperimentas, skirtas mažo žvejybos laivo stovumui įvertinti esant lūžtančioms bangoms ir gūsingam vėjui. Tokių hidrometeorologinių sąlygų gali tekti laukti pernelyg ilgai, o vykdant eksperimentą laivas neišvengiamai būtų apgadintas arba nuskandintas. Be to, nereikia pamiršti, kad modelių laivo teorijos eksperimentų rezultatams daugiau ar mažiau įtakos turi mastelinis efektas – ne visi reiškiniai, vykstantys sraute, aptekančiame laivo modelį, yra tokie pat kaip natūralaus laivo sraute. Taip pat modelis yra visuomet tik schematizuotas laivo atvaizdas.

Visus natūrinius eksperimentus galima suskirstyti į propulsinius (greituminiai, buksyravimo, traukos), manevrinius ir laivo elgsenos jūroje bei tinkamumo plaukiooti. Greituminiai bandymai skirti laivo greičiui nustatyti ramiaame, pakankamai giliame vandenyje, laivo varikliui dirbant įvairiais režimais. Čia yra patikrinamas vandens pasipriešinimas laivo judėjimui, sraigto darbas bei variklio darbas skirtingo jo apkrovimo atvejais. Greituminiai bandymai atliekami giliame vandenyje, kad išvengtų sekliųjų vandenų įtakos vandens pasipriešinimui judant laivui. Jeigu būtina ištirti sekliųjų vandenų įtaką, greituminiai bandymai atliekami skirtingo gylio vandenyse.

Buksyravimo bandymai atliekami siekiant nustatyti vandens pasipriešinimą laivo judėjimui. Kai kurie čia paminėti natūriniai eksperimentai paprastai atliekami su kiekvienu naujai statomu serijos laivu, taip pat po laivo kapitalinio remonto, arba kilus būtinybei įvertinti laivo jūrinės savybės.

Atliekant natūrinius eksperimentus laivo jūrinės savybės įvertinamos matuojant daug įvairių dydžių. Pagrindiniai matavimo objektai yra laivo greitis, įvairūs laivo energetinės įrangos parametrai, kampiniai ir linijiniai laivo poslinkiai esant bangavimui, virpesių periodai ir t.t. (Čerka, 2009, 134-135)⁶

3.2 Modeliniai eksperimentai

Modeliniai bandymai atliekami specialiose hidroaerodinaminėse laboratorijose. Šiose laboratorijose yra modeliuojami tiesioginio arba atvirkštinio judėjimo eksperimentai. Tiesioginis judėjimas, kai tiriamojo objekto modelis juda vandenyje ar ore, atvirkštinis judėjimas, - objekto modelis stovi vietoje, o jį apteka srautas. Tiesioginis judėjimas modeliuojamas bandymų baseinuose, o atvirkštinis – hidrolatakuose, aerodinaminiuose vamzdžiuose.

Projektuojant naują laivą galutinis sprendimas dėl jo eigumo yra priimamas pagal modelių bandymų rezultatus. Kad modelių bandymų rezultatus galima būtų perskaiciuoti natūriniam laivui,

būtina laikytis panašumo kriterijų reikalavimų. Yra trys grupės panašumo kriterijų: geometrinio, kinematinio ir hidrodinaminio panašumo kriterijai.

1. Dvi sistemos geometriškai panašios, jei atitinkami linijiniai matmenys abiejose sistemose skiriasi vienodą skaičių kartų, o bedimensinės geometrinės charakteristikos vienodos.

$$\frac{L}{L_m} = \frac{B}{B_m} = \dots = \text{const} = k. \quad (12)$$

2. Dvi geometriškai panašios sistemos bus panašios ir kinematiškai, jei atitinkami laiko tarpai abiejose sistemose skirsis vienodą skaičių kartų:

$$\frac{t}{t_m} = \tau; \quad (13)$$

$$\frac{v}{v_m} = \frac{k}{\tau}, \quad (14)$$

čia k – tiesinis mastelis, τ – laiko mastelis.

3. Dvi kinematiškai panašios sistemos bus panašios ir hidrodinamiškai, jei atitinkamos jėgos abiejose sistemose bus proporcingos. Esant nusistovėjusiam laivo judėjimui, hidrodinaminis panašumas tarp laivo modelio ir natūros bus tik esant lygiems modelio ir natūros Frūdo ir Reinoldso skaičiams: $Fr = Fr_m$ ir $Re = Re_m$.

Atliekant laivų modelinius bandymus, vienu metu pasiekti Frūdo ir Reinoldso skaičių lygybės dažniausiai nepavyksta. Paprastai apribojama tik Frūdo skaičių lygybe ir kartu iki galo yra modeliuojami tik reiškiniai, priklausantys nuo vandens svarumo (t.y. laivinių bangų susidarymas).

O ne iki galo modeliuojami reiškiniai, priklausantys nuo vandens klampumo (t.y. trinties ir formos pasipriešinimas). Kuo modelio mastelis mažesnis, tuo daugiau skiriasi modelio ir natūros Reinoldso skaičiai ir tuo daugiau pasireiškia vadinamasis mastelinis efektas.

Atliekant modelinius buksyravimo bandymus, matuojamas modelio pasipriešinimas R_m ir buksyravimo greitis v_m . Natūralaus laivo greitis, perskaičiuojant eksperimento duomenis, nustatomas pagal Frūdo panašumo kriterijų:

$$\frac{v_m}{\sqrt{gL_m}} = \frac{v}{\sqrt{gL}}, \text{ arba } v = v_m \sqrt{k}. \quad (15)$$

Pasipriešinimo jėgos perskaičiuojamos vienu iš šių dviejų metodų: pirmas metodas pagrįstas klampumo pasipriešinimo skaidymu į dedamąsias dalis. Tariaama, kad esant modelio ir natūros Frūdo skaičių lygybei iki galo modeliuojamas likęs pasipriešinimas R_R . Kartu bus vienodi modelio ir natūros likusio pasipriešinimo koeficientai, jei $Fr = Fr_m$. Tai Frūdo metodas.

Antrasis modelių bandymų rezultatų perskaičiavimo į natūrą metodas pagrįstas prielaida, kad klampumo pasipriešinimas proporcingas trinties pasipriešinimui:

$$C_v = f C_F, \quad (16)$$

čia C_v – klampumo pasipriešinimo koeficientas; f – proporcingumo koeficientas, nustatomas pagal eksperimento duomenis.

Žinoma, kad proporcingumo koeficientas f nedaug priklauso nuo laivo greičio ir yra vienodas tiek dėl modelio, tiek dėl natūros. Šios koeficiento reikšmė nustatoma pagal modelinių bandymų rezultatus. Parenkamas modelio greitis, tenkinantis sąlygą $Fr_m \leq 0,10 \div 0,12$. Tuomet modelis praktiškai nepatiria bangavimo pasipriešinimo ir visas pasipriešinimas susideda tik iš klampumo pasipriešinimo:

$$C_{vm} = \frac{2R_m}{\rho_m v_m^2 \Omega_m}, \quad (17)$$

čia C_{vm} – modelio klampumo pasipriešinimo koeficientas;

R_m – modelio pasipriešinimas, kai $Fr_m \leq 0,10 \div 0,12$;

ρ_m – vandens masės tankis bandymų baseine;

v_m – modelio buksyravimo greitis.

Toliau esant pasirinktam modelio greičiui, apskaičiuojamas Reinoldso skaičius ir trinties pasipriešinimo koeficientas.

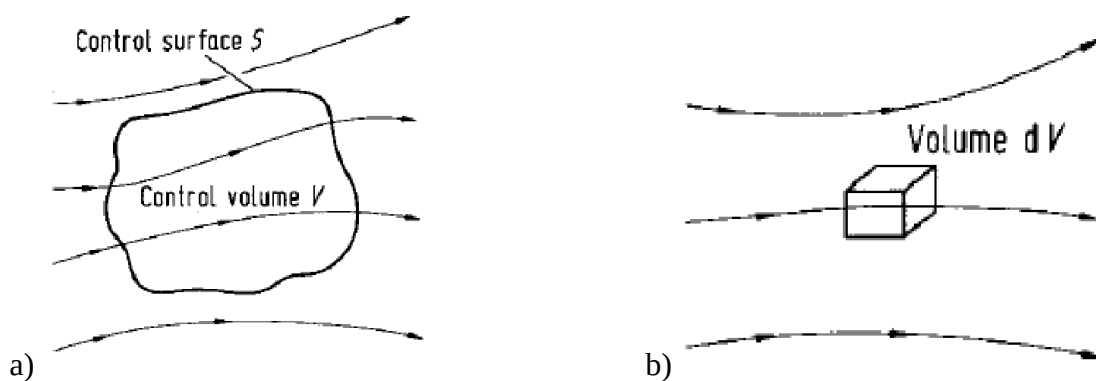
Perskaičiuojant modelinių bandymų rezultatus natūrai reikia nepamiršti, kad į laivo viso pasipriešinimo sudėtį įeina oro pasipriešinimas, išsikišusių dalių pasipriešinimas, korpuso nelygumų pasipriešinimas. (Čerka, 2005, 30-36)⁴

3.3 Skaičiuojamoji skysčių dinamika (CFD)

Skaičiuojamoji skysčių dinamika (ang. CFD – computational fluid dynamics) yra metodas skaitmeniškai tirti hidrodinamines ar aerodinamines sistemas, šiuos reiškinius aprašančių diferencialinių lygčių dalinėmis išvestinėmis sprendinių ieškant ne analiziniu pavidalu, o kaip skaitinių verčių, atitinkančių pasirinkto koordinačių tinklėlio taškus tam tikru laiku. Naudojant šiuolaikinius CFD programinius paketus tapo įmanoma itin detalai nustatyti ir vizualiai pateikti vandens tėkmę aplink laivą ir jo elementus, bei jų sąveiką su bangomis. Taip pat tapo įmanoma apskaičiuoti jėgas, veikiančias laivo korpusą, tokias kaip trintis, šoninė jėga ir kt. Šiuo metu CFD svarba tapo lygiavertė tiek grynai teoriniam, tiek ir eksperimentiniam hidrodinamikos problemų nagrinėjimui. CFD svarba pasidaro akivaizdi atsižvelgus į vis augančią eksperimentinių tyrimų kainą palyginus su vis pingančia kompiuterine technika.

Skaičiuojamoji skysčių dinamika remiasi šiais pagrindiniais fizikos principais: masės tvermės dėsniu, antruoju Niutono dėsniu ir energijos tvermės dėsniu. Šie fizikiniai principai toliau pritaikomi tam tikram skysčio modeliui. Tekantį skystį aprašyti galima dviem būdais: nagrinėjant baigtinį kontrolinį tūrį, arba be galo mažą skysčio elementą.

Nagrinėjant baigtinį kontrolinį tūrį tėkmės lauke išskiriamas tam tikro tūrio V ir paviršiaus ploto S elementas (11a pav.). Tada analizuojamas nebe visas tėkmės laukas, o tik skystis, apribojamas pasirinktu kontūru. Baigtiniam kontroliniam tūriui pritaikius pagrindinius fizikinius principus galima tiesiogiai rasti tėkmę aprašančias lygtis integraline forma, kurias savo ruožtu galima pervesti į lygtis dalinėmis išvestinėmis. Priklausomai nuo to, ar kontrolinio tūrio padėtis erdvėje yra fiksuota, o skysčio dalelės juda per elemento apribojamą plotą, ar tūris juda kartu su tėkme taip, kad jame lieka tos pačios skysčio dalelės, gaunamos tėkmės lygtys arba pusiausvyroje, arba nepusiausvyroje formose.



11 pav. a) Baigtinis kontrolinis tūris V tėkmės lauke, b) be galo mažas skysčio elementas dV . (Bertram V. 2000. 17 p.)²

Kitu atveju galima tėkmės lauke išskirti be galo mažą skysčio elementą dV (11b pav). Tačiau nors šis tūris atitinka matematinę diferencialą, laikoma kad jame yra pakankamai daug molekulių, kad jo apribojamą medžiagą galima laikyti vienalyte. Tokiam skysčio modeliui pritaikius pagrindinius fizikinius principus tiesiogiai gaunamos tėkmės lygtys dalinėmis išvestinėmis. Analogiškai baigtinio kontrolinio tūrio atveju, nagrinėjant erdvėje fiksuotą tūrio elementą gaunamos pusiausvyros, o jei tūrio elementas juda išilgai tėkmės linijų su greičio vektoriumi $\mathbf{v}$, išvedamos nepusiausvyros formos tėkmės lygtys.

CFD metodas taip pat gali sumažinti paklaidas, atsirandančias dėl mastelių skirtumo tarp laivo ir jo modelio. Anksčiau, nebent laivo korpusas buvo panašių savybių į jau ištirtą. Projektavimo metu būdavo atliekama daug bandymų su modeliais. Laivų projektai būdavo testuojami, taisomi, vėl testuojami ir t.t., o kiekvienoje bandymo stadijoje buvo pagaminama iki 10 modelių. Dėl ekonominių sumetimų tokios procedūros labai nepraktiškos, o CFD dėka – jau nebūtinos. CAD (Computer Aided Design) programinių paketų pagalba laivai projektuojami kompiuteriu, po to skaitmeniniai modeliai

perkeliami į CFD programinius paketus. Šitaip gaunamas optimalių laivo, tenkinantis keliamus jam reikalavimus Tokiu būdu projektuojamas laivas jau su jam keliamais reikalavimais ir tik po to gaminamas modelis eksperimentui, kurio tikslas yra tik laivo savybių patikrinimas realiomis sąlygomis.

CFD privalumai:

- Nedidelės laiko ir finansinių išteklių sąnaudos ruošiant naujus projektus.
- Galimybė analizuoti probleminius klausimus, kurių eksperimentai galėtų būti sudėtingi ir pavojingi.
- Metodika leidžia analizuoti sistemas, kai sąlygos viršija kritines ribas.
- Neribotas rezultatų išsamumas. Atliekant eksperimentą ir norint gauti išsamesnių, tikslesnių ir įvairesnių rezultatų, kaina dar padidėja.

Trūkumai:

- Galimi nepakankamai tikslūs rezultatai.
- Kad paspartinti skaičiavimus, svarbu tam tikrus matematinius supaprastinimus. Jei tai bus atlikta tinkamai, rezultatai bus tikslesni.
- Neįgudusio vartotojo nepasvertas pasitikėjimas, jog gauti rezultatai yra teisingi. (Romero J. E. G.2011 6 p.)¹¹

Skyriuje trumpai apžvelgta, kokius bandymus galima atlikti su laivo modeliu tam tikruose jo vykdymo etapuose, norint gauti korpuso pasipriešinimo vertinimą. Tiksliausias metodas, natūriniai eksperimentai, bet jų neįmanoma atlikti projektavimo pradžioje. Modelio tyrimai bandymų baseinuose, pakankamai patikimi, tačiau reikalauja daug laiko juos atlikti. Jei norima modeli patobulinti eksperimentai pradedami nuo pradžių, o tai vėl laiko sąnaudos. CFD vertinimas, gera alternatyva laivo jūrinių savybių vertinimui projektavimo pradžioje tačiau dar nėra pakankamai gerai sudarytos metodikos, kad gauti kuo tikslesnius rezultatus.

