

Anotacija

Brasas T. KU mokslinio-tiriamąo laivo slemingo pasekmių tyrimai. Laivo projektavimo ir statybos magistro studijų programos baigiamasis darbas. Darbo vadovas: doc. dr. V. Djačkov, Klaipėdos universitetas: Klaipėda, 2015. – 52 p.

Magistro diplominiame darbe tyrinėjamas slemingo reiškinys. Pagrindinis darbo tikslas Klaipėdos universiteto mokslinio-tiriamąo laivo slemingo sukeliamų pasekmių tyrimai. Darbe aprašytos katamarano jūrinės savybės, slemingo reiškinys. Atlikta mokslinių tyrimų šiomis temomis analizė. Sudaryti 3D modeliai, kurie buvo naudojami Flow-3D ir ANSYS simuliacijose. Išanalizuotos Baltijos jūros vandens fizikinės savybės, pagal kurias, Flow-3D programa atlikti du matematiniai eksperimentai slemingo jėgų įvertinimui. Atliktas slemingo matematinių eksperimentų rezultatų integravimas į ANSYS programą, kurioje apskaičiuojamos apkrovos tenkančios katamarano konstrukcijoms. Sudarytos matematinių eksperimentų rezultatų apibendrinimas. Eksperimentas patvirtino, jog pažeidžiamiausia slemingui laivo konstrukcijos dalis – profiliai.

Summary

Brasas T. Research of slamming consequences of KU scientific-research catamaran. Naval engineering and marine engineering. Project supervisor doc. Dr. V. Djačkov, Klaipeda University: Klaipeda, 2015. – 52 pages.

Slamming effect is analyzed in this thesis of master degree work. This research is focusing in consequences of slamming for KU scientific-research catamaran. Thesis contains description of catamaran floating properties, the phenomenon of slamming. Review of scientific researches on those topics were made. 3D models were created and later used in Flow-3D and ANSYS simulations. Baltic Sea water physical properties were analyzed, thus used in two analogic Flow-3D mathematical experiments evaluating slamming pressures. Slamming mathematical experiment's results were integrated into ANSYS program, where pressures to catamaran constructions were calculated. Mathematical experiment's results summary were made. Experiment proved that most vulnerable part of catamaran construction are it's profiles of the bridge.

Laivų projektavimo ir statybos magistrantūros studijų programos baigiamasis darbas

Magistro tezes: **KU mokslinio-tiriamąo laivo slemingo pasekmių tyrimai**

Magistrantas: **Tomas Brasas**

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 šaltinių analizė.
10. Matematinio eksperimento planavimas ir reikalavimai.
11. Matematinis eksperimentas slemingo jėgos įvertinimui
12. Slemingo matematinių eksperimentų rezultatų integravimas ir bendro matematinio eksperimento atlikimas
13. Matematinio eksperimento rezultatų apibendrinimas.
14. Išvados
15. Literatūros sąrašas
16. Priedai

Užduotis išduota: 2014.12.20

Darbo vadovas: doc. dr. Vasilij Djačkov

Lentelių sąrašas

1 lentelė. IACS pateikiama vandens būsenų tikimybių lentelė [1].....	25
2 lentelė. Visi vandens skysčio parametrai reikalingi simuliacijai.....	27

Paveikslų sąrašas

1 pav. Klaipėdos universiteto mokslinis-tiriamasis laivas, katamaranas „Mintis“ [29].....	10
2 pav. Slemingo iliustracija	13
3 pav. Bangos periodo ir bangos aukščio tikimybinė priklausomybė (pirmasis eksperimentas)	26
4 pav. Katamarano modelis su papildomu tinkleliu ir matuojami taškai(pakeisti)	29
5 pav. Laiko žingsnio ir stabilumo grafikas	29
6 pav. Diferento kampo kitimas slemingo metu (pirmasis eksperimentas).....	30
7 pav. Laivapriekio kylio apkrovos slemingo metu (pirmasis eksperimentas)	31
8 pav. Devintas matuojamasis taškas laivo korpuse.....	32
9 pav. Bangos periodo ir bangos aukščio tikimybinė priklausomybė (antrasis eksperimentas)	33
10 pav. Slemingo apkrovos laivapriekiui esant 6 m bangavimui	34
11 pav. Slemingas esant 6 m bangavimui	35
12 pav. Diferento kampo kitimas slemingo metu (antrasis eksperimentas).....	36
13 pav. „Mesh“ objekto paviršius.....	37
14 pav. „Nurbs“ paviršius.....	38
15 pav. Katamarano laivapriekio apkalos modelio vaizdas	40
16 pav. Katamarano laivapriekio konstrukcijos modelio vaizdas	40
17 pav. Katamarano tilto išorinės konstrukcijos vaizdas	41
18 pav. Katamarano tilto konstrukcijos vaizdas.....	41
19 pav. Elementų tarpusavio ryšys	42
20 pav. Baigtinio elemento dydis struktūroje.....	43
21 pav. Struktūros įtvirtinimas simuliacijoje.....	43
22 pav. Struktūros apkrova simuliacijoje	44
23 pav. Apkalos apkrovos rezultatai (pirmasis eksperimentas)	45
24 pav. Struktūros apkrovos rezultatai (pirmasis eksperimentas).....	46

25 pav. Apkalos apkrovos rezultatai (antrasis eksperimentas).....	47
26 pav. 6 metrų bangavimo sukuriamos apkrovos tilto struktūrai	47

Turinys

IVADAS	8
I. LITERATŪROS ANALIZĖ	10
1.1. Katamarano savybės	10
1.2. Slemingas.....	12
1.3. Tyrimų apžvalga	15
II. DARBO METODIKA	19
III. MATEMATINIO EKSPERIMENTO PLANAVIMAS IR REIKALAVIMAI	21
IV. MATEMATINIS EKSPERIMENTAS SLEMINGO JĖGOS ĮVERTINIMUI	24
4.1. Pirmasis eksperimentas	24
4.1.1. Bangos parametrų nustatymas	24
4.1.2. Flow-3D parametrų nustatymas.....	26
4.1.3. Flow-3D pirmojo eksperimento atlikimas.....	28
4.2. Antrasis eksperimentas	32
4.2.1. Bangos parametrų ir Flow-3D parametrų nustatymas.....	33
4.2.2. Flow-3D antrojo eksperimento atlikimas	34
V. SLEMINGO MATEMATINIŲ EKSPERIMENTŲ REZULTATŲ INTEGRAVIMAS IR BENDRO MATEMATINIO EKSPERIMENTO ATLIKIMAS	37
5.1. Paviršių sudarymas ir failo konvertavimas	37
5.2. Katamarano struktūros modeliai abiem eksperimentams	39
VI. MATEMATINIO EKSPERIMENTO REZULTATŲ APIBENDRINIMAS	45
VI. IŠVADOS IR PASIŪLYMAI	49
VII. LITERATŪROS ŠALTINIAI	50

IVADAS

Slemingas pirmą kartą kaip reiškiny s pradėtas nagrinėti 1929 m. Karman'o, ir iki šiol nėra iki galo išanalizuotas. Lietuviškoje literatūroje slemingo reiškiny s beveik neminimas, tik slemingo sąvoka apibendrintai apibrėžta kaip laivo priekinės dalies hidrodinaminiai smūgiai į bangas [35]. Slemingas atsiranda kai laivapriekis bangos yra iškeliamas aukštyn, atsiranda diferento kampas, o kai banga pereina laivo metacentrą, diferento kampas pradeda mažėti ir laivapriekis trenkiasi į vandenį dugnu. Slemingo skaičiavimams skirtingos klasifikacinės bendrovės pateikia skirtingas skaičiavimo metodikas, taip pat jos vis dar yra papildomos pataisymais ir naujomis skaičiavimo metodikomis [1]. Slemingo reiškiny s glaudžiai siejasi su laivo plaukimo greičiu bei bangų aukščiu, todėl jis tampa dažniausia priežastimi, dėl kurios laivo greitis yra mažinamas atvira me vandenyje. Dažniausia slemingo sukeliama avarių priežastis – tai laivapriekio pažeidimai. Viena iš didžiausių slemingo sukeltų Baltijos jūros nelaimių įvyko 1994 m., kai dėl slemingo sukeliama apkravų „Estonia“ kruizinio laivo priekis buvo apgadintas bangų mūšos. Greitai vanduo pradėjo tekėti į laivo patalpas, laivas nuskendo per mažiau nei valandą laiko, žuvo 852 žmonės. Bangos tuo metu siekė 4-6 metrus [33].

Tobulėjant laivų statybos technologijoms šiuo metu yra galimybė statyti sudėtingesnės formos laivus. Katamaranai – itin sparčiai populiarėjantis laivo tipas, ypač paplitęs kruizinių laivų ir jachtų tarpe. Yachtinių laivų parodoje „BVI Boat Show“ 2000 m. 59% visų laivų buvo daugiakorpūsiai laivai. 2013 m. daugiakorpūsiai laivai sudarė 89% visų parodoje dalyvavusių laivų [15]. Reikia paminėti, jog pateikiami duomenys yra parodoje dalyvaujančių laivų, tuo tarpu daugiakorpūsiai laivų statyba sudaro mažesnę procentą. Tačiau matoma didėjanti katamaranų susidomėjimo tendencija ir statyba.

Temos naujumas ir aktualumas: Šiuo metu aktualu išanalizuoti neseniai pastatytą Klaipėdos universiteto mokslinį-tiriamąjį laivą. Svarbu iširti, ar esama konstrukcija pakankamai tvirta vykstant slemingui. Radus kritines vietas įvertinti katamarano konstrukciją ir rasti problemos sprendimo būdus.

Darbo objektas: Klaipėdos universiteto mokslinis-tiriamasis laivas.

Darbo tikslas: Iširti slemingo sukeliama pasekmes KU moksliniam-tiriamam laivui.

Uždaviniai:

1. Sumodeliuoti katamarano korpuso modelius, tinkamus CFD ir FEM analizėms;
2. Išanalizuoti slemingo nustatymo ir apskaičiavimo metodikas;
3. Išanalizuoti Baltijos jūros vandens savybes, nustatyti aukščiausių bangų vidutinius parametrus;
4. Nustatyti slemingo sukeliamas apkrovas atliekant katamarano slemingo simuliacijas pagal darbe nustatytus parametrus;
5. Atlikti Laivo korpuso struktūros stiprumo skaičiavimus naudojant simuliacijų rezultatus;
6. Įvertinti laivo korpuso struktūrą remiantis simuliacijų rezultatais.

I. LITERATŪROS ANALIZĖ

1.1. Katamarano savybės

Katamaranas - tai dviejų korpusų šonuose laivas. Katamarano pavadinimas kilęs iš tamilų kalbos žodžio kattumaram: tamil. kattu „jungti“ + tamil. maram „medis“. Šis laivo tipas išrastas Paravų tautos, gyvenančios pietiniame Indijos regione. Katamaranai turi platesnį denio plotą, kurį galima išnaudoti patalpų įrengimui, didesniai antstatui ir įrangai laive. Taip pat dėl savo išskirtinės formos katamaranai pasižymi kur kas geresniais stabilumo rodikliais negu vienkorpūsiai. Dėl šių priežasčių didžioji dalis kruizinių laivų yra katamaranai. Beveik kas antras greitaegis laivas pasaulyje yra katamaranas. Europoje pirmieji katamaranai atsirado XVII a. pabaigoje. Katamaranai būna tiek buriniai, tiek motoriniai [40].



1 pav. Klaipėdos universiteto mokslinis-tiriamasis laivas, katamaranas „Mintis“ [29]

Krovininiai greitaeigiai katamaranai gali gabenti krovinius sąlyginai greičiau nei vienkorporusiai laivai. Tam, kad būtų optimizuotas jų transportavimo efektyvumas, būtina nustatyti ir sumažinti laivo struktūros patiriamas apkrovas. Greitaeigiems dideliems katamaranams didžiausios apkrovos eksploatacijos metu yra sukuriama slemingo metu. Šios apkrovos veikia ne tik visą laivo konstrukciją, tačiau sudaro ir dideles smūgines apkrovas lokaliems konstrukcijos elementams. Nustatyti slemingo apkrovas natūraliam laivui yra pakankamai sudėtinga, kadangi neįmanoma reguliuoti aplinkos sąlygų (bangos aukščio, bangos periodo, bangų pasklidimo (*Angl. Spreading*)), taip pat sunku (nepraktiška) kontroliuoti patį katamaraną (plaukimo greitį, diferento kampą, vandentalpą, kelionės laiką ir kryptį) [38].

Katamaranų geometrijos forma turi pranašumą prieš vienkorporusius laivus, nes išgaunamas didesnis laivo stabilumas vandenyje, pasiekiamas dėl vandenyje užimamo pločio, tuo tarpu vienkorporusiai laivai yra siauresni. Kruiziniams laivams labai svarbus parametras yra laivo stabilumas vandenyje, kad keleiviai ilgą laiką plaukiojant vandenyje nejaustų diskomforto. Katamaranų grimzlė yra daug mažesnė nei vienkorporusių laivų, todėl katamaranai turi didelį pranašumą sekliuose vandenyse. Katamaranai turi mažesnę vandens pasipriešinimą, todėl gali išvystyti didesnę greitį [3].

Kitas katamaranų pranašumas prieš vienkorporusius laivus yra tai, jog didesniems laivams dažnai reikalingas balastas kuo įmanoma arčiau kylio, kad būtų išlaikomas laivo stabilumas ir ekonomiškumas. Balastinio vandens naudojimas vienkorporuose laivuose užima vietą, kurią būtų galima išnaudoti patalpoms, dažniausiai balastinio vandens tankų įrengimui išnaudojamos nepatogios ir sunkiau prieinamos vietos. Katamaranų krovinio svoris eksploataavimo metu keičiasi mažiau nei vienkorporusių krovininių laivų, dėl šios priežasties katamaranuose balastinis vanduo rečiau naudojamas, nes korpusų forma sudaroma tokia, kuri optimaliai veiktų projektinei vaterlinijai kintant tam tikrame intervale. Dėl siauresnių korpuso formų katamaranas gali išvystyti daug didesnę greitį nei tokio paties dedveito vienkorporusis laivas. Korpuso priekio forma būna daroma smaili tam, kad plaukiant prieš bangas jos sukeltų mažiausia pasipriešinimą. Dėl šių savybių motorinių laivų lenktynėse dažniausiai naudojama būtent katamarano formos korpusai, kurių forma papildomai pritaikoma glisavimui, arba hibridiniai – pereinantys iš minolitinio korpuso priekyje į katamarano principo dviejų korpusų formą gale.

Visgi, katamarano korpuso forma yra įmantresnė, todėl projektavimas ir statyba yra labiau komplikuoti, brangesni ir techniškai sudėtingesni nei įprastų laivų. Katamaranai dėl korpusų išdėstymo turi mažą ilgio ir pločio santykį todėl šoninis daugiakorporusių laivų supimasis ir stovumas

yra ženkliai geresnis nei vienkorpusių laivų, tačiau išilginis supimasis neretai yra prastesnis. Banguojant išilginis supimasis nėra slopinamas, nes greitaeigių katamaranų korpusų apvadai nėra pilni. Išilginis supimasis kelia diskomfortą laivo keleiviams, taip pat padidėja bangų smūginės apkrovos. Dėl šių priežasčių, eksploatuojant bei projektuojant katamaraną, būtina iširti slemingo reiškinį ir jo keliamas problemas.

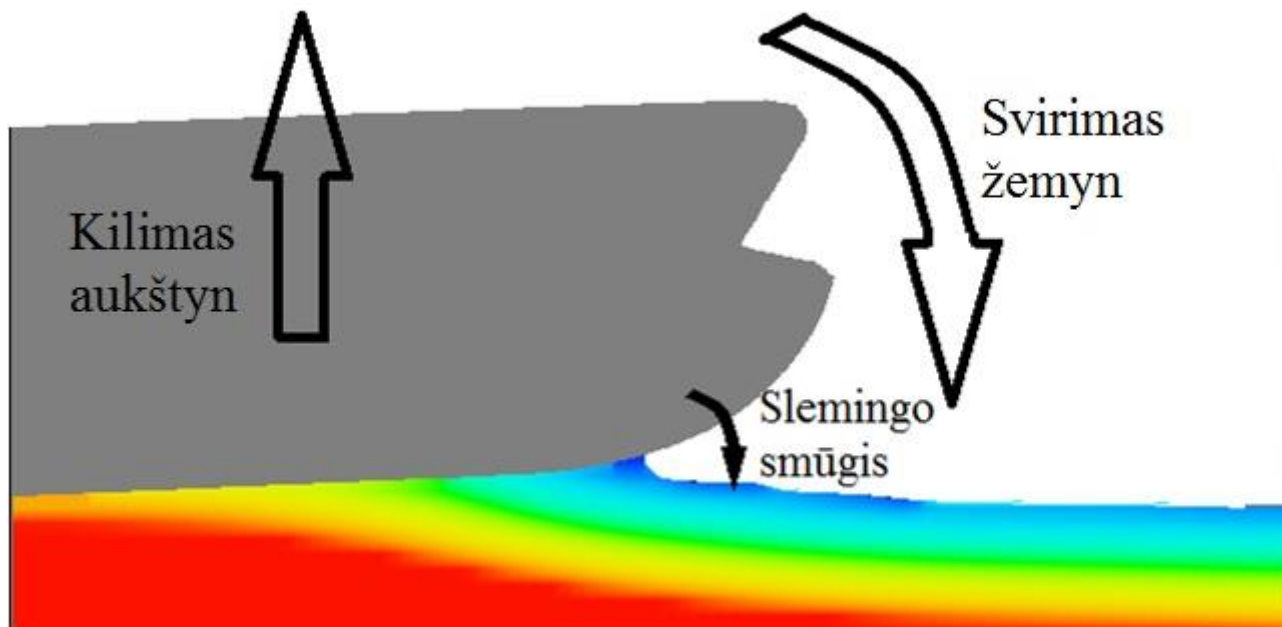
Šiame darbe bus tiriamas Klaipėdos universiteto mokslinio-tiriamąjo laivo „Mintis“ (žr. 1 pav.) atsparumas slemingo poveikiui, katamarano parametrai pateikiami pirmame priede. Šio laivo tipas – katamaranas (žiūrėti pirmą priedą). Šis korpuso tipas pasirinktas ne atsitiktinai, o siekiant kuo didesnio laivo stabilumo net esant stipriam bangavimui, kas būtina norint gauti kuo tikslesnius laive atliekamų tyrimų rezultatus. Šį 39 metrų ilgio ir 12 metrų pločio katamaraną pastatė „Vakarų Baltijos laivų statykla“. Laive vienu metu gali plaukti 18 asmenų – 6 įgulos nariai bei 12 mokslininkų, kurie moderniai įrengtose dviejose laboratorijose gali atlikti geologinius, biologinius, fizikinius-cheminius tyrimus. Katamaranas gali plaukti iki 200 mylių nuo kranto atstumu, autonomiškai dirbdamas 21 parą. Laivas suprojektuotas eksploatavimui kai aplinkos sąlygos yra iki 20 m/s vėjo greitis, ir 3,5 metrų aukščio bangos [26] [31].

1.2. Slemingas

Pradėjus literatūros apžvalgą internete pastebėta, jog slemingo tema lietuvių kalba aprašyta vieninteliame šaltinyje - V.Stonkaus – Laivo teorija, kuriame nedideliu straipsniu aprašomas slemingo apibrėžimas [35]. Peržvelgta J.Čerkos knyga, Laivo Hidroaeromechanika, tačiau informacijos susijusios su slemingu nerasta [17]. Tolimesnės informacijos paieškos atliktos angliškoje literatūroje.

Slemingas – hidrodinaminiai bangų smūgiai į laivo korpuso priekinę dalį, dažniausiai pasitaikantys laivui plaukiant prieš bangas. Slemingo metu neretai užliejamas laivo denis ir antstatas. Esant dideliame bangavimui dėl vandens amplitudės pokyčių laivagalyje sumažėja laivo greitis, nes sumažėjus propeleriui tenkančio vandens srautui sumažėja jo naudingumo koeficientas. Laivo greičio sumažinimas padeda sumažinti slemingo sukuriamas apkrovas ir jų daromą žalą. Taip pat dėl slemingo metu vykstančių smūgių į korpusą susidaro vibracijos, o didėjant laivo greičiui didėja ir mechaninių virpesių amplitudė bei dažnis, kurie savo ruožtu kenkia laivo konstrukcijai, sukeldami mechaninį nuovargį. [35]. Slemingo smūgiai pažeidžia vietines konstrukcijas ir viso laivo korpuso konstrukciją. Iškilusiam laivapriekiui trenkiantis į vandenį išilgai gaunamas viso laivo korpuso

konstrukcijos apkrovimas, kai tuo tarpu smūgio vietoje sukuriamas lokalus konstrukcijos smūgis. Sukelto smūgio trukmė siekia nuo 10 ms iki 100 ms.