IV. MATEMATINIS EKSPERIMENTAS

4.1 Eksperimento planavimas

Atlikus užsienio autorių tyrimu apžvalga tampa aišku, kad iki šiol buvo daug dėmesio skirta daugiakorpusio laivo pasipriešinimo tyrimui, taip pat ir palyginamųjų analizių pagal atliktų skaičiavimų rezultatus. Pastebėta, kad šiuolaikiškos skaičiavimo CFD metodikos daugiakorpusio laivo tyrimui ir optimalių parametrų parinkimui, nėra pakankamai plačiai panaudojamos.

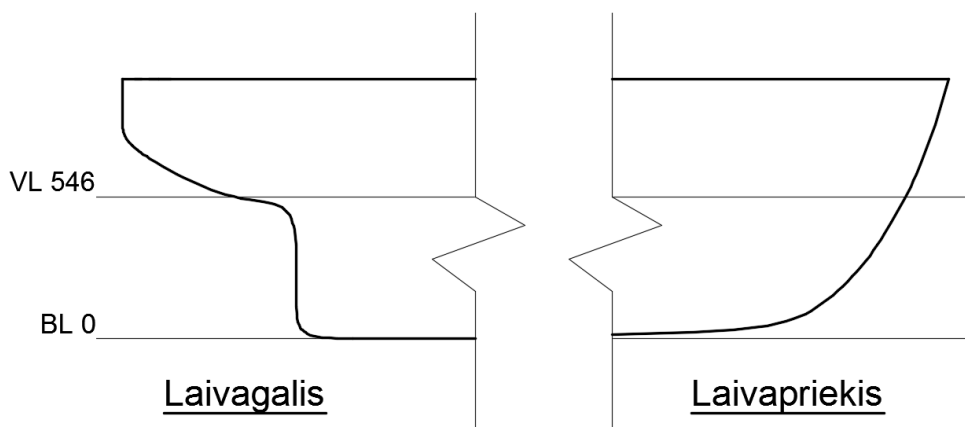
Darbo tikslas sudaryti metodika efektyviam daugiakorpusio laivo parametrų parinkimui.

Eksperimento eiga bus atliekama sekančiais etapais:

- Laivo korpusas bus modeliuojamas Delftship programines įrangos pagalba.
- Eksportuojamas į STL formatą.
- STL formato failas importuojamas į Flow-3D.
- Nustatomi Flow-3D parametrai vandens pasipriešinimo skaičiavimui.
- Gautų rezultatų apdorojimas ir analizė.

Tyrimo objektas, katamarano tipo laivas (dvikorpusis) paimtas iš metodinės knygos (Алферьев М. Я. 1976. 52 с.)¹⁶. Metodikoje pateiktas paveikslėlis ir duoti laivo korpuso parametrai, pagal kuriuos buvo pagamintas modelis ir tiriamas bandymų baseine. Pagal atliktus tyrimus buvo sudaryta metodika standartiniu apvalu katamarano tipo laivo pasipriešinimo skaičiavimui. Metodika yra gera, bet ji tiksli tik tada kai naudojamas tam tikro tipo (serijos) laivo korpusas.

Remiantis šiais duomenimis: $L/B = 11$, $B/d = 3$ ir $\delta = 0,525$ Delftship programinio paketo pagalba sukuriamas laivo korpuso skaitmeninis modelis. Hidrostatiniai duomenys ir korpuso teorinis brėžinys pateikti Priede 1. Laivo korpuso forma pasirinkta tokia kad iki kritinis greitis pagal Frūdą neviršytų 0,5. Laivo korpuso architektūrinis tipas, su tiesia pasvirusia nosimi ir kreiseriniu laivagaliu (žr. 12 pav.).



12 pav. Laivo korpuso architektūrinis tipas.

Kad atliekami CFD skaičiavimai būtų artimesni realiam laivui, korpusas padidintas 10 kartų, lyginant su modeliu tirtu baseine.

Eksperimento metu, siekiama išanalizuoti ir įvertinti daugiakorpusio laivo atstumo tarp korpusų įtaką bendram laivo pasipriešinimui, todėl turi būti užsiduodami pradiniai tiriamojo objekto parametrai pagal kuriuos po eksperimento būtų galima atlikti lyginamąją analizę. Užsiduodami parametrai yra greitis ir klirensas. Greičiai parenkami pagal korpuso tipą. Pasirenkant laivo korpuso prototipą eksperimentui, buvo aišku kad jo greitaeigiškumas iki $Fr=0,5$. Taigi greičių intervalai parenkami, kad neviršytų numatytos ribos pagal Frūdo skaičių: 0,17; 0,24; 0,31; 0,38; 0,45.

Frūdo skaičius yra santykinis dydis nuo greičio, kuris nustatomas pagal formulę:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}}, \quad (18)$$

čia Fr – Frūdo skaičius;

v – laivo greitis, m/s;

L – laivo ilgis pagal vaterliniją, m;

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

Flow-3D greitis užduodamas m/s, todėl Frūdo skaičius bus perskaičiuotas remiantis (18) formule, užduodant eksperimento sąlygas programoje.

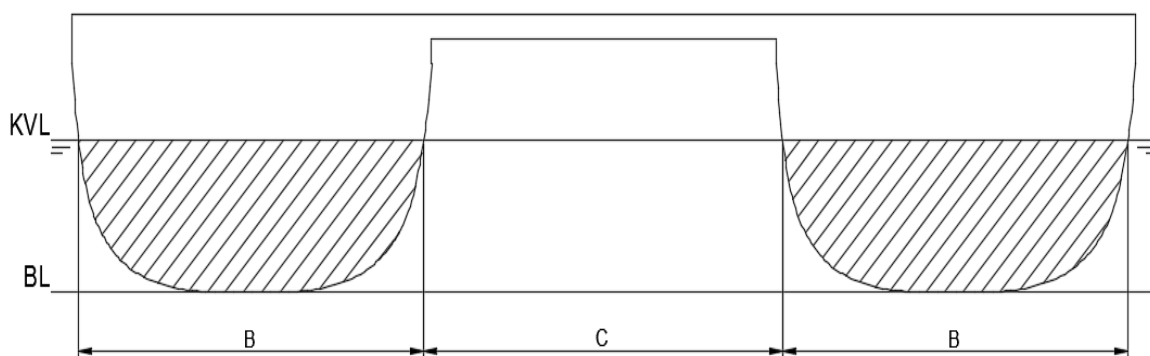
Analizuojant katamaranų korpusų įtaką pasipriešinimui, priklausomybėje nuo išdėstymo atstumo tarp jų, skersine kryptimi, vertinama bedimensinė charakteristika, – santykinis klirensas (Алферьев М. Я. 1976. 52 с.)¹⁶:

$$\bar{C} = \frac{C}{2B}, \quad (19)$$

čia $\bar{C}$ – santykinis klirensas;

C – klirensas arba, atstumas tarp konstrukcinių vaterlinijų, m (žr. 13 pav.) midelyje;

B – vieno korpuso plotis pagal konstrukcinę vaterliniją, m (žr. 13 pav.);



13 pav. Laivo korpuso architektūrinis tipas.

Matematiniam eksperimentui atlikti pasirenkamos $\bar{C}$ reikšmės: 0,5; 0,7 ir 0,9.

Tyrimas bus atliekamas panaudojant Flow-3D programine įranga, kurio CFD skaičiavimai atliekami pagal RANS metodika. Flow-3D programa turi hidrodinaminių skysčių skaičiavimams patikimą kūnų judėjimo fizikos modulį (Angl. GMO – general moving objects), šis modulis buvo naudojamas atliekant skaičiavimus norint rasti korpusų sukuriama pasipriešinimo reikšmę. Modulyje yra galimybė įtvirtinti atitinkamus judančio kūno laisvės laipsnius paliekant tik reikalingą judėjimą atlikti eksperimentą. Šis kūnas yra veikiamas skysčio, tuo tarpu skystis yra veikiamas kūno. Šitokia sąveika leidžia eksperimento metu gauti artimą natūraliam, kūnų judėjimą skysčiuose, o taip pat skysčio judėjimą, kai jis yra veikiamas kūno.

4.2 Flow3D paruošimas eksperimentui

„Delftship“ programa pagal pasirinktą užduoties laivo korpuso španhautų planą buvo sudarinėjamas laivo modelis. Praktikoje sudarinėjant laivo korpuso paviršiaus modelius naudojamos programos galinčios dirbti su „NURBS“ (Ang. Non-Uniform Rational B-Splines - nevienarūšės racionalaus pagrindo kreivės) paviršiais. „Delftship“ programa sukuria netikrą NURBS paviršių, kuris sudarytas iš daugybės plokščių paviršių, pagal pasirinktą tikslumą. Šis trūkumas nesukelia problemų darbui su Flow-3D, kadangi Flow-3D programa neatpažysta NURBS paviršių. Eksportuojamas yra STL formatas, kurio objekto forma yra sudaryta iš plokščių trikampių paviršių. Šitoks paviršių suskaidymas į mažesnius paviršius sukuria kūno netikslumus, tačiau Flow-3D programoje užduodamas baigtinio kūno elementas yra kelis kartus didesnis, nei gaunamos paklaidos kuriant ne NURBS paviršių ar eksportuojant STL formatu, todėl į šias paklaidas darbe nebus atsižvelgta.

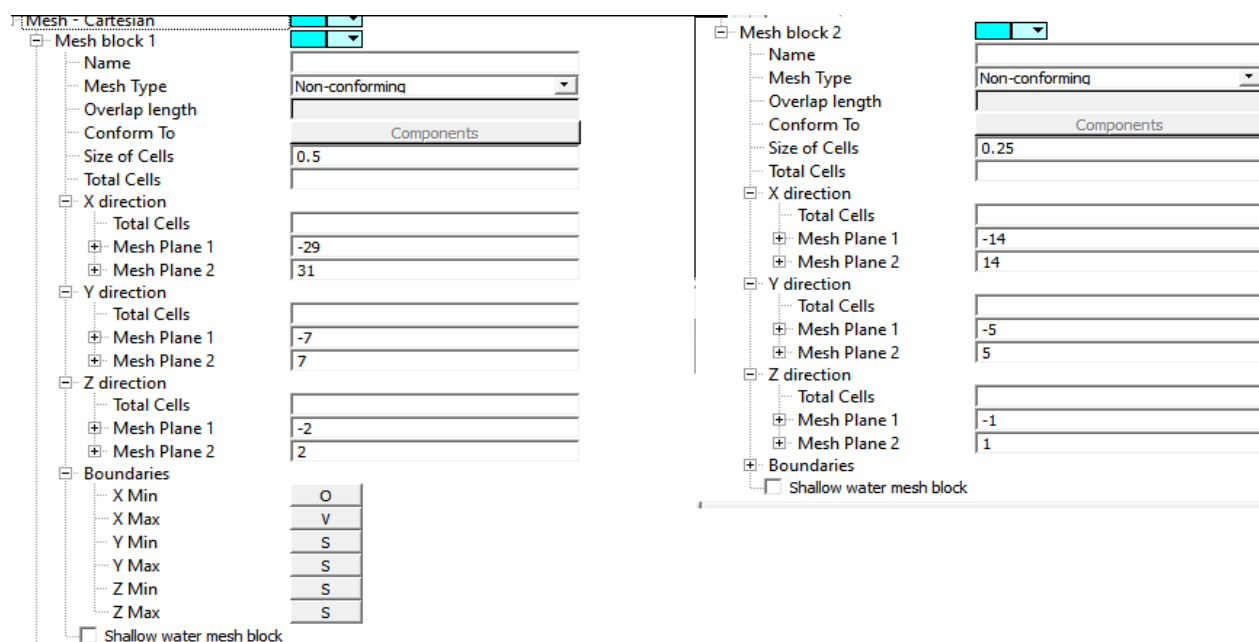
Flow-3D praramoje įkeliamas „Delftship“ programa sukurtas laivo modelis. Prieš pradėdant Flow-3D programa atlikinėti skaičiavimus būtina apsirašyti kintamuosius, bei apsirašyti fizikos veiksnius, kurie įtakos katamarano modelį eksperimento metu. Vandens pasipriešinimo laivo judėjimui skaičiavimai Flow-3D programoje atliekami atlikus tam tikrus parametrų nustatymus. Šie parametrų nustatymai atliekami eilės tvarka:

- 1) Add new simulation – Sukuriama direktorija su visais reikalingais failais naujai simuliacijai.
- 2) Model setup / Gravity – Nustatomas laisvasis kritimo pagreitis z ašies kryptimi. Programoje įvedamas -9,81 m/s².
- 3) Model setup / Moving and simple deforming objects – Aktyvuojamas judančia objekto skaičiavimų modelis.

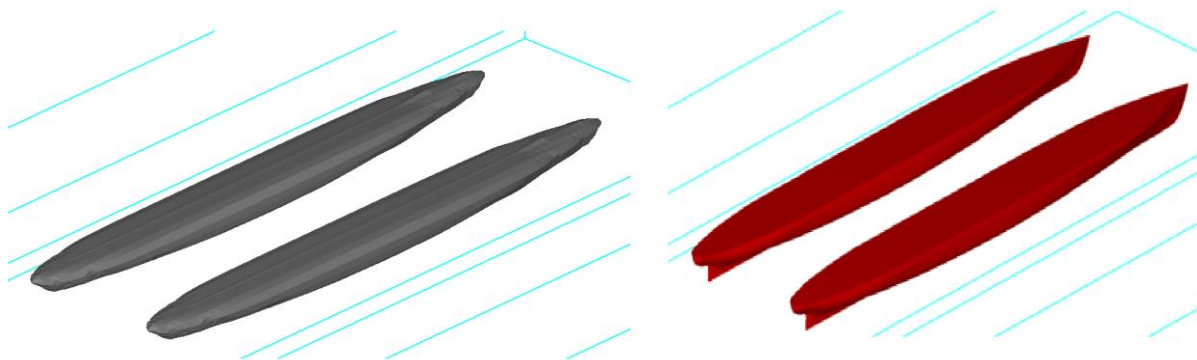
- 4) Model setup / viscosity and turbulence – Nustatomas skysčio klampumo skaičiavimų modelis.
- 5) Materials / Fluid database – Iš skysčių duomenų bazės pasirenkamas skystis vanduo, kurio parametrai yra imami prie 20 laipsnių temperatūros.
- 6) Model setup / Output - Nustatomi reikalingi dydžiai, kurie bus apskaičiuoti ir galima jų rezultatų peržiūra atlikus skaičiavimus. Pasirenkami: Dynamic viscosity, Fluid fraction, Fluid velocities, Hydraulic data, Particle information, Pressure.
- 7) Model setup / General – Nurodomas skaičiavimų laikas 25 sekundės.
- 8) Model setup / Meshing and geometry – užduodami skaičiavimų tinklo elementaraus skysčio elemento parametrai. Sukuriami du atskiri elementų tinklai, kurių vienas apima visą simuliacijos erdvę – „mesh block 1“, šio tinklo elemento dydis yra 0,5 metro. Sukuriamas papildomas elementų tinklas „mesh block 2“ kurio elemento dydis yra du kartus mažesnis, 0,25 metro, tačiau sukuriami keturis kartus daugiau elementų šioje erdvėje, tam kad gauti didesnę tikslumą norimame regione. Mažinant elemento dydį dar labiau, simuliacija labai apsikrauna, dėl geometrinės progresijos augant skaičiavimo elementų skaičiui. Reikia paminėti kad rekomenduojama laikytis geometrinės progresijos mažinant elemento dydį, nes padalinus elementus į negeometrinės progresijos elementų skaičių, t.y. mažinant elemento dydį 3, 5, 6, 7, 9... ir tt. karto, simuliacijoje įnešamas nestabilumo faktorius, kai elementui pereinant iš vieno tankio elementų tinklo į kitą, jis atsideda tarp didesnių elemento tinklų ir priešingai, kai didelis elementas yra išdalinamas į mažesnius elementus. Šie parametrai užduodami tokie kaip pavaizduoti 14 pav.