2 pav. Slemingo iliustracija

Apatinės laivo dalies slemingas įvyksta dėl vandens poveikio į apatinę laivo korpuso dalį. Daugumoje atvejų tai sukelia serija didelių nuožulnių ir vertikalaus supimo judesių, kurie priverčia apatinę laivo dalį iškilti iš vandens ir tuoj pat vėl susidurti su vandeniu (žr. 2 pav.). Sukuriama apkrova paprastai būna labai trumpalaikė, veikia mažą paviršių bet sukelia didelį spaudimą. Susidūrimas gali sukelti stiprų vietinį laivo korpuso pažeidimą, medžiagos/struktūros neatlaikymą ar nuovargį, laivo krovinio pažeidimus (keleivių sužeidimus) dėl didelės akceleracijos, ar, geriausiu atveju, nemalonius aukšto dažnio mechaninius virpesius [41].

„Whipping“ – tai laivo korpuso mechaniniai virpesiai, atsirandantys dėl slemingo metu korpuso atsimušimo į vandenį. Įprastomis sąlygomis bangų ir laivo korpuso sąveika nėra pavojinga ir tik ilgai gali sukelti smulkius padarinius, tačiau slemingas gali sukelti laivo korpuso mechaninius virpesius, vadinamus „whipping (of the hull)“. Kai laivo savųjų mechaninių virpesių dažnis sutampa su priverstinių mechaninių virpesių dažniu, t.y. slemingo sukeliama bangų trankymosi į laivo korpusą, įvyksta mechaninis rezonansas, kuris sukelia didelės amplitudės virpesius.

Kiti bangų sukeliama laivo korpuso mechaniniai virpesiai, kurie gali sukelti metalų nuovargį vadinami „*Springing*“. Juos sukelia rezonansas tarp bangų susiduriančių su laivo korpuso konstrukcija dažnio bei savitojo laivo korpuso mechaninių virpesių dažnio. Tuo tarpu kai slėmingo sukulto „*whipping*“ galima išvengti keičiant greitį bei kursą, „*Springing*“ yra kur kas sunkiau išvengiama, nes įprastoje jūros būsenoje laivo korpusas nuolat susiduria su dideliu bangų dažnių diapazonu. Nepaisant to, „*springing*“ niekada nebuvo įvardytas kaip laivo korpuso konstrukcijos gedimo priežastis [11].

Slėmingas kenkia laivo korpusui ne tik mechaninių virpesių pobūdžiu bet ir mechaniniais smūgiais, kai laivo korpusas yra trankomas bangos vandens masės sukelta jėga. Mechaninių smūgių žala pasireiškia išoriniais ir vidiniais korpuso konstrukcijos pažeidimais [10]. Slėmingas ypač pavojingas laivams, kurie turi plokščią korpuso konstrukciją, kadangi didesnis vandens kiekis atsimuša į korpusą. Būtent todėl analizuojant katamarano savybes būtina atsižvelgti į galimus slėmingo sukeltus pavojus.

Skaičiuojant apvalios formos plokščio paviršiaus arba paviršiaus su tam tikru kampu apkrovimą slėmingo metu, kintamieji yra skysčio tankis, greitis tarp paviršiaus ir vandens, paviršiaus ploto, bei slėmingo sukeltos apkrovos konstanta, kuri nustatoma pagal klasifikacinės bendrovės pateiktą metodiką, priklausomai nuo kūno formos ir kūno kampo su vandens paviršiumi. Skirtingos klasifikacinės bendrovės pateikia skirtingą metodiką slėmingo apkrovai skaičiuoti. Pasak klasifikacinės bendrovės DNV, slėmingo sukeltų apkrovų skaičiavimas naudojant nustatytas įprastines matematinės formules yra sudėtingas, nes teorinio skaičiavimo metu sunku nustatyti kampą tarp laivo korpuso ir vandens paviršiaus. Taip pat slėmingo metu dėl smūgio į korpusą jėgos, korpuso forma pasikeičia, išlinksta smūgio metu, tačiau yra priimta dažniausiai šito reiškinio nevertinti ir neįtraukti į eksperimento skaičiavimus [9].

Bandymų baseinuose atliekant bandymus su modeliais yra galimybė kontroliuoti slėmingo parametrus, taip pat modelius aprūpinti reikalinga įranga slėmingo apkrovoms stebėti. Tam kad laivo modelis tinkamai reaguotų į apkrovas, reikalingas hidroelastinis modelis, kurio standumas atitiktų galutinio laivo parametrus. Tačiau iškyla problema, kad kai modelis jau padarytas, standumą koreguoti pakankamai sunku. Todėl dažniausiai modeliniu bandymu matuojamos slėmingo apkrovos, susidariusios ties laivo dugnu [38].

Apskaičiuoto slėmingo smūgio vertė yra pritaikoma tolimesnėje projektavimo stadijoje, kurioje skaičiuojama ar tinkamai parinktas korpuso metalo storis, bei sudaryta vidinę laivo struktūrą.

Projektavimo metu nustačius labiausiai pažeidžiamas ir silpniausias vietas, reikalinga sustiprinti konstrukciją. Dažniausiai projektavimo metu paliekama dedveito atsarga, tokiems atvejams, kad būtų galima padidinti metalo storį arba sustiprinti struktūrą braketėmis, ar parenkant tvirtesnę špacijos profilį atitinkamoje vietoje.

Pagrindiniai slemingo temą liečiantys klausimai, į kuriuos reikėtų atsižvelgti projektuojant laivą:

- Ar laivas patirs slemingą?
- Ar laivo slemingas vyksta konkrečiomis vandens sąlygomis?
- Ar slemingas daro žalo laivo konstrukcijai?
- Kiek labai reikalinga sumažinti laivo greitį, ar kurso pakeitimas efektyvus?
- Kiek nuo to nukenčia kuro sąnaudos ir kelionės laikas? [19]

1.3. Tyrimų apžvalga

2012 m. Buvo tiriama ir analizuojama trijų dimensijų laivo stovumo skaitinė skaičiavimo programa (*angl. solver*) – tai programa, sukurta apskaičiuoti galimas vandens patekimo ant denio tikimybes, jo kiekius bei įtaką laivo judėjimui (elgesiui), taip pat įvykių sąlygas, kuriomis gali atsirasti apatinės laivo korpuso dalies slemingas. Šis programa gali efektyviai spręsti sąveiką tarp įprastinių bei neįprastų jūros sąlygų bei įvairių laivo judėjimo variantų. Tai padeda sukurti efektyvią ir patikimą laivo elgesio statistinę analizę [12].

2007 m. G. Storhaug atliko mechaninių virpesių tyrimą natūraliomis sąlygomis 300 m geležies rūdą gabenančiame laive, o duomenis sulygino su keturių to meto moderniausių skaitinių programų, dirbančių su laivo ir vandens dinamine sąveika, duomenimis. Jis nustatė, kad programų rezultatai buvo nepatikimi nes programos, visumoje, buvo linkusios nuvertinti sukeltų mechaninių virpesių lygmenį. Atlikti matavimai parodė, jog mechaniniai virpesiai balastinėse sąlygose buvo stipresni negu transportuojant krovinį. Taip pat buvo nustatyta, jog mechaniniai virpesiai stipriau koreliavo su vėjo greičiu negu su bangų aukščiu. Nustatyta stipresnė mechaninių virpesių amplitudė laivui plaukiant priešprieša bangoms, negu plaukiant bangų kryptimi [36].

2003 m. Roberto Ojeda, B. Gangadhara Prusty ir Marcos Salas atliko tyrimą, kuriame buvo bandoma atskleisti greito bei sąlyginai mažo kompozitinių medžiagų katamarano sąveika su slemingo sukeliomomis apkrovomis. Slemingo apkrovos buvo skaičiuojamos sudalinant laivą į

atitinkamas dalis, pagal kurių svorį buvo nustatoma slemingo apkrovos reikšmė. Informacijai gauti buvo naudojami skaičiavimai baigtinių elementų metodu, kurių skaičiavimų pagalba buvo galima optimizuoti katamarano dizainą. Tyrimas buvo atliekamas naudojantis baigtinių elementų programa ANSYS 6.0. Darbo eigoje nustatytos jautriausios slemingui katamarano zonos, atlikti tam tikri pakeitimai tose zonose, bei sumažinti įtempiai [30].

2008 m. Hamn-Ching Chen ir Kai Yu atlikto tyrimą panaudojant bangų-srovių sąveiką su kūnais vandenyje. Tyrimas aiškina greenwater¹ ir bangų trunkymosi į denį ypatybes. Turbulencijos efektui tirti buvo pritaikytas Samagorinsky elementų išdidinimo metodas. Tiriant turbulenciją buvo panaudotas dviejų fazių tėkmės bandymas, siekiant bandymų metu patikrinti oro-vandens tarpusavio sąveikos kokybę testuojant tėkmę su įvairiais kūnais. Tolimesni tyrimai buvo atlikti su natūralios formos kūnais: pusrutuliu, greenwater patekimas ant offshorinių konstrukcijų ir denio [5].

2015 m. Sung-Jin Choi, Kwang-HoLee, OveTobiasGudmestad bandė atskleisti bangos lūžio metu sukeliama jėgą konstrukcijoms. Tyrimas buvo atliekamas su 3D sumodeliuotais vertikaliais ir nejudančiais strypais vandenyje. Tyrime taip pat buvo tirtas laikas kuriuo metu banga lūžta po susidūrimo su objektu. Analogiškas tyrimas buvo atliekamas natūraliomis sąlygomis, o rezultatai lyginami su CFD programa gautais rezultatais. Autoriai nustatė, jog 3D skaitinis modeliavimas yra patikimas būdas tirti bangos lūžio fenomenui. Autoriai teigia, jog tai gali būti puiki alternatyva brangiems eksperimentiniams tyrimams [37].

2013 m. Johan T. Tuitman; Theo N. Bosman; Eelco Harmsen buvo atlikta slemingo analizė panaudojant BEM² analizę ir jos duomenis perkelti i FEM modelį. Apskaičiuotas laikas per kurį vibracija slemingo vibracija po smūgio išnyksta. Nustatyta kad plaukiant skypai korpuso apkrovos padidėja. Tai paaiškinama plokštesniu korpuso paviršiaus plotu kuris yra veikiamas slemingo [16].

2014 m. Lapkritį Jung-Hyun Kim, Yonghwan Kim, Rae-Hyoung Yuck, Dong-Yeon Lee atliko sudėtingą slemingo ir „whipping‘o“ tyrimą panaudojant hidroanalizės ir eksperimentinius bandymus. Buvo pastatytas sumažintas hidroelastinis modelis, kuriuo nustatinėjamos slemingo ir „whipping‘o“ sukeltos apkrovos laivapriekiui ir laivagaliui, o gauti duomenys lyginami su CFD skaičiavimų rezultatais. Eksperimento sudėtingumas pasireiškia neįprastame, nors ir anksčiau taikytame metode, kai natūralus ir kompiuterinis modelis buvo sudalintas į lygiagrečias korpuso

¹ Greenwater (*Angl. Žalasis vanduo*) – jūros vanduo patekęs ant denio ar offshoro konstrukcijos.

² BEM – Boundary element method

sekcijas, kurios buvo sujungtos tampria medžiaga. Šitaip buvo bandoma išgauti natūralesnę laivo elgseną slemingo metu.

Eksperimente gauta, kad imituojant plaukimą trimis skirtingais greičiais nelineinės vibracijos modelyje sutampa su CFD ir matematiškai apskaičiuotais rezultatais. Buvo nustatyta, kad klasikiniai slemingo skaičiavimų metodai (Tokie kaip Wagner'io metodas) linkę nesutapti skaičiuojant „whipping‘o“ sukeltas vibracijas, kadangi nebuvo įvertinamas laivo pokrypis slemingo metu. Taip pat GWM³ skaičiavimo būdas padidino laivagalio ir sumažino laivapriekio vibracijų amplitudę. Autoriai taip pat nustatė, kad laivagalio ir laivapriekio vibracijos skyrėsi, ir kad laivagalio nebūtina dalinti į tamprias sekcijas taip tankiai [21].

Zhenju Chuang ir Sverre Steen 2011 m. trimis skirtingais būdais tyrė laivo greičio sumažėjimo ir kuro ekonomiškumo priklausomybę nuo bangų aukščio. Nustatyta, kad laivo greičio mažėjimas turi tiesinę priklausomybę nuo bangos periodo ilgio. Taip pat nustatyta, kad, kai bangos ilgis yra lygus 1,3 Lpp (1,3 Laivo ilgio), o bangos aukštis 2 m, tirtas laivas praranda apie 55% savo greičio [6].

2011 m. G. K. Kapsenberg aprašė slemingo analizės tyrimų istoriją, pradedant pirmaisiais Karman' o atliktais bandymais prieš 90m. metant kūną statmenai į vandenį ir baigiant šiuolaikinėmis CFD ir SPH⁴ programomis. Kiti paminėti slemingo analizės metodai buvo: panaudojant momentų teoriją, ribiniai dviejų elementų skaičiavimo metodai, statistiniai metodai ir analitiniai metodai. Išvados teigiama, kad vis dėlto CFD programos šio metu yra pajėgiausios apskaičiuoti slemingo sukeliamas apkrovas. Tačiau didžiausią neapibrėžtumą į slemingo tyrimus įneša tokie faktoriai kaip greičio sumažinimas bei kurso pakeitimas siekiant išvengti stipraus slemingo. Tyrimai šia tema vis dar yra tik pradinėje stadijoje [16].

2013 m. Mohammad Reza Khedmati ir Masound Pedram analizavo aliuminių panelių pritaikymą greitaeigiuose laivuose. Buvo tiriamas didelių įlinkių tampriai plastiškų elementų reagavimas į slemingo metu susidariusias impulsines apkrovas. Panelės skaičiuojamos naudojant baigtinių elementų metodą, aliuminio panelės sudarytos pagal „Ultimate Strength Committee of ISSC 2003“ rekomendacijas. Pastebėta, kad profiliai - pirmieji elementai, kurie neatlaikydavo apkrovų

³ GWM – generalized Wagner model

⁴ SPH - smoothed particle hydrodynamics

sukeliamo lenkimo. Taip pat nustatyta, kad didžiausią įtaką konstrukcijos tvirtumui turėjo metalo lakštų storis [20].

2011 m. Daniele Dessi ir Elena Ciappi natūrinio eksperimento būdu panaudojant modelį bandymų baseine bandė patikrinti plačiai naudojamą Ochi slemingo skaičiavimo metodą, kuris įvertina tik plokščio dugno slemingą. Eksperimente buvo nustatinėjama koreliacija tarp slemingo smūgių ir sukeliama vibracijų esant dideliems greičiams. Nustatyta, kad smūgių į korpusą dydžių reikšmės pasiskirsto glaustomis grupėmis [8].

2012 m. R. Sharma R. Sharmaa, Tae-wan Kimb, Richard Lee Storhc, Hans (J.J.) Hopmand, Stein Ove Erikstade atliko tyrimą tema - sunkumai modeliuojant laivus ir plaukiojančius kūnus kompiuterine analize. Jų tyrimas atskleidė klasifikacinių bendrovių skaičiavimų rekomendacijų problemas ir jų trūkumus [28].

Bandant tirti slemingą būtina atsižvelgti į klasifikacinių bendrovių rekomendacijas. 2013 metais buvo papildytos ABS⁵ rekomendacijos, kurios padeda nustatyti apkrovas ir jėgas, sukeliamas slemingo. Papildytos šių rekomendacijų dalys, skirtos korpuso apačios ir sterno slemingo skaičiavimams. [1] Apibendrinus literatūros šaltinių analizę galima teigti, kad vieningos metodikos skaičiuoti slemingo apkrovas nėra, taip pat autorių teigimu slemingas nėra visapusiškai ištirtas, todėl būtini papildomi tyrimai ir bandymai.

⁵ ABS - American Bureau of Shipping

II. DARBO METODIKA

Tyrimo objektu pasirinktas neseniai pastatytas Klaipėdos universiteto mokslinis-tiriamasis laivas – katamaranas. Slemingas sąlyginai mažai tirta tema, kurioje dominuoja būtent laivo elgesys vandenyje, korpuso tvirtumas ir vibracijos. Tačiau šiame darbe, nors ir buvo planuota, viso laivo vibracijų skaičiavimai nebuvo atliekami, nes šiam procesui reikalinga sudaryti didelį viso laivo detalų projekcinį modelį, kurį sudarė apie 20 tūkst. atskirų elementų. Tokia simuliacija reikalauja itin galingo kompiuterio, todėl jai atlikti nebuvo techninių galimybių. Taip pat reikalinga įvertinti sudėtingą vandens dempferavimo įtaką vibracijoms. Stipriai supaprastinta modalinė analizė neturi prasmės, nes gauti rezultatai būtų netikslūs.

Matematinio eksperimento planavimas. Planuojant eksperimentą reikalinga sudaryti eksperimento eigą, kurios laikantis bus atliekamas eksperimentas. Taip pat reikalinga numatyti darbo su programomis problemas. Kadangi eksperimentas bus atliekamas modeliuojant keliomis kompiuterinėmis programomis, atsiranda failų konvertavimo problema. Norint eksportuoti skirtingus skaičiavimų rezultatus tarp skirtingų programų, reikalinga rasti tinkamus 3D geometrijos failų bei duomenų failų formatus, kurie įgalintų perkelti jau gautus skaičiavimus iš vienos programos į kitą, neįnešant didesnių paklaidų tarp skaičiavimų ir 3D modelių. Tokia būtinybė atsiranda todėl, kad skirtingos programos skirtingai dirba su paviršiais ir 3D kūnais. Netinkamai eksportavus failą galima prarasti dalį geometrinės informacijos, dėl kurios pasikeistų galutinis darbo rezultatas, todėl tas pats eksperimentas bus atliekamas naudojant keletą skirtingų programų. Dažnai didelių kompanijų užsakyti analogiški modeliavimo bandymai yra atliekami mokslinėse laboratorijose, tačiau skaičiavimai atliekami lygiagrečiai programomis su eksperimentiniu modeliu vandens bandymų baseine. Šitokie bandymai yra labai brangūs ir sudėtingi, todėl šiuo atveju bandymas bus atliekamas tik kompiuterinės analizės būdu. Pirmiausia sudaromas diplominio darbo eigos planas:

1. Išanalizuoti katamarano jūrines savybes, jų trūkumus ir privalumus;
2. Išanalizuoti slemingo reiškinį, išnagrinėti jo sukeliamas problemas;
3. Atlikti literatūros šaltinių analizę, susipažinti su slemingo sprendimo būdais;
4. Išanalizuoti Baltijos jūros galimus stichinius pavojus, ir nustatyti aukščiausių bangų vidutinius parametrus;
5. Susipažinti su CFD ir FEM programomis, skaičiavimo būdais;
6. Susipažinti su Flow-3D programa, išsiaiškinti programos nustatymus, susipažinti su mokomaisiais pavyzdžiais;

7. Sudaryti Klaipėdos universiteto mokslinio-tiriamąjo laivo 3D modelį, reikalingą Flow-3D eksperimentui, pasinaudojant DelftShip ir Rhinoceros programomis;
8. Išanalizuoti duomenis gautus Flow-3D programa, nustatyti labiausiai pažeidžiamas vietas;
9. Rhinoceros programa sudaryti katamarano laivapriekio bloko struktūros 3D modelį su visais laivo elementais;
10. Sudarytą modelį įkelti į ANSYS programą, atlikti korpuso struktūros stiprumo skaičiavimus;
11. Sudaryti išvadas.

Atliekant katamarano slemingo simuliaciją buvo naudojama Flow-3D programa, kuri plačiai paplitusi kaip viena geriausių programų, atliekančių skaičiavimus susijusius su skysčių hidromechanika. Flow-3D veikia naudojant skaičiuojamąją skysčių dinamiką (*Angl. CFD - Computational Fluid Dynamics*), kuri skiriasi nuo BEM (baigtinių elementų metodo) matematiniu skaičiavimu. Kadangi skysčiams leidžiamas didesnis judėjimas nei statikos elementams, todėl skaičiuojant elemento judėjimą jis yra aproksimuojamas, taip pat, diskretizacijos procesas skiriasi nuo naudojamo BEM skaičiavimuose. Tačiau BEM skaičiavimai yra labiau paplitę dėl savo pritaikomumo, dažniausiai sudėtingų konstrukcijų skaičiavimuose.

Iš darbo vadovo gauta dalis laivo struktūros modelio, kuris buvo „.wrl“ formatu, tai yra, „mesh“ failas (tinklelis, sudarytas iš atskirų mažų trikampių plokštumų), kuris nėra priskiriamas kaip paviršiams sudaryti tinkamas failas. Norint atlikti analizę būtina perdaryti netinkamus „mesh“ elementus į „NURBS“ paviršius, tinkamus struktūrinei ir modalinei analizei. Flow-3D simuliacijai tinkamas modelis buvo perdarytas iš „.fbm“ formato į „.stl“ formatą naudojant DelftShip programą, failas buvo papildomai pakoreguotas Rhinoceros programa.