Laivo greitis yra imituojamas užduodant tolygų vandens srauto greitį nukreiptą į laivo priekį, kai laivas yra suvaržytas x ir y ašimis. Šitaip atlikus simuliaciją nėra reikalinga didelė simuliacijos erdvė, todėl galimas smulkesnis elementų tinklo mastelis, ko pasekoje gaunamas didesnis skaičiavimų tikslumas ir stabilumas atliekant simuliaciją. Greitis užduodamas prie Boundaries, pasirinkus Xmax sienelę ir ten įvedus laivo greitį. Initial / Global / Velocities taip pat įvedamas aptakančio vandens srauto greitis X ašies kryptimi.

STL failo geometrija ikelta į Flow-3D simuliacijos metu iš trikampių paviršių sugeneruoja simuliacijos kūną užpildant tūrį tarp importuotų paviršių neigiamųjų pusių, t.y. net jei ikeltos geometrijos forma yra atvira (ne uždara kūnas iš paviršių, o turintis netvarkingas atviras skylės), Flow-3D ją užpildys, sugeneruojant tūrį tarp paviršių neigiamųjų pusių. Todėl eksportuojant ir importuojant paviršius būtina patikrinti ar teisinga kryptimi sudaryti paviršiai, nes galimos tuščios ertvės kūne arba netinkamos formos sugeneravimas. STL failo įkeltą į Flow-3D programą korpuso formą pagal užsiduoda elementų skaičiavimų tinklą ir prieš atliekant simuliaciją iš anksto galima peržiūrėti paspaudus Favor / render komandą (žr. pavaizduotą 15 pav).



14 pav. Skaičiavimų tinklo parametrai



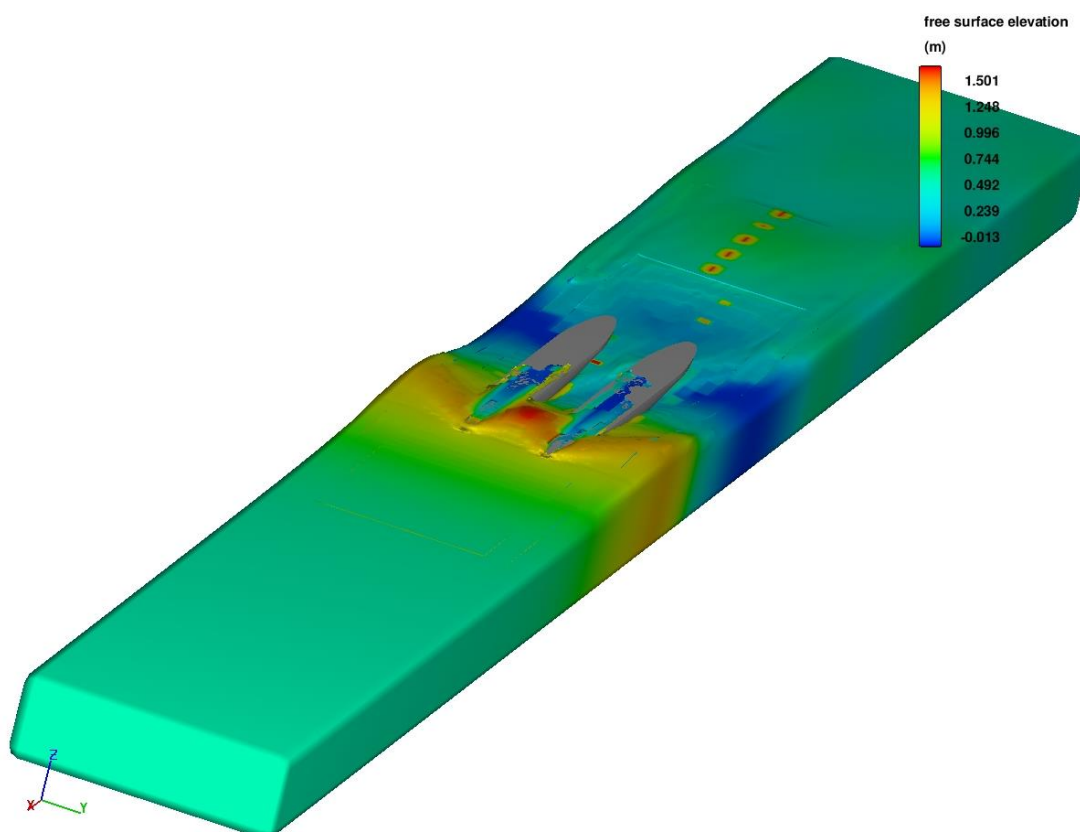
15 pav. Skaičiavimų tinklas

Initial / Global/ pressure laukelyje nurodome slėgį – *hydrostatic pressure in z direction*. *Fluid Initialization / fluid elevation* įvedame laivo grimzlę 0,546 m. Atlikus šiuos nustatymus *Component / Component 1/ component properties/ Type of moving object* pasirenkame sudėtinį objekto judėjimą – *coupled motion*. *Moving object properties / edit / Moving object setup / Motion constraints* nurodome šešių laisvės laispmių judėjimą ir suvaržome nereikalingus kūno judėjimus „x“, „y“ ašių kryptimis ir sukimasi apie „x“, „y“ ir „z“ ašis, ties judėjimo tipu pasirinkus *prescribed*. Paliekamas nesuvaržytas vertikalus judėjimas „z“ ašies kryptimi. *Mass properties* lange nurodomas tiriamoje objekto masės tankis. Masės tankis yra apskaičiuojamas surandant santykį tarp laivo masės ir viso jo tūrio. Įvedame masės tankį 239 kg/m³.

9) *Simulate / run simulation* – Atlikus šią komandą yra pradedami skaičiavimai.

4.3 Eksperimentinis tyrimas ir rezultatų apdorojimas

Pirmas bandymas atlikti tyrimą katamaranui su $\bar{C} = 0,5$ visiems penkiems numatytiems greičiams, nepavyko. Atlikus pirmine rezultatų analizę grafiniame lange, pastebėta, kad kai greitis $v = 5.98 \text{ m/s}$, laivapriekinė banga užlieja denį (pav.) . Tokiu atveju tolimesnis kitų eksperimentų rezultatų vertinimas nebus tikslus.



16 pav. CFD rezultatai, kai: $\bar{C} = 0,5$; $v = 5.98 \text{ m/s}$

Kad būtų galima tęsti numatytą eksperimentą, peržiūrimi Flow-3D nustatymai. Nustatyta, kampinio poslinkio apie „y“ ašį suvaržymas galėjo įtakoti tokius skaičiavimo rezultatus. Nuspręsta momento apie „y“ ašį nevaržyti ir patikrinti gautus skaičiavimų rezultatus prie tokių eksperimento sąlygų. Po Flow-3d, sąlygų korekcijos, skaičiavimai pradėjo vykti ilgiau, bet laivapriekinė banga, denio nebeužlieja. Todėl eksperimentas pradedamas vykdyti su atlaisvintu kampiniu poslinkiu apie „y“ ašį.

Simuliacijos rezultatai grafiškai pateikti Priede 2. Skaičiavimo rezultatai, su paskutinėmis penkiomis reikšmėmis, 25 sekundžių simuliacijos trukmės, pateikiami Priede 3. Priede 3, grafiškai galime įvertinti bangos susidarymą laivapriekyje. Matyti, kad prie Frūdo skaičiaus 0,38 (arba 4,12 m/s greičio simuliacijoje) laivapriekyje banga pasiekia piką. Tai rodo, kad laivas plaukia artimumu kritiniam arba kritiniu greičiu.

Flow -3D programoje simuliacija sugeneruoja visą kompleksą skaičiavimų. Kadangi tiriamas tik pasipriešinimas ir jo priklausomybės, dominantys skaičiavimų rezultatai yra pasirenkami, kurie parodo slėgio ir trinties sukkelto pasipriešinimo rezultatus, laivo judėjimo kryptimi.

Flow-3D skaičiavimo rezultatai pateikiami priklausomybėje nuo laiko. Simuliacijos trukmė buvo užduota 25 sekundės. Laiko intervalus, rezultatų apdorojimui tikslinga pasirinkti prie nusistovėjusio režimo. Nusistovėjęs režimas laikomas simuliacijos pabaigoje, todėl pasirenkami paskutiniai penki laiko intervalai, ir surandamas aritmetinis vidurkis.

Žemiau pateikiamos lentelės su apskaičiuotų vidurkių rezultatais:

1 lentelė. CFD skaičiavimo rezultatai katamaranui

$\bar{C}$	Fr	Greitis, m/s	Rw+Rvp, N	Rtr, N	R, N
0,5	0,17	2,26	301,3	465,0	766,3
	0,24	3,19	1556,2	731,3	2287,5
	0,31	4,12	2810,9	1080,5	3891,3
	0,38	5,05	5552,3	1274,0	6826,3
	0,45	5,98	2182,0	1674,0	3856,1
0,7	0,17	2,26	407,3	525,2	932,5
	0,24	3,19	1803,5	776,3	2579,8
	0,31	4,12	2385,7	1165,2	3551,0
	0,38	5,05	5770,6	1332,6	7103,1
	0,45	5,98	2545,0	1691,1	4236,1
0,9	0,17	2,26	227,9	489,9	717,8
	0,24	3,19	1578,7	733,3	2311,9
	0,31	4,12	2765,3	1081,7	3847,0
	0,38	5,05	5515,7	1329,8	6845,5
	0,45	5,98	1760,1	1627,3	3387,4

2 lentelė. CFD skaičiavimo rezultatai, vieno korpuso

Fr	Greitis, m/s	2x(Rw+Rvp), N	2x (Rtr), N	2x (R), N
0,17	2,26	72,3	363,9	436,2
0,24	3,19	1020,2	574,9	1595,1
0,31	4,12	891,0	808,0	1699,0
0,38	5,05	1007,9	1130,2	2138,1
0,45	5,98	1149,7	1566,8	2716,6

V. EKSPERIMENTO REZULTATŲ ANALIZĖ

Rezultatų palyginamoji analizė pateikiama 3 lentelėje. Rezultatai palyginami santykiu ir skirtumu: skirtumas gaunamas iš 1 lentelės viso pasipriešinimo (R) atėmus 2 lentelės viso pasipriešinimo gautus rezultatus, santykis pateikiamas padalinus gautas skaitines reikšmes.

Įvertiname interferencijos faktorių nuo klirenso:

$$I_{Kat.} = \frac{R_{Kat.}}{2R_{Vien.Korp.}}, \quad (20)$$

$$I_{Kat.} = \frac{R_{Kat.}}{2R_{Vien.Korp.}}$$

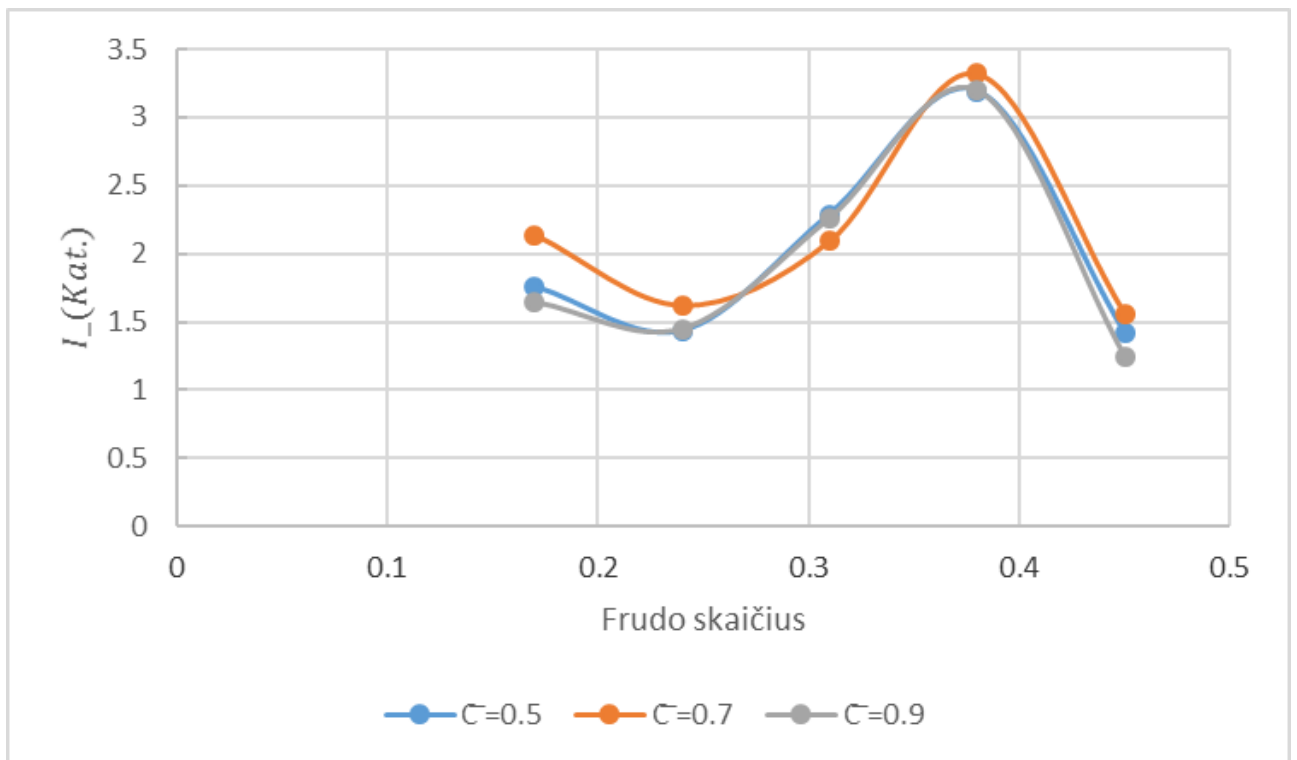
Interferencijos faktorius katamarano pasipriešinimui paskaičiuotos reikšmės pateikiamos 3 lentelėje. Jis parodo, kiek pasikeičia pasipriešinimas lyginant su pasipriešinimu vertinant du izoliuotus korpusus. Grafiškai atvaizduota 17 pav.

3 lentelė. Interferencijos faktorius katamarano pasipriešinimui

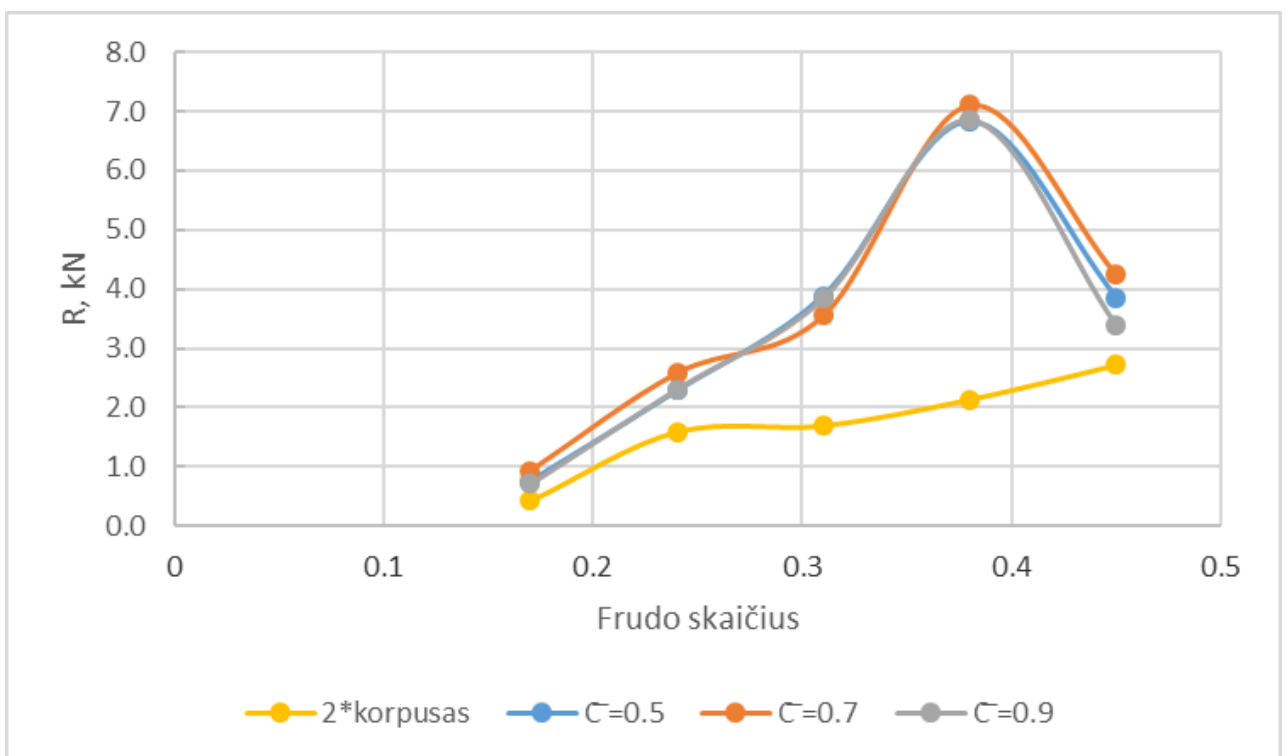
$\bar{C}$	Fr	Greitis, m/s	$(R_{Kat.} - 2R_{Vien.Korp.}), N$	$I_{Kat.}$
0,5	0,17	2,26	330,1	1,76
	0,24	3,19	692,4	1,43
	0,31	4,12	2192,3	2,29
	0,38	5,05	4688,2	3,19
	0,45	5,98	1139,5	1,42
0,7	0,17	2,26	496,3	2,14
	0,24	3,19	984,7	1,62
	0,31	4,12	1852,0	2,09
	0,38	5,05	4965,0	3,32
	0,45	5,98	1519,6	1,56
0,9	0,17	2,26	281,6	1,65
	0,24	3,19	716,8	1,45
	0,31	4,12	2148,0	2,26
	0,38	5,05	4707,4	3,20
	0,45	5,98	670,8	1,25

Visuose greičio intervaluose gautas skirtumas ir santykis parodo katamarano pasipriešinimą didesnį nei dvigubas vieno korpuso pasipriešinimas. Didžiausias pasipriešinimo skirtumas pastebimas esant klirensui 0,7 ir Frūdo skaičiui 0,38 yra 4965,0 N.

18 pav. nubraižytame grafike matome kiek labai pasipriešinimas išauga lyginant su dvigubu vieno korpuso pasipriešinimu. Tačiau, čia taip pat matome, kad katamarano su klirenso koeficientu $\bar{C} = 0,7$ reikšmės išsiskiria iš kitų.



17 pav. Interferancijos faktorius nuo Frūdo skaičiaus



18 pav. Pasipriešinimas nuo Frūdo skaičiaus

IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

Išvados:

- 1) Flow-3D atlikti skaičiavimai parodė, kad CFD prie mažesniu greičiu pateikia netikslius pasipriešinimo skaičiavimo rezultatus. Sunku prognozuoti, kodėl likęs pasipriešinimas ($R_w + R_{vp}$) esant Frūdo skaičiui mažesniam nei 0,2 yra didesnis nei trinties pasipriešinimas (R_{tr}). Galima daryti prielaidą, kad RANS kodas netinka pasipriešinimo vertinimui prie mažų greičių.
- 2) Vertinant daugiakorpusio laivo pasipriešinimo įtaką nuo klirenco, CFD skaičiavimai parodo panašias priklausomybes, kaip ir bandymų baseinuose atliekamų tyrimų rezultatai.
- 3) Eksperimentas buvo atliekamas su vidutinio gritaeigiškumo korpusu, todėl vertingi rezultatai analizuojant Pasipriešinimo reikšmes iki kritinio greičio. Nustatyta, kad prie Frūdo skaičiaus 0,31 optimaliausias klirenso pasirinkimas yra 0,7

Rekomendacijos:

- 1) Kad įvertinti CFD paklaidą/klaidą skaičiuojant daugiakorpusio pasipriešinimą. Tikslinga pakartoti eksperimentą pakeistus eksperimento sąlygas arba/ir skaičiavimo kodą.
- 2) Rezultatų patikimumo įvertinimui, taip pat reikėtų testuoti eksperimentą pakeitus eksperimento sąlygas. Pakeisti tinklelio tanki ir praplesti „baseino“ parametrus (ilgį, plotį, gylį). Kad patikrinti teiginį, buvo atliktas eksperimentas, pakeitus visas minėtas sąlygas. Rezultatai pateikti Priede 3. Čia matome, kad jau programa pradeda vertinti bangų susidarymą tarp korpusų, todėl eksperimentą galima testuoti ir analizuoti gaunamas reikšmes su šiame darbe gautomis.

LITERATŪRA

1. Aubault A. ir Yeung R.W. 2009. Multi-hull Interference Wave-Resistance in Finite-Depth Waters. International Workshop on Water Waves & Floating Bodies [Interaktyvus] Nr.24 [Žiūrėta 2016m. kovo 10d.] Prieiga per internetą: www.iwwwfb.org/Abstracts/iwwwfb24/iwwwfb24_06.pdf.
2. Bertram V. 2000. Practical Ship Hydrodynamics. Oxford. Butterworth-Heinemann. . [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2016m. balandžio 15d.] Prieiga per internetą: <http://www.scribd.com/doc/52572436/82/CFD-for-ship-manoeuving>.
3. Čerka J. 1997. Laivo teorija. Klaipėda: Klaipėdos universiteto leidykla.
4. Čerka J. 2005. Laivo eigumas. Klaipėda: Klaipėdos universiteto leidykla
5. Čerka J. 2008. Laivų projektavimas: mokymo medžiaga. Klaipėdos universiteto virtuali mokymosi aplinka. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2016m. gegužės 2 d.] Prieiga per internetą: <http://vma.ku.lt/moodle/mod/resource/view.php?id=6102>.
6. Čerka J. 2009. Laivo hidromechanika. Klaipėda: Klaipėdos universiteto leidykla.
7. Dubrovsky V., Matveev K. 2005. New Types of Sea-Going Multi-Hull Ships with Superior Comfort Level and Safety. Joint Meeting of the Pacific Region Sections. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2016m. balandžio 12d.] Prieiga per internetą: <http://www.docfoc.com/new-types-of-sea-going-multi-hull-ships-with-superior-comfort-level-and-safety-dubrovsky-and-matveev-2005>.
8. Javanmardi M.R., Jahanbakhsh E., Seif M.S. Sayyaadi H. 2008. Polish Maritime Research. Hydrodynamic Analysis of Trimaran Vessels. [Interaktyvus] Nr.1(55) [Žiūrėta 2016m. gegužės 10d.] Prieiga per internetą: <http://www.bg.pg.gda.pl/pmr/pmr.php>.
9. Javanmardi M.R., Jahanbakhsh E., Seif M.S. Sayyaadi H. 2008. Trimaran Maneuvering Simulation Based on Three-Dimensional Viscous Free Surface Flow Solver. 6th International conference of high-performance marine vehicle. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2016m. balandžio 15d.] Prieiga per internetą: <http://www.hiper08.unina.it/cd%20hiper%2008/HTML/index.htm>.
10. Mynard Thomas, Sahoo Prasanta K, Mikkelsen Jon, MacGreek Dan. 2008. Numerical and Experimental Study of Wave Resistance for Trimaran Hull Forms. 6th International conference of high-performance marine vehicle. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2016m. kovo 15d.] Prieiga per internetą: <http://www.hiper08.unina.it/cd%20hiper%2008/HTML/index.htm>.
11. Romero J. E. G.2011. Introduction to CFD in Naval Hydrodynamic. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2016m. kovo 21d.] Prieiga per internetą: http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/1586/1/CFD_in_Hydrodynamics.pdf.

12. Stonkus V. 2006. Laivo teorija. Klaipėda: Klaipėdos universiteto leidykla. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2016m. gegužės 10d.] Prieiga per internetą: http://vddb.library.lt/fedora/get/LTeLABa-0001:B.03~2006~ISBN_9955-18-168-0/DS.001.0.01.BOOK.
13. Tarafder Md Shahjada, Suzuki Kazuo. 2007. Computation of wave-making resistance of a catamaran in deep water using a potential-based panel method. Ocean Engineering. [Interaktyvus] Nr. 34. [Žiūrėta 2011m. sausio 15d.] Prieiga per internetą: http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V4F-4N25W0P-2&_user=4813815&_coverDate=09%2F30%2F2007&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_origin=search&_sort=d&_docanchor=&_view=c&_searchStrId=1616143352&_rerunOrigin=scholar.google&_acct=C000049863&_version=1&_urlVersion=0&_userid=4813815&md5=75a9f954c1926c8701045b68d84d7bc8&searchtype=a.
14. Zaghi Stefano, Broglia Riccardo, Andrea di Mascio. 2010. Experimental and numerical investigations on fast catamarans interference effects. Journal of Hydrodynamics. [Interaktyvus] Nr. 22(5). [Žiūrėta 2016m. balandžio 28d.] Prieiga per internetą: http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B8CX5-51FPWXC35&_user=4813815&_coverDate=10%2F31%2F2010&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_origin=search&_sort=d&_docanchor=&_view=c&_searchStrId=1616137406&_rerunOrigin=google&_acct=C000049863&_version=1&_urlVersion=0&_userid=4813815&md5=6d59d6c7879a3da68208a5e233a67071&searchtype=a.
15. Zaraphonitis, G., Spanos, D., Papanikolaou. 2001. Numerical and Experimental Study on the Wave Resistance of Fast Displacement Asymmetric Catamarans. Conference Hamburg. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2016m. balandžio 20d.] Prieiga per internetą: <http://www.naval.ntua.gr/~sdl/proceedings.htm>.
16. Алферьев М. Я., Мадорский Г, С. 1976 Транспортные катамараны внутреннево плавания. Москва: Транспорт.
17. Дубровский В. А. Исследование волнового сопротивления катамарана. 1968. Судостроение, Ленинград.

Priedas 1

Design hydrostatics report

Designer

Created by

Comment

Filename	Lines plan_6-3.fbm		
Design length	18.000 (m)	Midship location	9.000 (m)
Length over all	18.607 (m)	Relative water density	1.0250
Design beam	1.740 (m)	Mean shell thickness	0.0000 (m)
Maximum beam	1.722 (m)	Appendage coefficient	1.0000
Design draft	0.546 (m)		

Volume properties		Waterplane properties	
Moulded volume	8.965 (m ³)	Length on waterline	18.009 (m)
Total displaced volume	8.965 (m ³)	Beam on waterline	1.663 (m)
Displacement	9.189 (tonnes)	Entrance angle	16.226 (Degr.)
Block coefficient	0.5247	Waterplane area	23.132 (m ²)
Prismatic coefficient	0.6438	Waterplane coefficient	0.7386
Vert. prismatic coefficient	0.7105	Waterplane center of floatation	8.545 (m)
Wetted surface area	32.882 (m ²)	Transverse moment of inertia	4.158 (m ⁴)
Longitudinal center of buoyancy	8.851 (m)	Longitudinal moment of inertia	438.73 (m ⁴)
Longitudinal center of buoyancy	-0.828 %		
Vertical center of buoyancy	0.320 (m)		

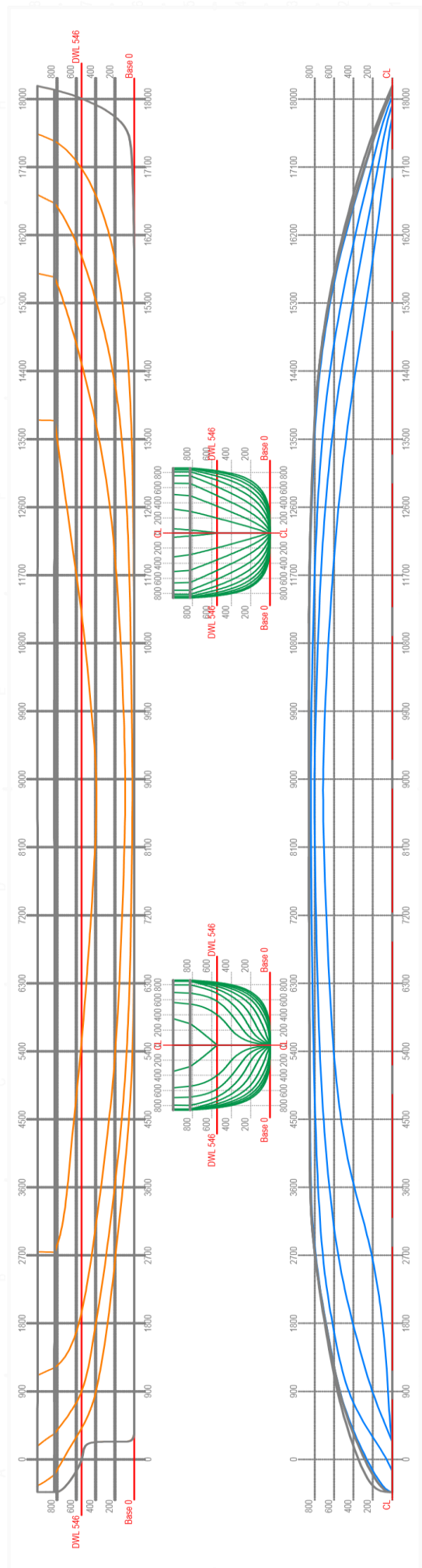
Midship properties		Initial stability	
Midship section area	0.774 (m ²)	Transverse metacentric height	0.784 (m)
Midship coefficient	0.8150	Longitudinal metacentric height	49.260 (m)