Rašant darbą buvo naudojamosi Klaipėdos universiteto senato nutarimu: „Dėl „Klaipėdos universiteto studentų savarankiškų rašto ir meno darbų bendrųjų reikalavimų aprašo“ patvirtinimo“. Teksto redaktorius naudojamas Kingstone Office programinis paketas.

III. MATEMATINIO EKSPERIMENTO PLANAVIMAS IR REIKALAVIMAI

Katamaranų slemingo tyrimo metodai tiriant slemingo poveikį laivo konstrukcijai atliekami atsižvelgiant į esamas galimybes. Bangų sukeliama slemingo smūgiai yra nepastovūs ir kintantys pagal įvairius kriterijus, todėl dažniausiai atliekant bandymus bandymų baseinuose, panaudojant sumažintą laivo modelį, gauti rezultatai nusako tik laivo stovumą ir laivo eigumo sumažėjimą esant slemingui, bet ne bangų poveikį laivo korpuso konstrukcijai. Šitokius bandymus atlikti yra sudėtinga ir brangu. Pagal pateiktą klasifikacinių bendrovių metodiką slemingo apkrovas laivo korpuso konstrukcijai galima apskaičiuoti matematinėmis formulėmis. DNV metodikoje pateiktomis formulėmis apskaičiuojamas slemingo poveikis nesudėtingos formos dviejų dimensijų kietam kūnui esant apie 15° bangų trenkimosi į korpusą kampui. [6]. Norint atlikti detalią sudėtingos formos laivo korpuso konstrukcijos analizę, kurioje būtų visapusiškai įvertintas slemingo reiškinys, reikalinga sudaryti modelį kompiuterinėmis CFD bei FEM programomis. Tobulėjant kompiuterinėms programoms bei jų galimybėms šiuo metu matoma tendencija sudėtingus dinaminis slemingo bandymus atlikti modeliuojant įvairius galimus slemingo variantus. Programos pajėgios apskaičiuoti didelį duomenų kiekį slemingo metu vykstant dinaminiais procesams dar projektavimo etape, tad tai itin naudinga praktika, nes galima nustatyti net sudėtingos korpuso formos laivo atsparumą slemingui dar prieš pradėdant tą laivą statyti. Flow-3D programa turi patikimą ir stabiliai veikiančią kūnų judėjimo fizikos (*Angl. GMO – general moving objects*) skaičiavimo modulį, kuris ir buvo naudojamas atliekant slemingo bandymą. Modulis leidžia suteikti norimus laisvės laipsnius judančiam kūnui, kuris yra veikiamas hidrodinamikos: kūnas yra veikiamas skysčio, o skystis yra veikiamas kūno ir kartu vienas su kitu sąveikauja tarpusavyje.

Sudarant simuliacijos modelį slemingui reikalingas tik katamarano korpuso modelis be vidinės struktūros ir be detalių vaizdų. Šiuo atveju apkalos formos failas buvo sudarytas programa DelftShip, šios programos pranašumas – tai greitai įvertinamas modeliuojamo laivo vandentalpa, tačiau šia programa modeliuoti paviršius yra nepatogu, todėl sudaromas tik preliminarus korpuso modelis. Toliau preliminarus laivo korpusas yra eksportuojamas į „.STL“ formatą. Įkelti paviršiai sudaromi iš taškų paviršius kuriant juos jungiant pagal arba prieš laikrodžio rodyklę, nuo to priklauso kaip apverstas paviršius, teigiama ar neigiama puse. Prieš įkeliant failą į Flow-3D reikalinga paviršius sutvarkyti, kadangi Flow-3D neatvaizduoja kuri pusė yra teigiama ir neigiama. 3D modelis sudaromas užpildant erdves tarp paviršių neigiamųjų pusių, teigiamosios pusės turi žiūrėti į išorę. Jei paviršiai neapversti tvarkingai, gaunama 3D modelio forma neatitinkanti modelio arba programa nesugeneruoja 3D modelio.

Simuliacijos rajonas sudaromas pakankamai laisvas, kad bangos galėtų laisvai judėti ir laivas banguojant neišlystų už kraštų, tačiau ir ne per daug didelis, nes šitaip labiau apkraunamas skaičiavimo procesas. Kadangi simuliuojamas simetriškas kūnas, rekomenduotina atlikti simuliaciją tik pusei kūno, šitaip galima pasiekti dvigubai didesnę tikslumą. Skaičiuojant tinklelio mastelis turi būti pakankamai mažas norimai problemai iširti. Šiuo atveju parinktas 1000000 elementų tinklelis.

Atlikus eksperimentus programa Flow-3D gauti duomenys integruojami į ANSYS programą, kurioje, naudojant statinės struktūros (*angl. static structural*) modelį, apskaičiuojamos apkrovos, tenkančios katamarano korpuso konstrukcijai. Skaičiavimams naudojama „*Von Mises Stress*“ metodas. Šis metodas dažniausiai naudojamas norint nustatyti ar izotropinis ir plastiškas kūnas (*angl. isotropic and ductile*) pasieks plastinės deformacijos ribą esant sudėtingoms apkrovos sąlygoms. Reikia pažymėti, kad šiuo metodu apskaičiuota reikšmė nėra tiksli ir labiau remiasi empiriniais skaičiavimais su atitinkama paklaida ir deviacija [22].

Atliekant pirmuosius katamarano „Mintis“ bandymus jūroje, katamaranas buvo papuolęs į pavojingai aukštas bangas, kurios siekė iki 5-6 metrų aukščio, tad būtina iširti katamarano slemingo atvejį, kai bangos siekia ir iki 6 metrų. Rekordinė Baltijos jūroje 2004 m užfiksuota banga buvo net 14 metrų aukščio. [14]. Taip pat jūrininkystėje pasitaiko atveju, kai netikėtai iškyla „banga žudikė“ [25] (*angl. Freak wave* arba „*Rogue wave*“), kai tarp reguliarių bangų staiga pasirodo du ir daugiau kartų didesnė banga. Šios bangos buvo pastebimos daug anksčiau, tačiau moksliskai pripažintos kaip egzistuojančios tik 2000 metais. Yra kelios šį reiškinį aiškinančios teorijos. Viena teorija teigia, jog kai audros sukeltų bangų kryptis yra priešinga povandeninės srovės kryptčiai, jų sąveika sutrumpina bangos dažnį. Tai gali priversti bangas susijungti, suformuojant didžiules „bangas žudikes“. Šiuo būdu susikūrusios bangos turi tendenciją išlikti ganėtinai ilgai. Kita teorija teigia, jog „bangos žudikės“ susiformuoja dėl to, kad per vandenyną keliaujantys bangavimai yra skirtingų greičių ir kryptčių. Kai šie bangavimai prasilenkia vienas su kitu, jų keteros, įdubos bei ilgai kartais sutampa ir vieni kitus pastiprina. Šis procesas gali suformuoti neįprastai didžiules, aukštas bangas, kurios išnyksta labai greitai. Visgi, jei bangavimai būna tos pačios kryptties, šios „bangos žudikės“ prieš nuslūgdamos gali išgyventi kelias minutes [39]. Visgi, šitokie atvejai labai reti ir šiame tyrime nebus nagrinėjami.

Skaičiuojant slemingo apkrovas bus atlikti du slemingo bandymai:

- Pirmasis eksperimentas: Bangų aukštis - dažniausiai pasitaikančios aukščiausios bangos Baltijos jūroje.
- Antrasis eksperimentas: bangos aukštis parinktas remiantis katamarano „Mintis“ bandymų jūroje metu pasitaikiusį bangų aukštį - 6 m.

IV. MATEMATINIS EKSPERIMENTAS SLEMINGO JĖGOS ĮVERTINIMUI

Atliekant simuliacijas Flow-3D programa atliekami du skirtingi eksperimentai, kurių vienas skirtas nustatyti slemingo apkrovas esant įprastai dideliam Baltijos jūros bangavimui, o kitas eksperimentas – nustatyti slemingo reiškinį esant 6 metrų bangoms.

4.1. Pirmasis eksperimentas

Pirmasis eksperimentas atliekamas norint nustatyti slemingo poveikį katamarano konstrukcijai potencialiai dažnai pasitaikančiose Baltijos jūros bangavimo sąlygose. Reikalinga iširti Baltijos jūros savybes, kurios pasitaiko pakankamai dažnai esant dideliam jūros bangavimui, išanalizuoti jūros vandens parametrus, kurie bus reikalingi atlikti simuliacijoms. Nuo pasirinktų parametrų priklausys Flow-3D programos simuliacija gauti rezultatai, kurie vėliau bus integruojami į ANSYS programą.

4.1.1. Bangos parametrų nustatymas

Norint apskaičiuoti slemingo sukuriamas apkrovas reikalinga įvertinti katamarano eksploatavimo regiono jūrinės savybes. HELCOM (Baltijos jūros aplinkos apsaugos komisija, Helsinkio padalinys) pateikia Baltijos jūros įvairių stebėjimo stočių duomenis 2013m (žiūrėti priedą Nr. 2, 3). Bangavimas vasaros metu yra mažesnis nei žiemą, kurios metu Lietuvos pakrantėse bangavimas kritiniais atvejais gali pasiekti iki 6 metrų aukštį (įprastai siekiant iki 4 metrų aukščio bangoms) [13]. E. Kasiulio atlikto tyrimo „Baltijos jūros priekrantės ties Klaipėda bangų aukščių ir vėjo greičių tikimybinių skirstinių analizė“ išvadose teigiama, kad vidutinis bangų aukštis Baltijos jūros pakrantėje ties Klaipėda yra 0,67 m 50% tikimybei pagal logaritminį normalųjį skirstinį, o maksimalus metinis bangų aukštis yra 3,9 m esant 50% tikimybei pagal logaritminį normalųjį skirstinį [27]. Abiejuose šaltiniuose nenurodomas bangų periodas, kuris turi įtaką katamarano judėjimui esant dideliam bangavimui. Priklausomai nuo periodo, vienodo aukščio bangos gali tankiau ar rečiau išsidėstyti, nuo ko priklausys katamarano korpuso į vandenį smūgio kampas, smūgio jėga ir sukiamų vibracijų dažnis. IACS (tarptautinė klasifikacinių bendrovių asociacija) pateikia Atlanto vandenyno šiaurinės dalies bangavimo duomenis, atvaizduojančius vandens būsenos tikimybę per 100000 matavimų esant atitinkamam bangos aukščiui ir bangos periodui.