Lateral plane

Lateral area	9.536 (m ²)
Longitudinal center of effort	9.002 (m)
Vertical center of effort	0.276 (m)

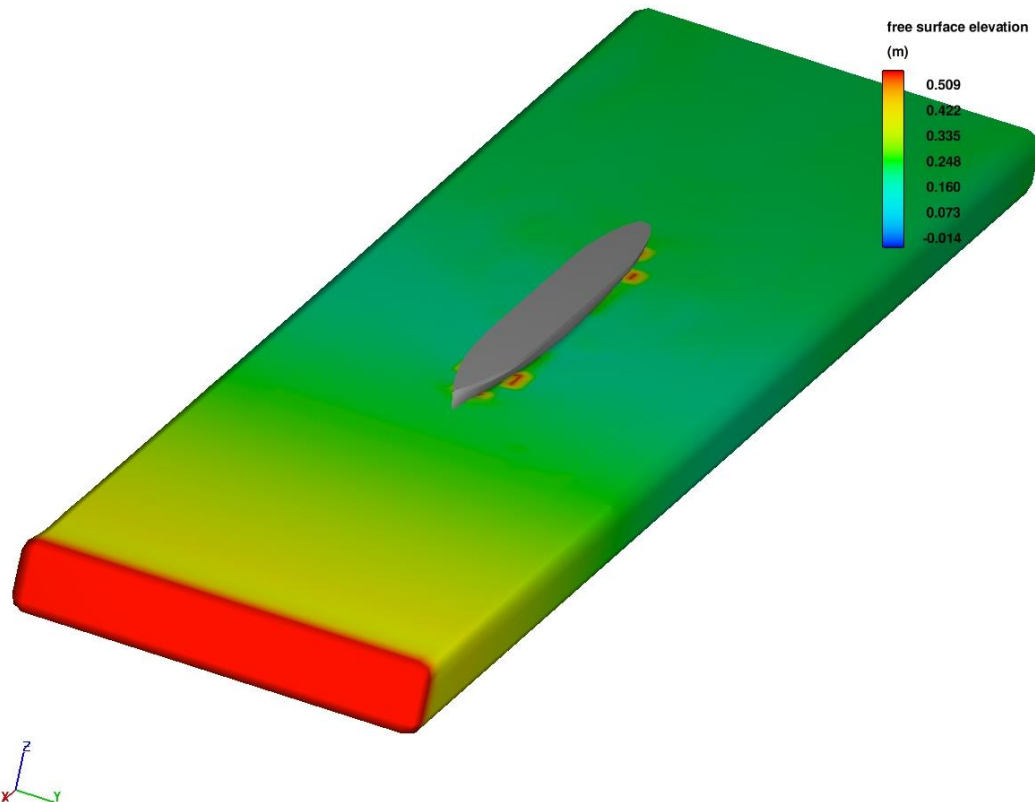
The following layer properties are calculated for both sides of the ship

Location	Area	Thickness	Weight	LCG	TCG	VCG
	(m ²)	(m)	(tonnes)	(m)	(m)	(m)

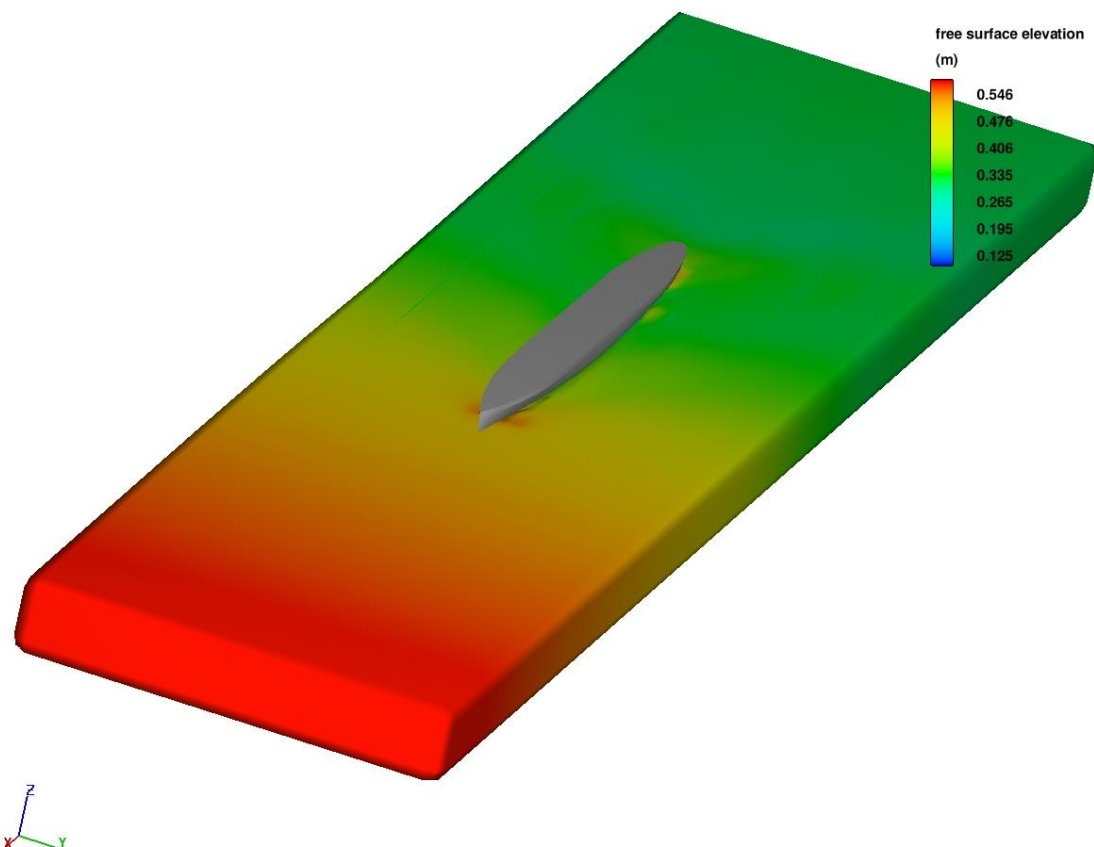


Priedas 2

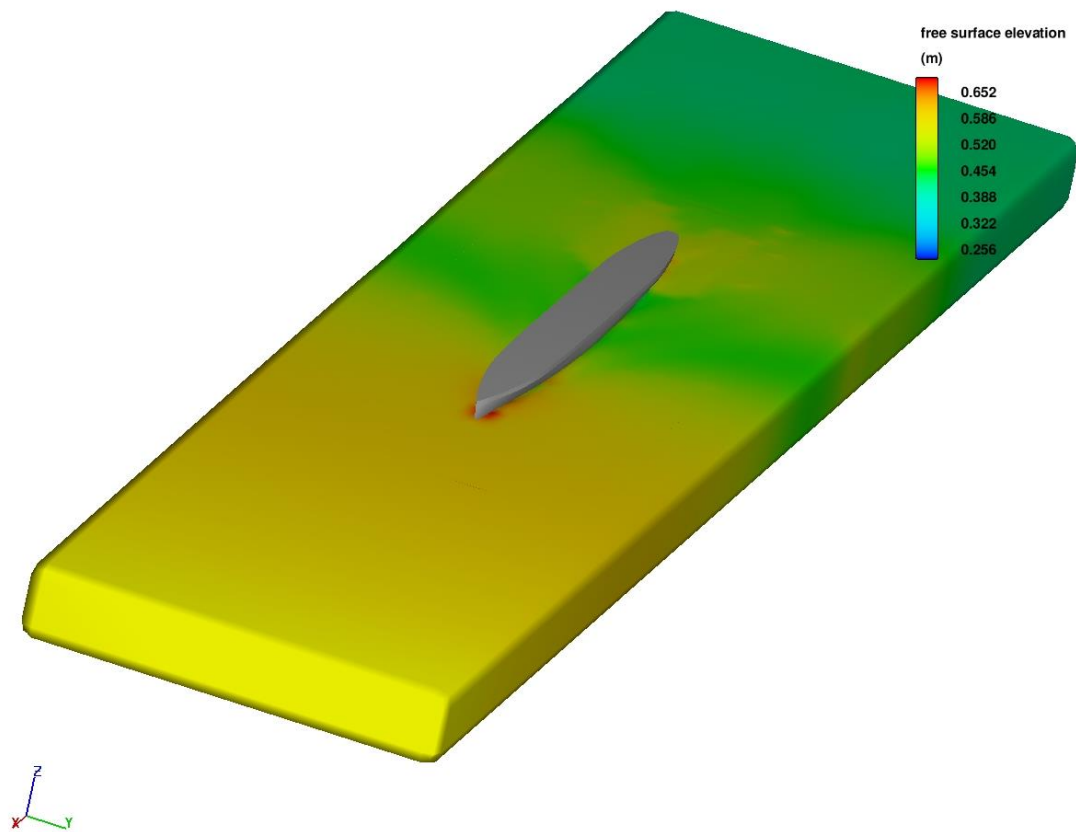
Greitis 2,26 m/s



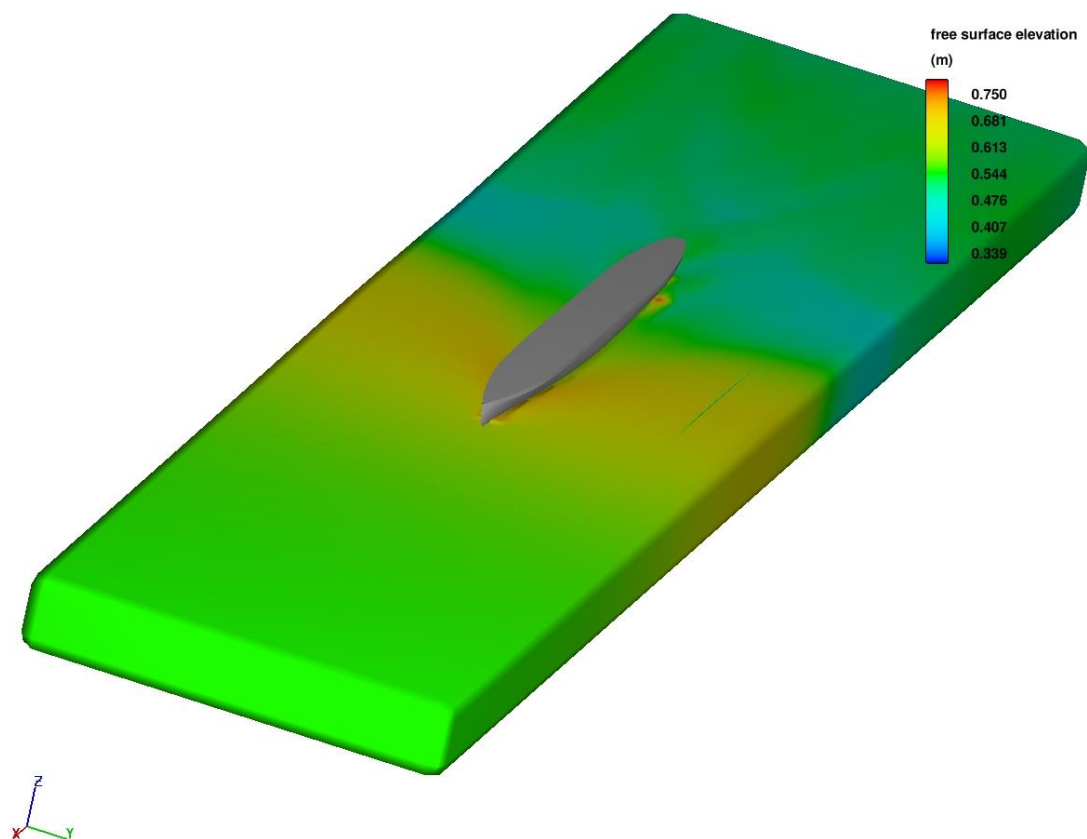
Greitis 3,19m/s



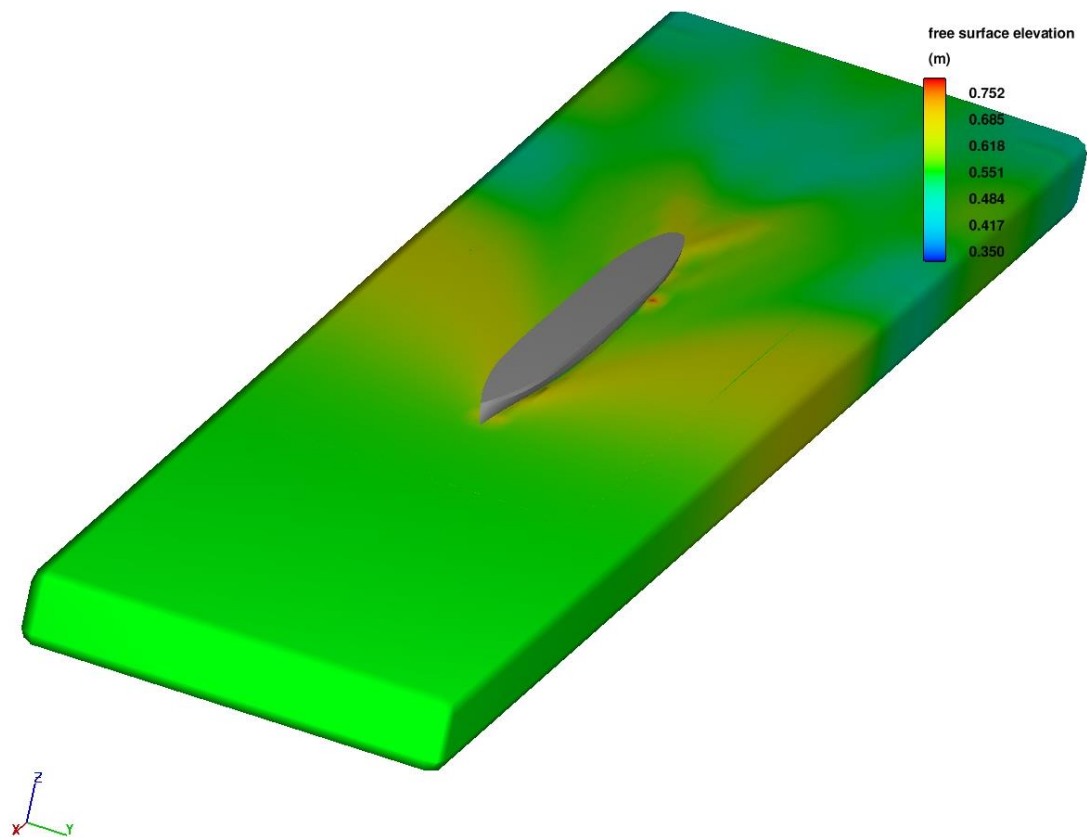
Greitis 4,12m/s



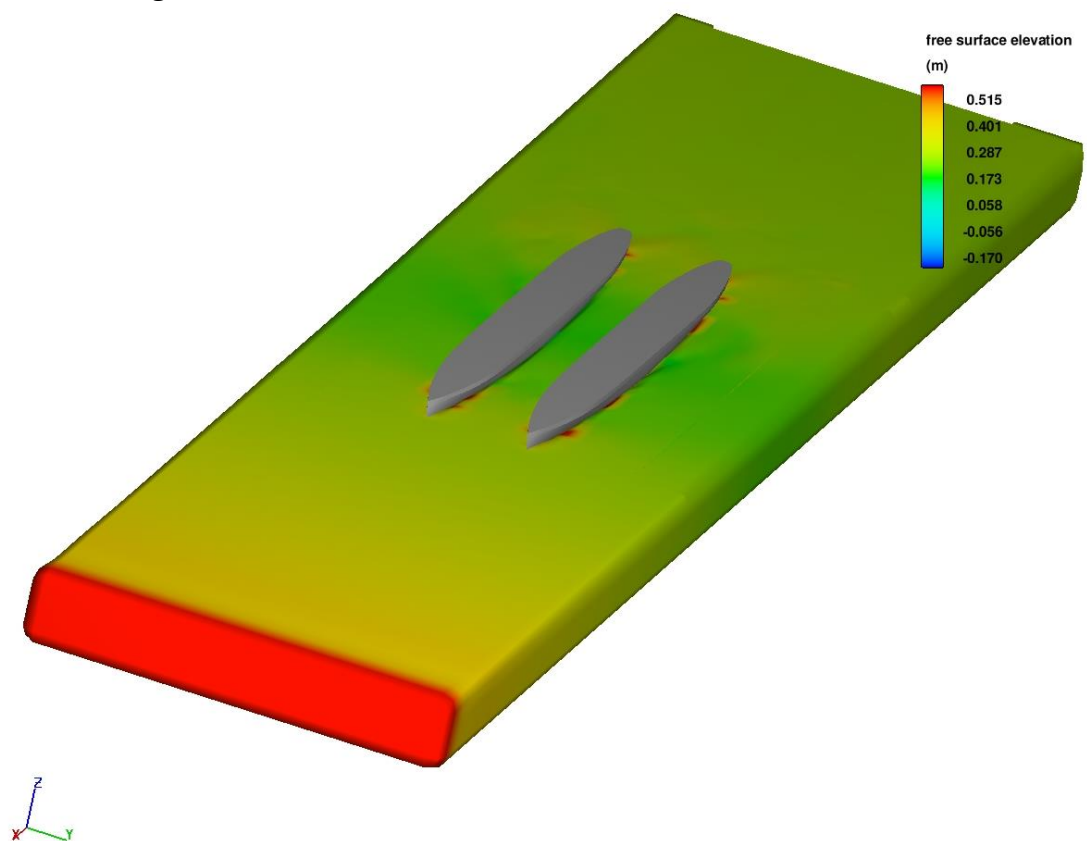
Greitis 5,05 m/s



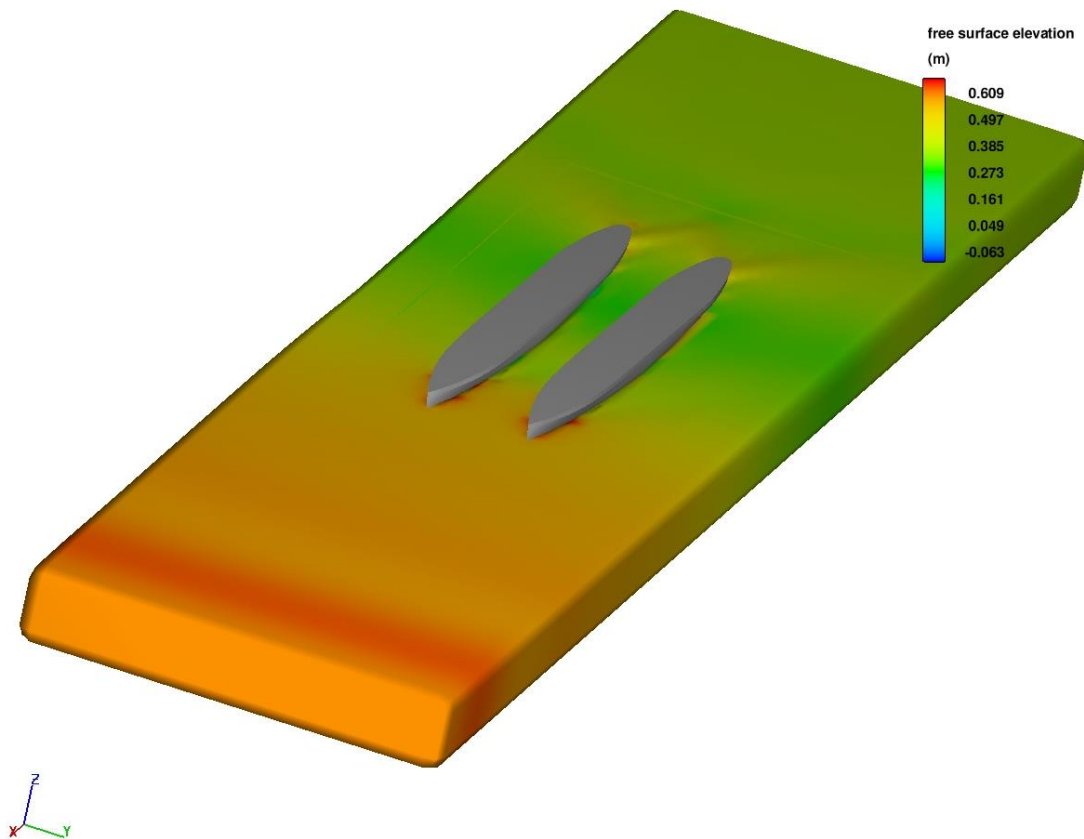
Greitis 5,98 m/s



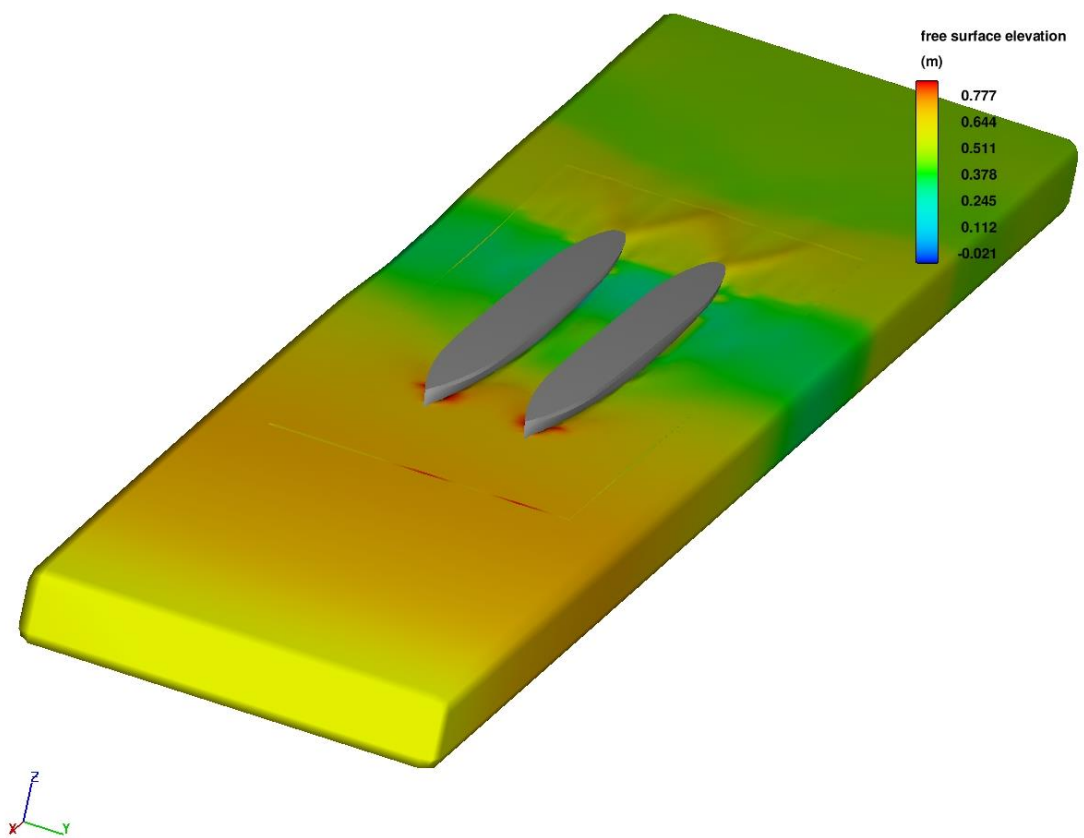
Klirensas 0,5; greitis 2,26 m/s



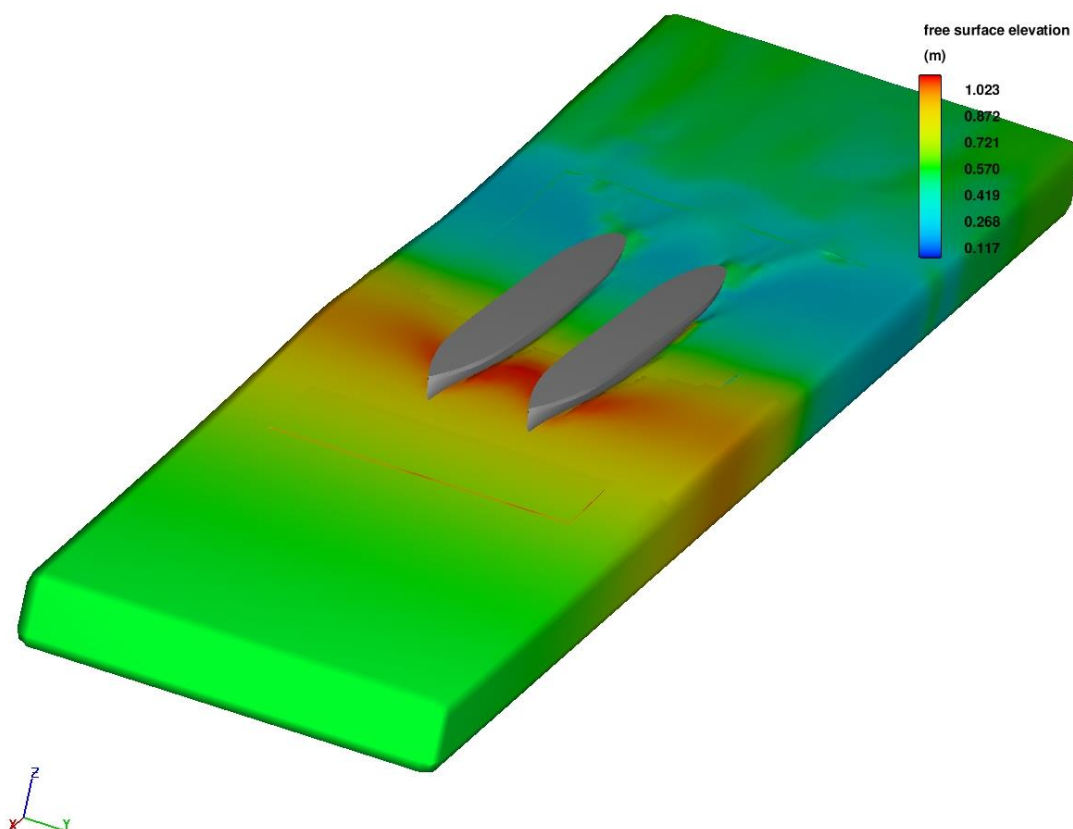