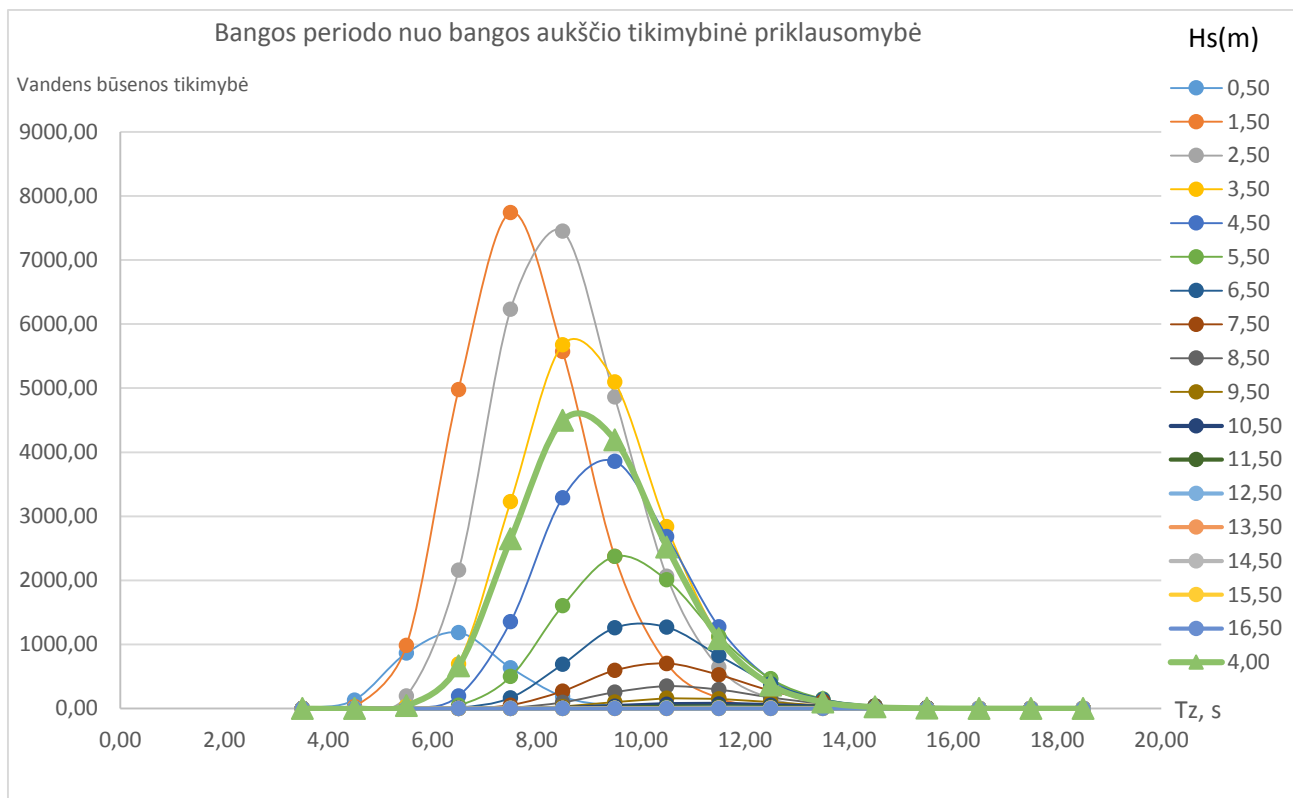
1 lentelė. IACS pateikiama vandens būsenų tikimybių lentelė [1].

Hs (m)	Tz (s)																Suma
	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5	
0.5	1.3	133.7	865.6	1186.0	634.2	186.3	36.9	5.6	0.7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3050
1.5	0.0	29.3	986.0	4976.0	7738.0	5569.7	2375.7	703.5	160.7	30.5	5.1	0.8	0.1	0.0	0.0	0.0	22575
2.5	0.0	2.2	197.5	2158.8	6230.0	7449.5	4860.4	2066.0	644.5	160.2	33.7	6.3	1.1	0.2	0.0	0.0	23810
3.5	0.0	0.2	34.9	695.5	3226.5	5675.0	5099.1	2838.0	1114.1	337.7	84.3	18.2	3.5	0.6	0.1	0.0	19128
4.5	0.0	0.0	6.0	196.1	1354.3	3288.5	3857.5	2685.5	1275.2	455.1	130.9	31.9	6.9	1.3	0.2	0.0	13289
5.5	0.0	0.0	1.0	51.0	498.4	1602.9	2372.7	2008.3	1126.0	463.6	150.9	41.0	9.7	2.1	0.4	0.1	8328
6.5	0.0	0.0	0.2	12.6	167.0	690.3	1257.9	1268.6	825.9	386.8	140.8	42.2	10.9	2.5	0.5	0.1	4806
7.5	0.0	0.0	0.0	3.0	52.1	270.1	594.4	703.2	524.9	276.7	111.7	36.7	10.2	2.5	0.6	0.1	2586
8.5	0.0	0.0	0.0	0.7	15.4	97.9	255.9	350.6	296.9	174.6	77.6	27.7	8.4	2.2	0.5	0.1	1309
9.5	0.0	0.0	0.0	0.2	4.3	33.2	101.9	159.9	152.2	99.2	48.3	18.7	6.1	1.7	0.4	0.1	626
10.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	10.7	37.9	67.5	71.7	51.5	27.3	11.4	4.0	1.2	0.3	0.1	285
11.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	3.3	13.3	26.6	31.4	24.7	14.2	6.4	2.4	0.7	0.2	0.1	124
12.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1.0	4.4	9.9	12.8	11.0	6.8	3.3	1.3	0.4	0.1	0.0	51
13.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.4	3.5	5.0	4.6	3.1	1.6	0.7	0.2	0.1	0.0	21
14.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	1.2	1.8	1.8	1.3	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0	8
15.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	0.6	0.7	0.5	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0	3
16.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	1
Suma	1	165	2091	9280	19922	24879	20870	12898	6245	2479	837	247	66	16	3	1	100000

čia Hs – bangos aukštis, m;

Tz – bangos periodas, s.

Dažniausiai maksimalių bangų aukštis Klaipėdos pakrantėse yra arti 4 metrų. Iš IACS pateikiamos vandens būsenų tikimybių lentelės duomenų, naudojant „Excel“ programą, sudaromas grafikas, kurio pagalba galima nustatyti vidutinį bangos periodą. Vienodo aukščio bangų periodas gali būti skirtingas, todėl toliau skaičiuojant bangos periodą 4 metrų bangai bus parinktas periodas, kuris apskaičiuotas pagal dažniausiai pasitaikančius periodus panašaus aukščio bangoms.



3 pav. Bangos periodo ir bangos aukščio tikimybinė priklausomybė (pirmasis eksperimentas)

Sudarius grafiką (žr. 3 pav.) ir išvedus vidutinę kreivę iš gretimos reikšmės duomenų, apskaičiuota, kad esant 4 m bangoms, dažniausiai pasitaikantis bangų periodas $T_z = 8,7$ s.

4.1.2. Flow-3D parametrų nustatymas

Atliekant katamarano laivo korpuso slemingo simuliaciją, be bangavimo parametrų, reikalingi ir kiti vandens parametrai, naudojami simuliacijoje. Simuliacijoje nustatomas vandens klampumo fizikos modelis. Vandens klampumo ir turbulencijos nustatymuose parenkamas „pernormalizuotas grupių modelis“ (Angl. *RNG - Renormalized group model*), kuris nustato minimalų limitą turbulencijos disipacijai ϵ , tam kad skysčio turbulencijos ir klampumo skaičiavimai nepasidarytų labai apkrauti dėl sumažėjusių reikšmių. Ši reikšmė programos apskaičiuojama savaime, kaip funkcija, priklausanti nuo simuliacijos laiko žingsnio. Maksimali turbulencijos konstanta yra užduodama atskirai, tačiau šios simuliacijos atveju turbulencijos simuliacijavimas netikslingas. Skysčio maksimalus klampumas lygus $0.001397 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m})$, slėgis $0,001203 \text{ Pa}$, tankis $1027,3 \text{ kg}/\text{m}^3$, spūdimas lygus $5 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}$ jūros vandeniui esant $8,1 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūrai parinktas pagal ITTC – „tarptautinės bandymų baseinų konferencijos“ (Angl. *International towing tank conference*) pateiktą medžiagą (žiūrėti priedą Nr. 7). [7].

Slemingo eksperimente svarbus parametras yra vandens-oro paviršiaus įtempimas γ , šis parametras priklauso nuo vandens temperatūros ir druskingumo. 2007 m. Atliktas tyrimas „Gėlo ir druskingo vandens cirkuliacijos ypatumai Klaipėdos sąsiauryje ir Kuršių marių šiaurinėje dalyje“ nurodo didžiausią druskingumą Klaipėdos pakrantėse iki 6,9‰ 2002 m. ir 5,6‰ 2006 m. (žiūrėti priedus Nr. 5, 6) [2]. Kai vidutinė Baltijos jūros vandens temperatūra 2013 m. lygi 8,1°C [32]. Kai vandens druskingumas 6,9‰, o temperatūra 8,1 °C, vandens-oro sąlyčio vandens įtempimas yra lygus 0,0745 N/m (žiūrėti priedą Nr. 4) [23].

2 lentelė. Visi vandens skysčio parametrai reikalingi simuliacijai

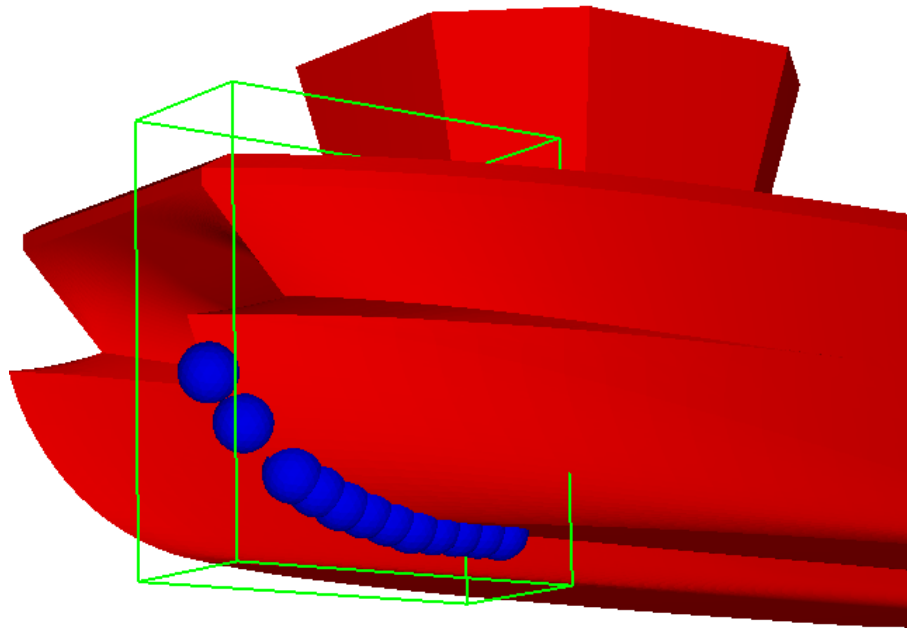
Parametras	Reikšmė	Matavimo vienetas
Temperatūra	8,1	°C
Periodas	8,7	s
Bangos aukštis	4	m
Tankis	1027,3	kg/m ³
Klampus	0.001058	kg/(s*m)
Slėgis	0,001203	Pa
Spūdumas	5*10 ⁻¹⁰	Pa
Vandens-oro įtempimas	0,0745	N/m

Simuliacijos metu kūnų judėjimo fizikos skaičiavimo modulyje katamaranui buvo suteikti tik 2 laisvės laipsniai modeliui, kadangi modelyje reikalinga tik judėjimas Z ašimi (laivo judėjimas aukštyn/žemyn), bei svyravimai apie Y ašį (išilginis laivo svyravimas). Sukimasis kitomis ašimis nėra reikalingas nes neatliekamas bandymas su manevrais ar laivo stovumo bandymas kai banga atsimuša iš šono. Išilginis judėjimas taip pat suvaržomas, nes taip suteikiamas papildomas laisvės laipsnis, dėl ko reikalinga papildoma išilginė erdvė katamarano judėjimui, bei sudaromas didesnis apkrovimas skaičiavimams dėl atitinkamai padidėjusio ploto. Kadangi į skaičiavimus įtraukiame katamarano greitį vykstant slemingui, katamarano greitis yra suteikiamas bangoms, todėl šitaip katamaranas techniškai stovi vietoje, tačiau simuliacijos metu gauname norimą rezultatą. Katamarano ekonominis greitis laikomas 11,5 mazgo arba 5,916 m/s. Simuliacijoje bangoms suteikiamas papildomas 3 m/s greitis (~50% katamarano ekonominio greičio prarandamo dėl aukštų bangų [6]). Bangų sudarymo metodas Flow-3D programoje remiasi 1985 metais John D. Fenton sukurta teorija skirta skaičiuoti bangų judėjimui, kurios pagalba galima rasti bangos greitį žinant jos aukštį.

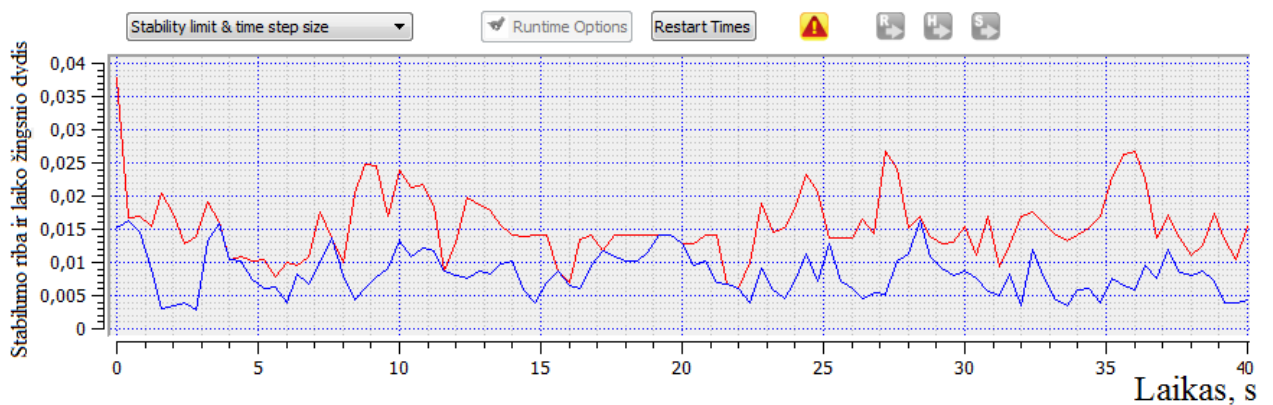
4.1.3. Flow-3D pirmojo eksperimento atlikimas

Pirmąją simuliaciją sudaro dvi dalys. Pirmosios simuliacijos pirmoje dalyje atliekamas (simuliuojamas) 40 sekundžių trukmės katamarano judėjimas vandenyje bangavimo metu siekiant išvengti pereinamųjų procesų netikslumų. Toliau simuliacija pratęsiama, įkeliant pirmosios simuliacijos pirmosios dalies duomenis ir parametrus, tačiau padidinant elementų tinklelį dvigubai – didesniai tikslumui. Sukuriamas papildomas vidinis tinklelis ties laivapriekiu, kuris yra du kartus tankesnis nei išorinis tinklelis, tam kad būtų pasiekiamas dar didesnis tikslumas. Būtina paminėti, kad rekomenduotinas tinklelio elementų dydžių perėjimas iš vieno elementų tinklelio į kitą turi sekti geometrine progresija. Kitu atveju elementų duomenys, pereinant iš vieno elementų tinklelio į kitą, bus netikslūs. Pirmosios simuliacijos antrosios dalies laikas, žinant bangos periodą $T_z = 8,7$ s, lygus 15 s – tai pakankamas laiko tarpas įvykti vienam slemingo smūgiui. Bendros slemingo sukeliamų apkrovų matavimo simuliacijos trukmė – 55 sekundės. Toks matavimo laikas pasirinktas todėl, kad pereinamieji procesai simuliacijos pradžioje neretai iškreipia kūno parametrus, kaip pavyzdžiui, jei laivas su atitinkama projektine vaterlinija sumodeliuojamas atitinkamame vandens aukštyje, tačiau svoris suteikiamas per mažas, laivas iškils aukštyje ir dėl pereinamųjų procesų plūduriuos ant vandens kol nusistovės. Todėl, nustatius laivo svorio parametrus reikalinga išbandyti modelį ramiaame vandenyje ir nustatyti ar nusistovėjusi vaterlinija sutampa su projektine vaterlinija. Neatitikimas taip pat gali įvykti dėl per didelio tinklo mastelio parinkimo, kai objektas praranda dalį savo formos. Todėl, priklausomai nuo įvestų parametrų, jei programoje nurodomas kūno tankis, tai keičiantis kūno tūriui keisis ir jo masė. Taip pat simuliacijos eigoje kūno tūris tam tikrose vietose pakinta, nors kūno svoris ir masės centras išlieka toks pat.

Kadangi tiriamas slemingo atvejis, kai bangos mušasi į katamarano laivapriekį ties kyliu, 0,5 m atstumu sudaryti papildomi matavimo taškai, kurie suteiks papildomą informaciją, susijusią su laivapriekio sąveika su vandeniu. Laivo priekinė dalis pavaizduota ketvirtame paveiksle, čia mėlyni apskritimai vaizduoja matavimo taškus, kuriuose bus matuojama slemingo apkrova. Simuliacijos nustatymuose skaičiavimų rezultatais pasirenkame dinaminį klampumą, skysčių trintį, skysčių pagreičius, slėgį ir skysčių hidraulinę informaciją. Paleidžiame simuliaciją.

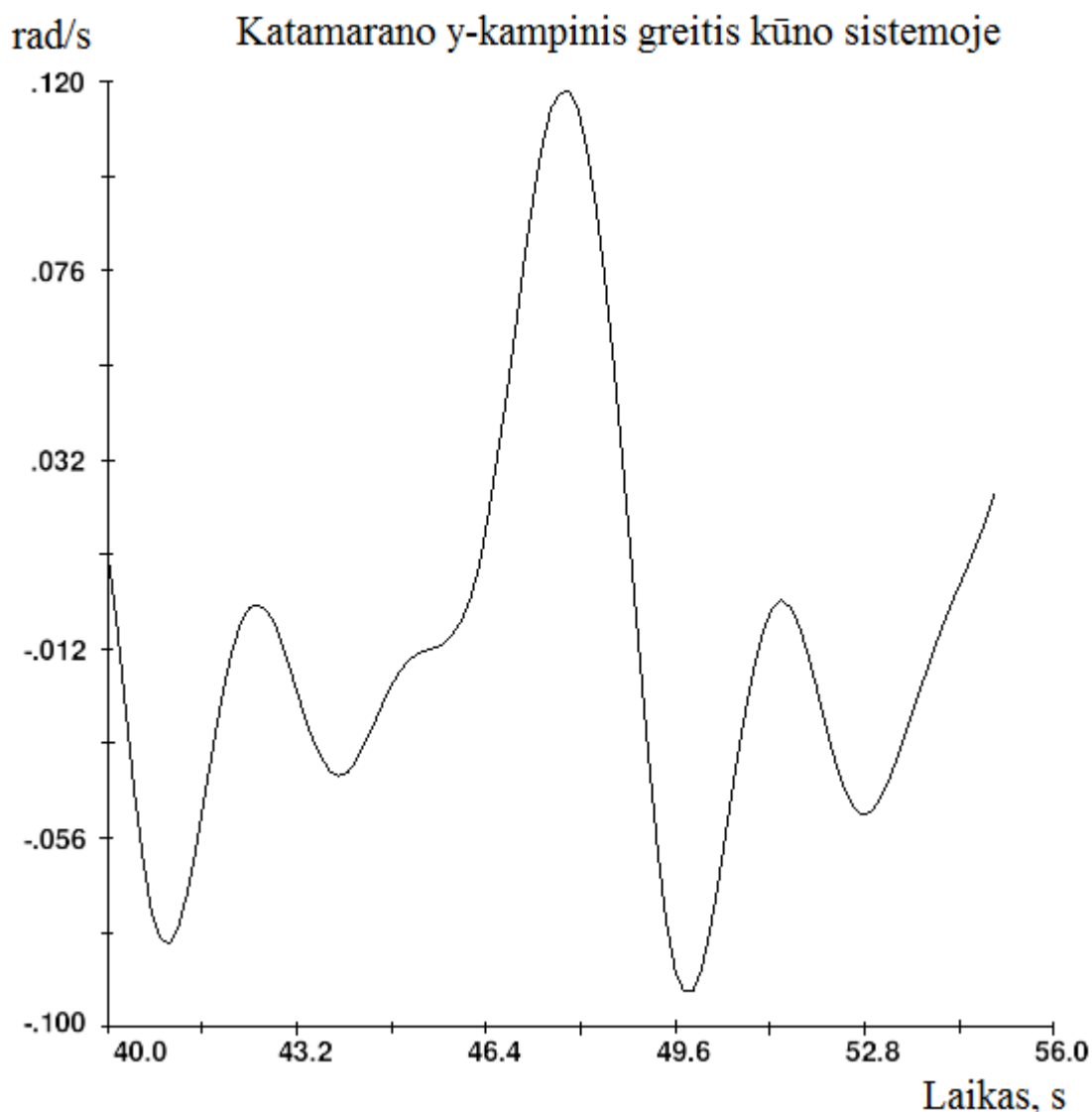


4 pav. Katamarano modelis su papildomu tinkleliu ir matuojami taškai(pakeisti)