Klirensas 0,5; greitis 3,19 m/s



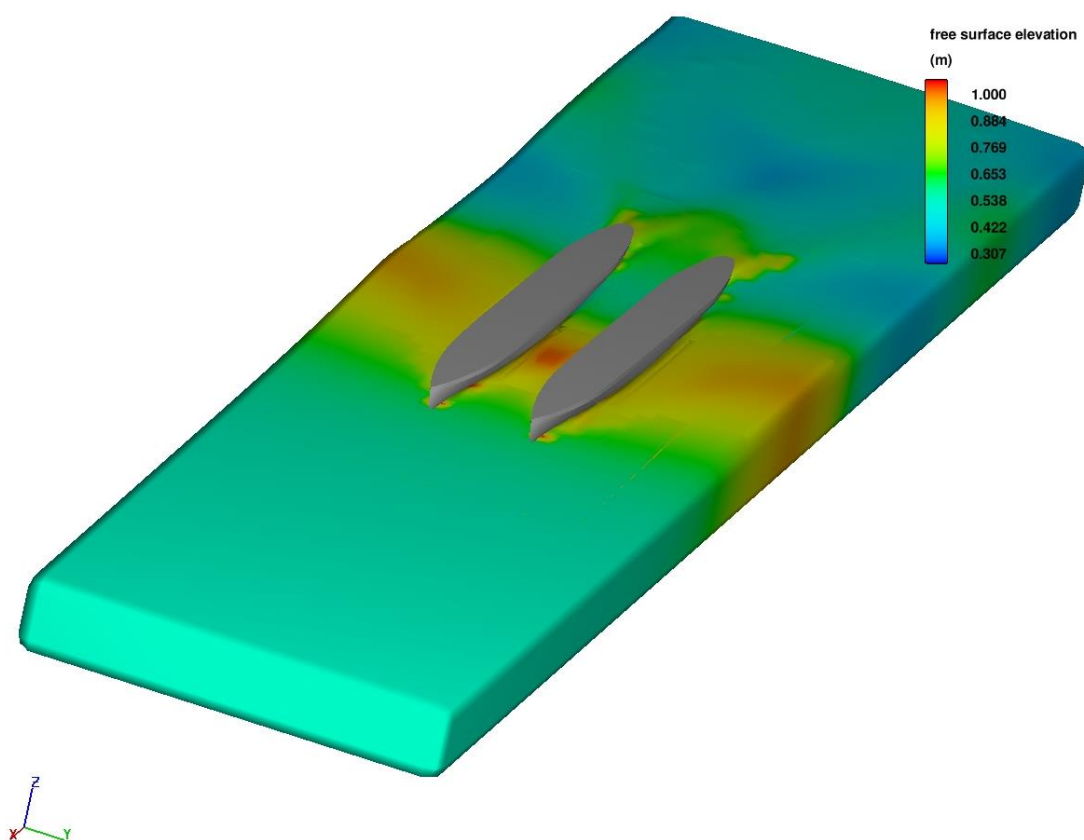
Klirensas 0,5; greitis 4,12 m/s



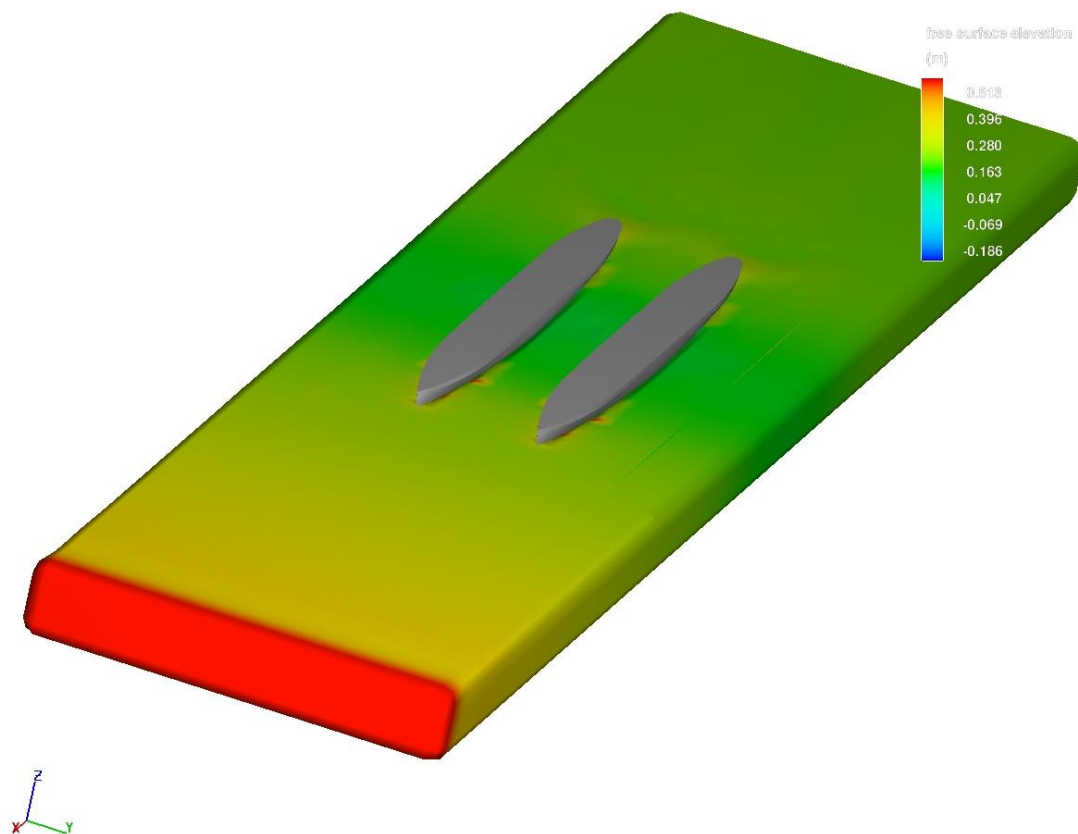
Klirensas 0,5; greitis 5,05 m/s



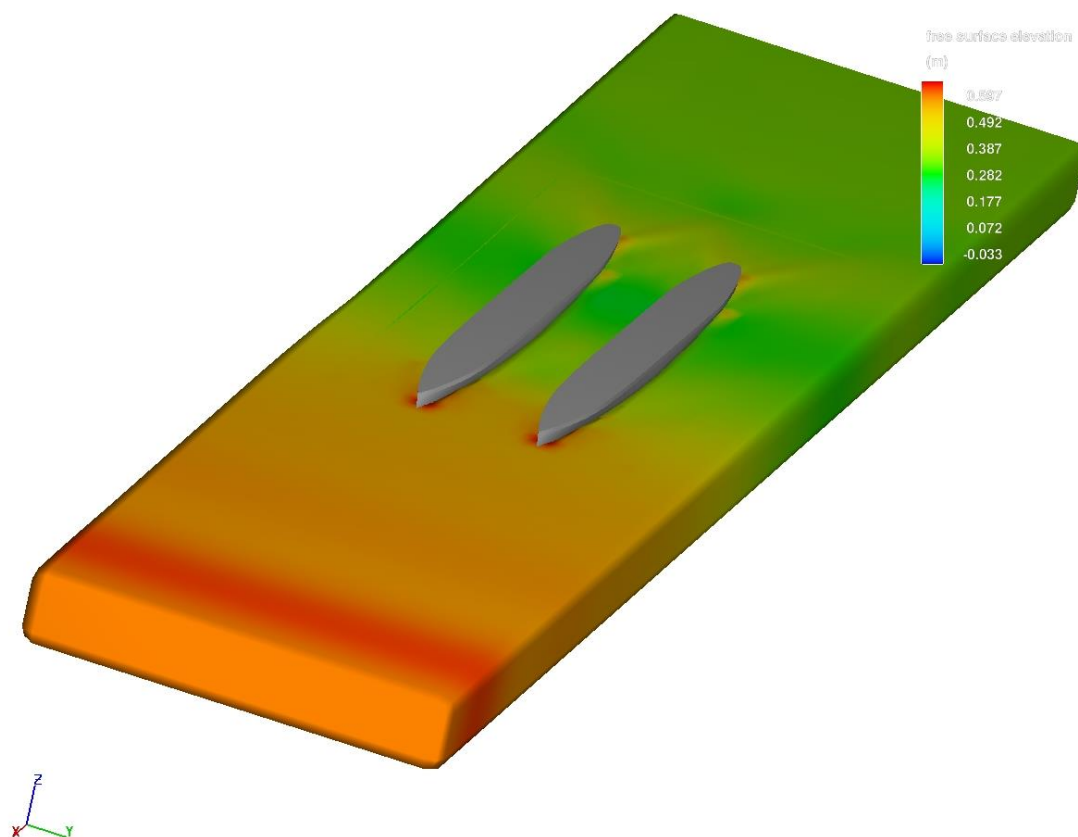
Klirensas 0,5; greitis 5,98 m/s



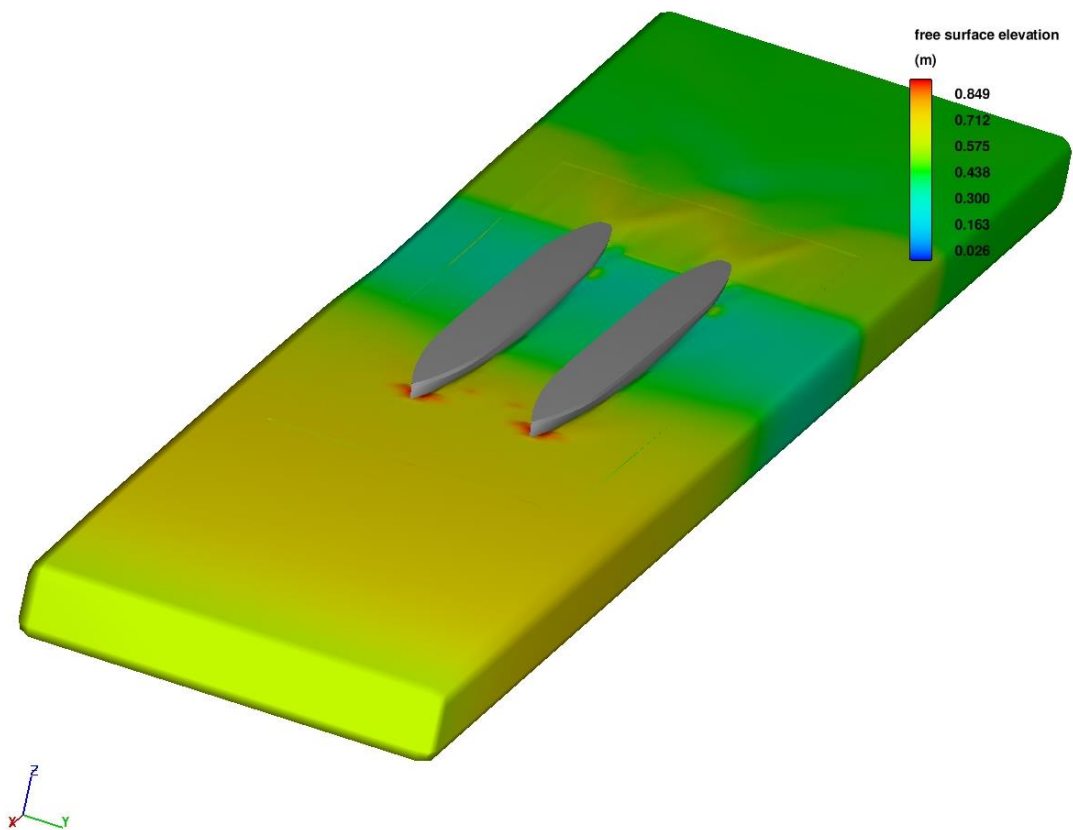
Klirensas 0,7; greitis 2,26 m/s



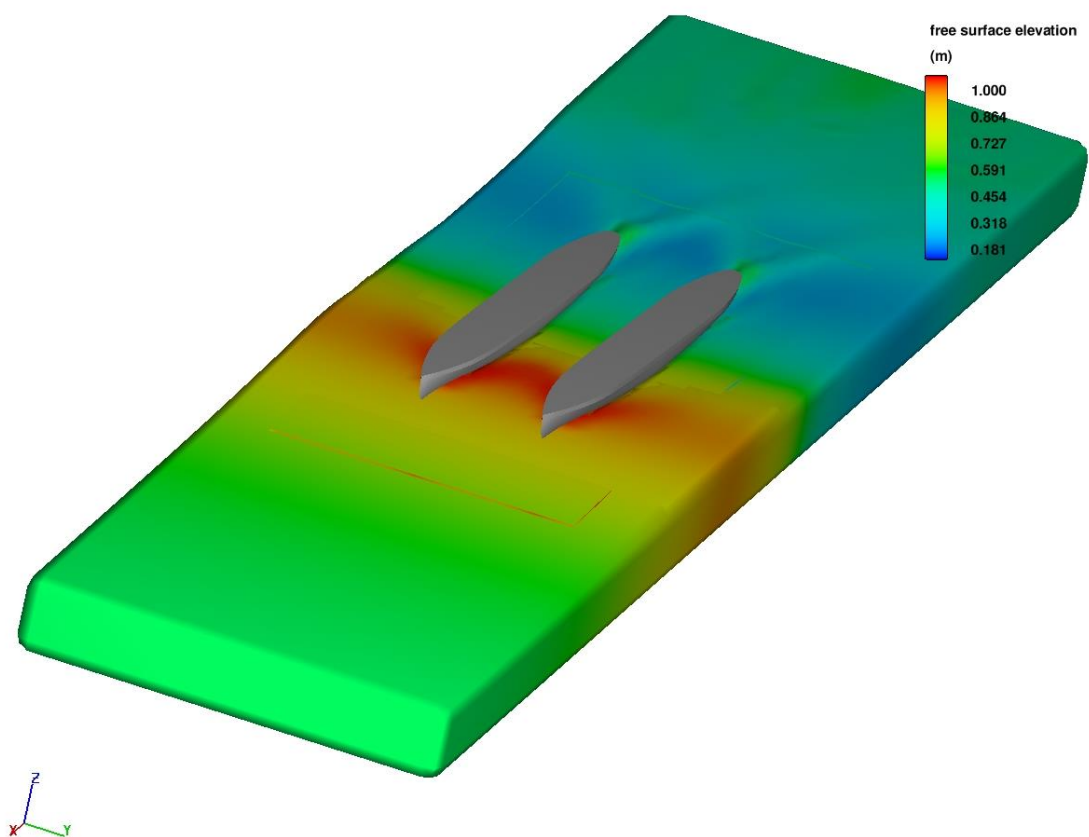
Klirensas 0,7; greitis 3,19 m/s



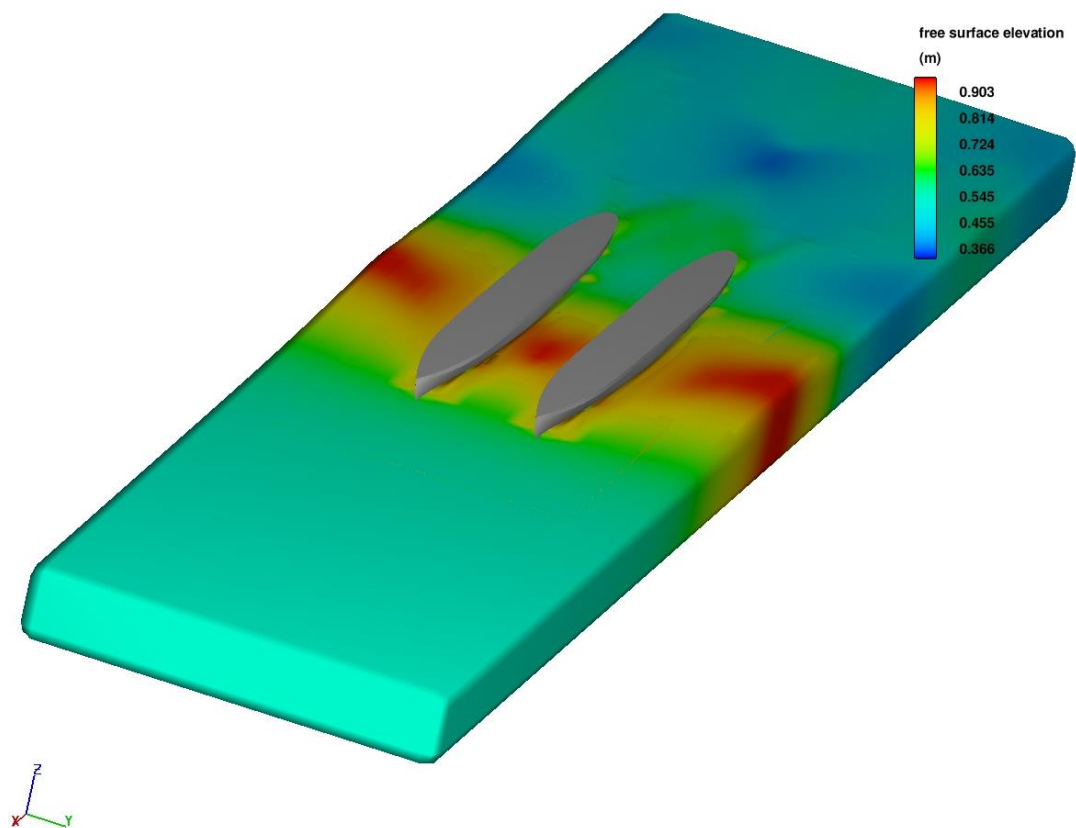
Klirensas 0,7; greitis 4,12 m/s



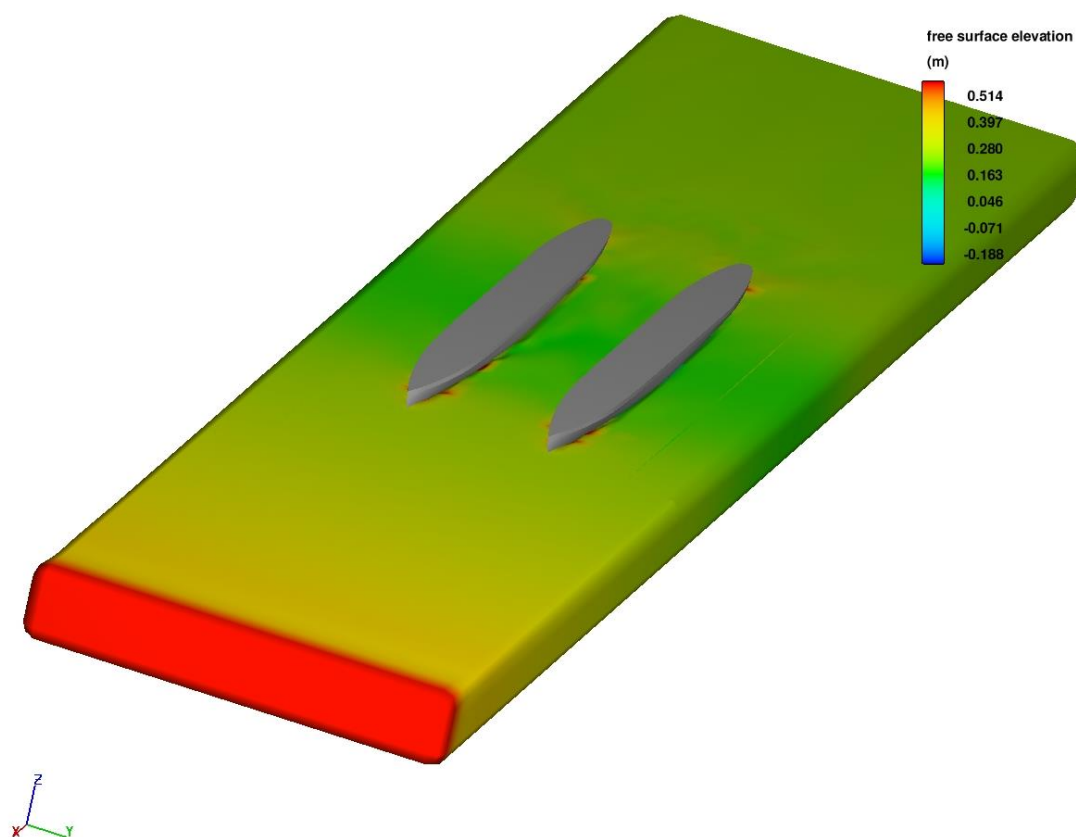
Klirensas 0,7; greitis 5,05 m/s



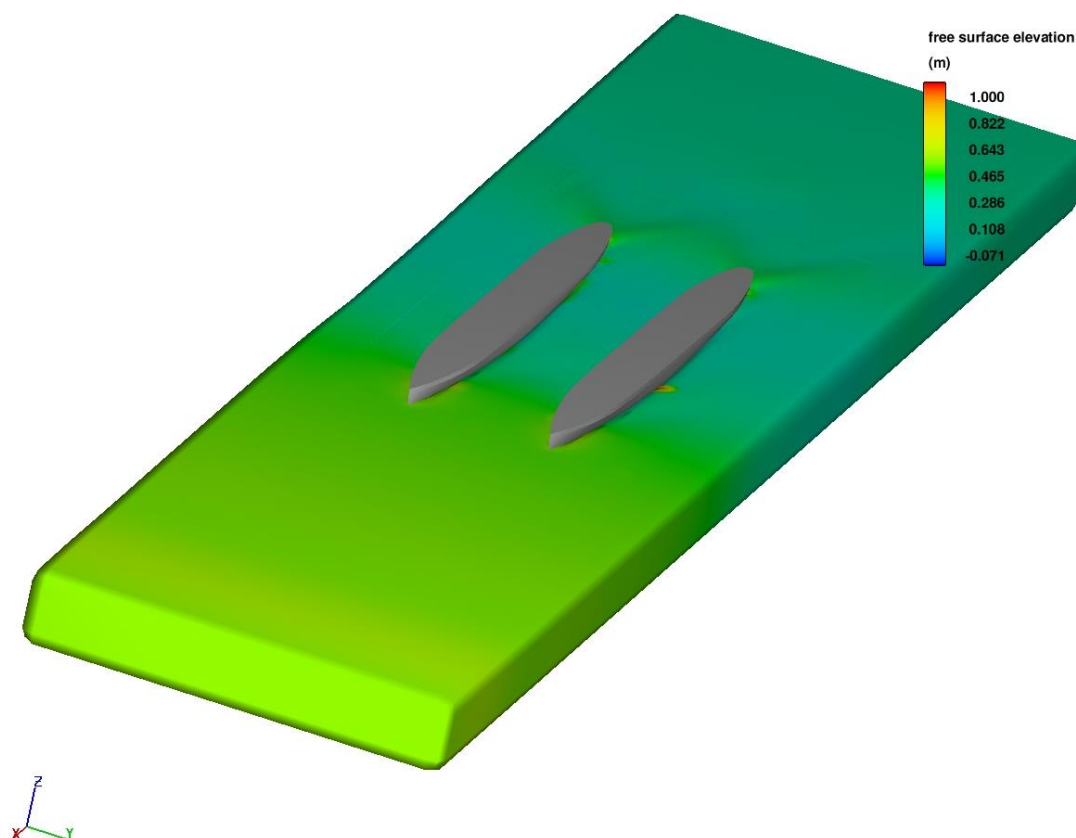
Klirensas 0,7; greitis 5,98 m/s



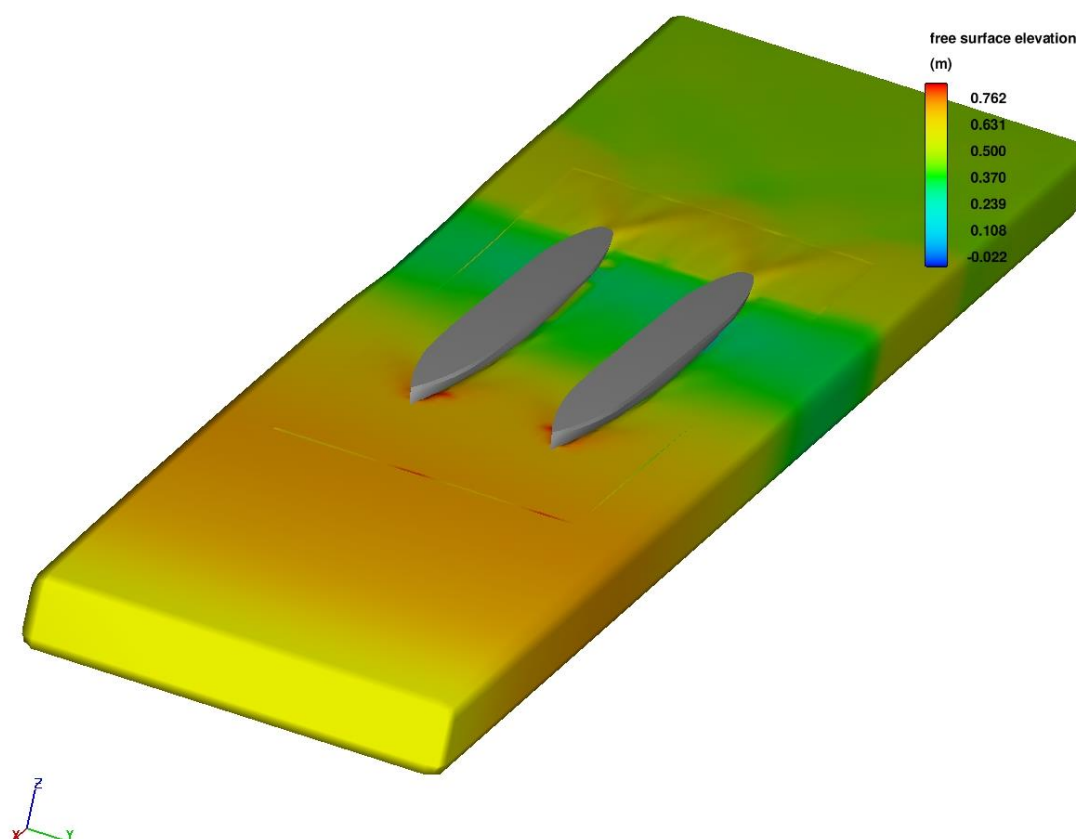
Klirensas 0,9; greitis 2,26 m/s



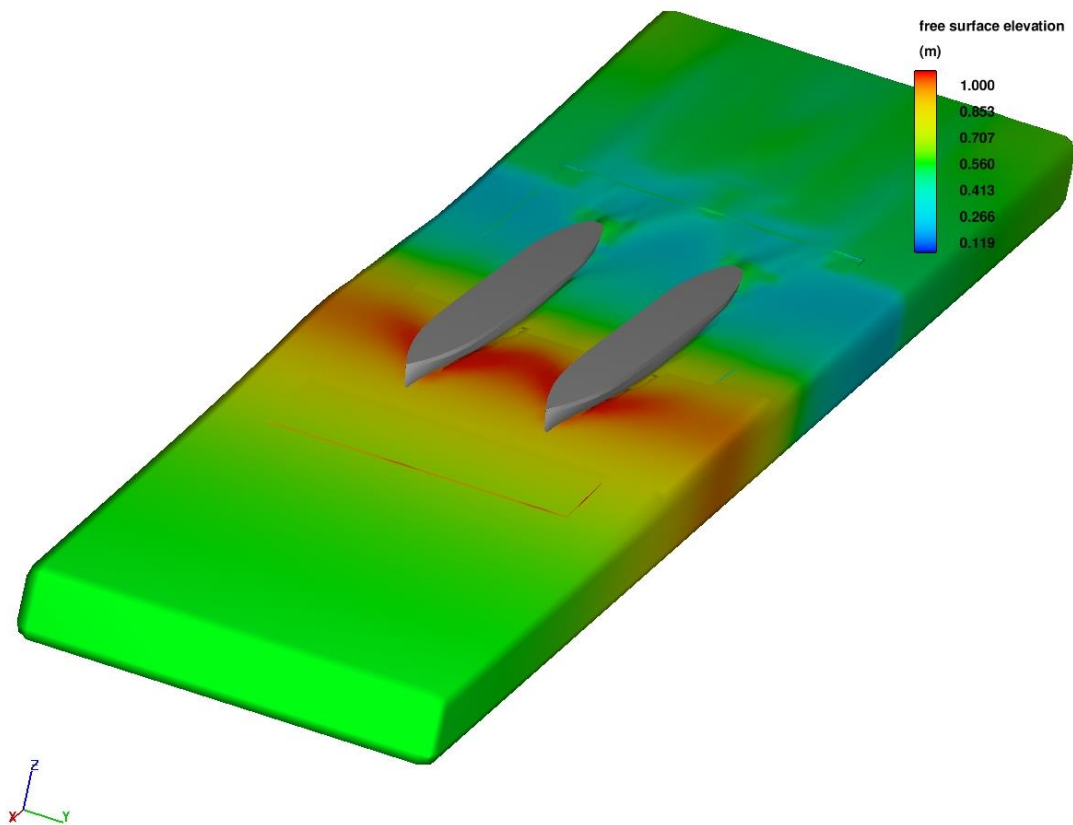
Klirensas 0,9; greitis 3,19 m/s



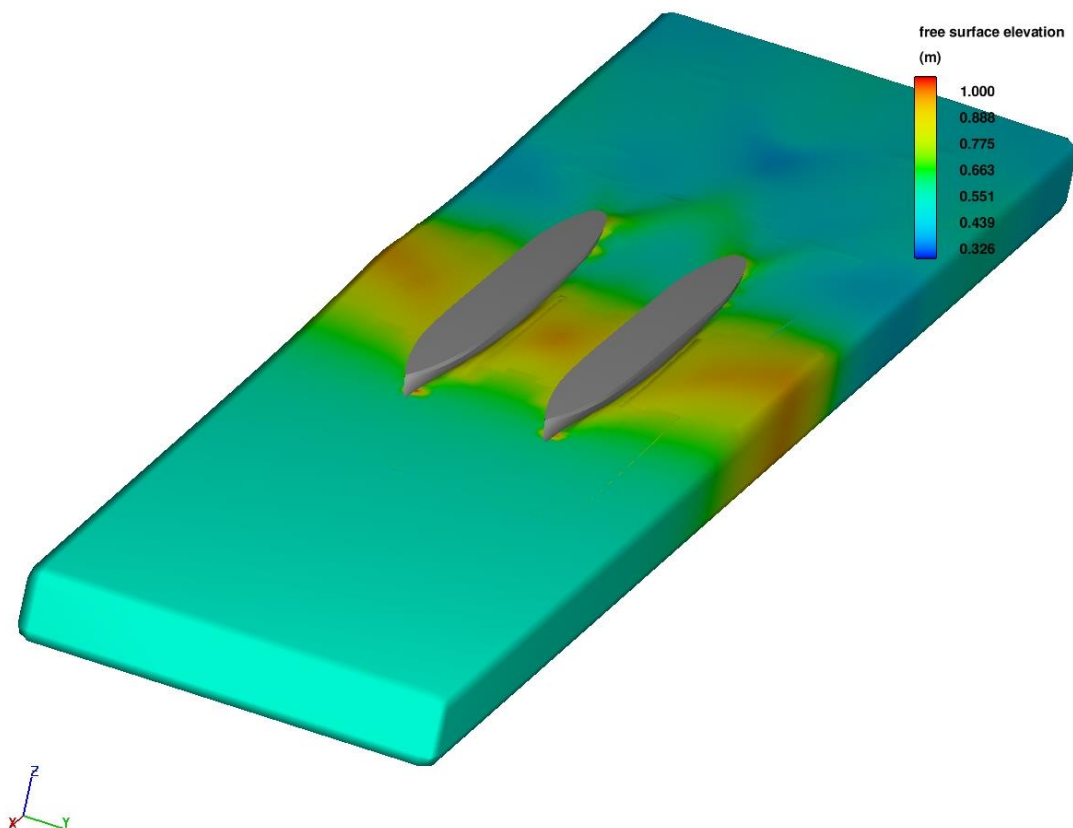
Klirensas 0,9; greitis 4,12 m/s



Klirensas 0,9; greitis 5,05 m/s



Klirensas 0,9; greitis 5,98 m/s



Priedas 3

Klirensas 0,9; greitis 5,98 m/s