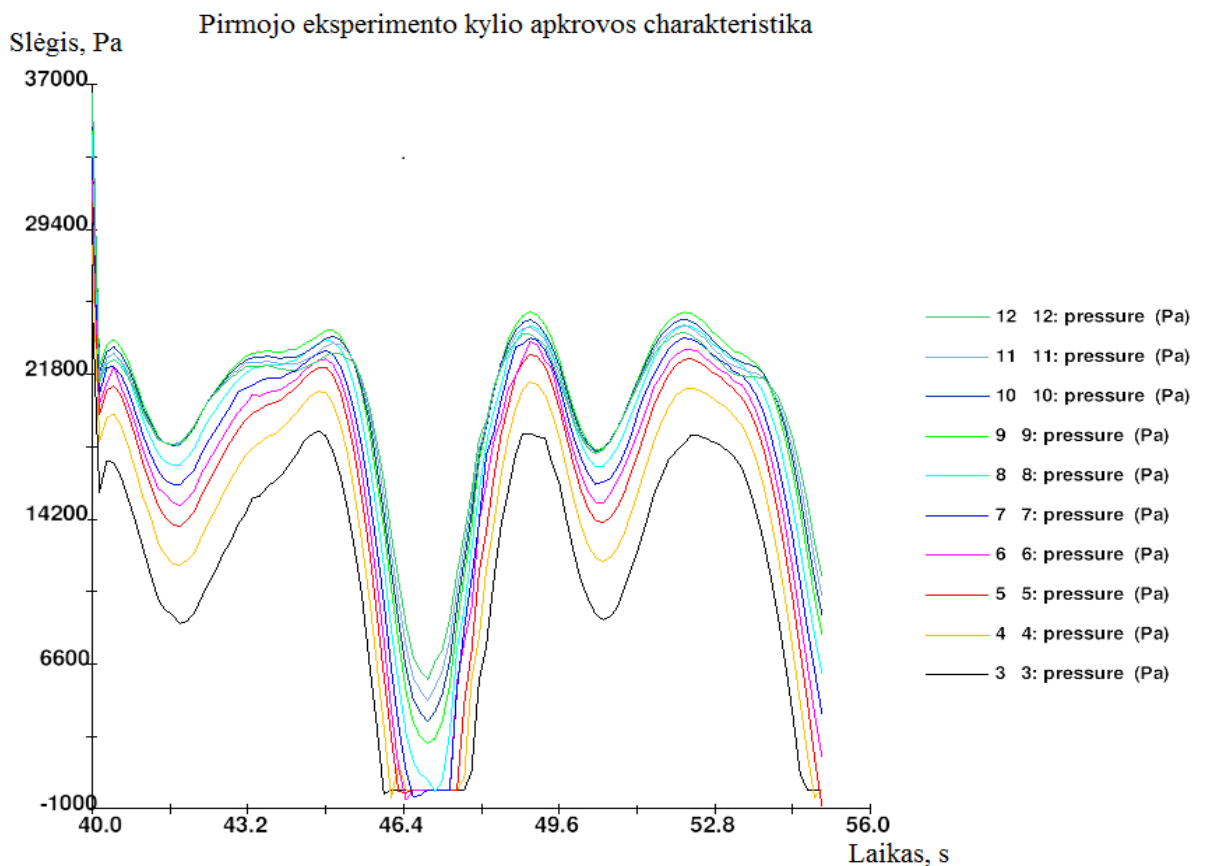
5 pav. Laiko žingsnio ir stabilumo grafikas

Penktame paveiksle pavaizduotas stabilumo limito ir laiko žingsnio (*Angl. Stability limit & time-step*) kitimas simuliacijos eigoje. Rekomenduojama, kad stabilumo limitas neviršytų 0,1 reikšmės, kadangi objektai (skysčio elementai) dėl nestabilaus veikimo dažniausiai iškreipia simuliacijos rezultatus. Atsiranda skysčio elementų sumažėjimai ir padaugėjimai, skaičiavimų netikslumas, taip pat elementai tarpusavyje sąveikauja netinkamai. Sumažėjus simuliacijos stabilumui laiko žingsnis yra mažinamas ir sekantis žingsnis skaičiuojamas su mažesniu laiko pokyčiu. Jei sumažinus žingsnį simuliacijos stabilumas nepagerėjo, žingsnio mažinimas yra kartojamas. Elementų tinklelio dydis įtakoja gaunamą elementų stabilumą simuliacijoje. Kaip matyti iš grafiko (pav. 5), simuliacija neviršija rekomenduojamos stabilumo ribos.



6 pav. Diferento kampo kitimas slemingo metu (pirmasis eksperimentas)

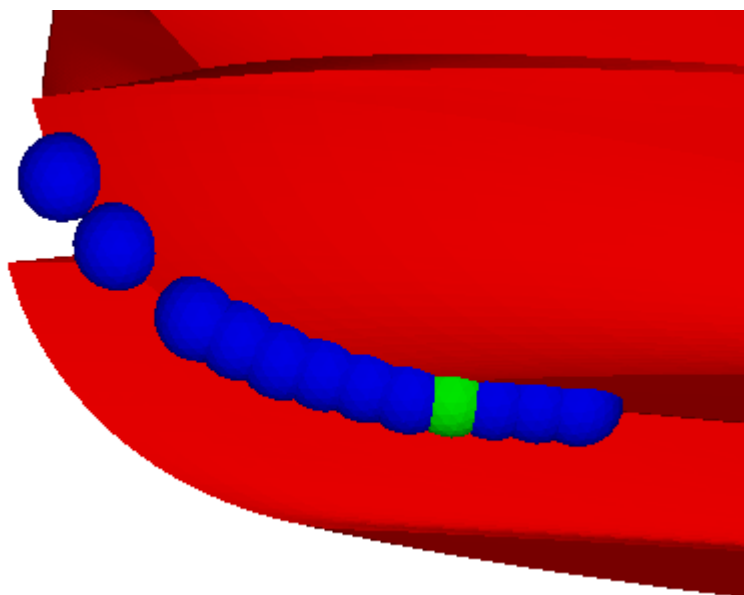
Norint įvertinti laivo kylinį supimąsi plaukiant priešais aukštas bangas reikalinga rasti diferento kampo kitimą. Flow 3D programa galima peržiūrėti kylinio supimo apie Y ašį greitį, gaunamas kylinio supimo arba diferento kampo kitimo grafikas bėgant laikui. Analizuojant grafiką (6 paveikslas) reikia paminėti, kad neigiamas kampinis greitis vaizduoja laivapriekio kritimą, o teigiama grafiko dalis vaizduoja laivapriekio kėlimą aukštyn, tai yra diferento kampo didėjimą. Didžiausias diferento kampo greičio kitimas vykta laivapriekiui kylant aukštyn, kampinis greitis pakyla iki $0,120 \text{ rad/s}$, o laivaprekiui krintant žemyn reikšmė nukrinta iki $-0,090 \text{ rad/s}$.



7 pav. Laivapriekio kylio apkrovos slemingo metu (pirmasis eksperimentas)

Pagrindinis Flow-3D simuliacijos tikslas - nustatyti slemingo sukeltas apkrovas pagal anksčiau pasirinktus slemingo dinaminės apkrovos matavimo taškus laivapriekyje. Septintame paveiksle esančiame grafike vaizduojamas apkrovos kitimas laiko atžvilgiu atitinkamuose pasirinktuose taškuose. 49,6 ir 52,8 sekundėmis įvyksta du išskirstytos jėgos šuoliai, pirmasis atsiranda kai laivapriekis trenkiasi į vandenį ir nugrimzta, pasiekiamas slėgis ~23 kPa, toliau seka apkrovos sumažėjimas, kai laivapriekis iškyla aukštyn po dinaminio smūgio. Iškilus iki tam tikro aukščio sekanti banga trenkiasi į laivapriekį sukurdamą dar vieną smūgį, kuris šiuo atveju pakyla iki panašios pirmajam smūgiui reikšmės ~23 kPa. Bangai perėjus laivapriekį, laivo priekis yra vėl iškeliamas iš vandens, šitaip atsiranda apkrovos kritimas iki 0 Pa – grafike matyti, jog apkrovimas pereina į nedidelę neigiamą reikšmę. Taip yra dėl vandens įtempimo ir klampumo, vanduo yra atplėšiamas nuo laivo paviršiaus. Grafike (7 pav.) žalia spalva pavaizduota 9 kreivė „9:pressure (Pa)“ pasiekia didžiausias apkrovos reikšmes, kurios siekia iki 23kPa. Atlikus simuliaciją galima daryti išvadą, kad slemingo gauta apkrovos reikšmė sąlyginai maža, tačiau, net bandant simuliaciją atlikti su panašaus aukščio ir greitesnėmis bangomis rezultatai buvo panašūs, tad galima daryti išvadą, kad laivapriekio forma yra pakankamai aptaki.

Slemingas taip pat gali įvykti į aukštesnę korpuso dalį. Analizuojant slemingo poveikį katamarano tipo laivams buvo pastebėta, kad slemingas dažnai vyksta į konstrukciją, jungiančią abu korpusus. Tačiau šio katamarano atveju, dėl pakankamai išsikišusių apatinių korpuso dalių, slemingo metu aukštesnė korpuso dalis iškyla dar prieš bangai atsimušant į ją. Po laivapriekio išnirimo iš vandens laivapriekis pradeda kristi. Pirmiausia į vandenį atsimuša apatinė korpuso dalis, kurį dėl minėto ilgumo stabdo tolimesnį katamarano diferento kampo kitimą.



8 pav. Devintas matuojamasis taškas laivo korpusė

Aukščiau pateiktame paveiksle (8 pav.) žaliai pažymėtas taškas, kurio apkrovą galima matyti 7 paveiksle pavaizduoto grafiko devintoje (9:pressure (Pa)) kreivėje. Galima matyti, jog šio taško apkrova pati didžiausia. Šio taško regionas bus naudojamas tolimesniuose struktūros skaičiavimuose norint iširti sukuriamos apkrovos įtaką laivo korpuso konstrukcijai. Šiame taške tolimesnėje simuliacijoje bus uždedama išskirstyta hidrostatinė apkrova, kurios maksimali reikšmė – 23kPa.

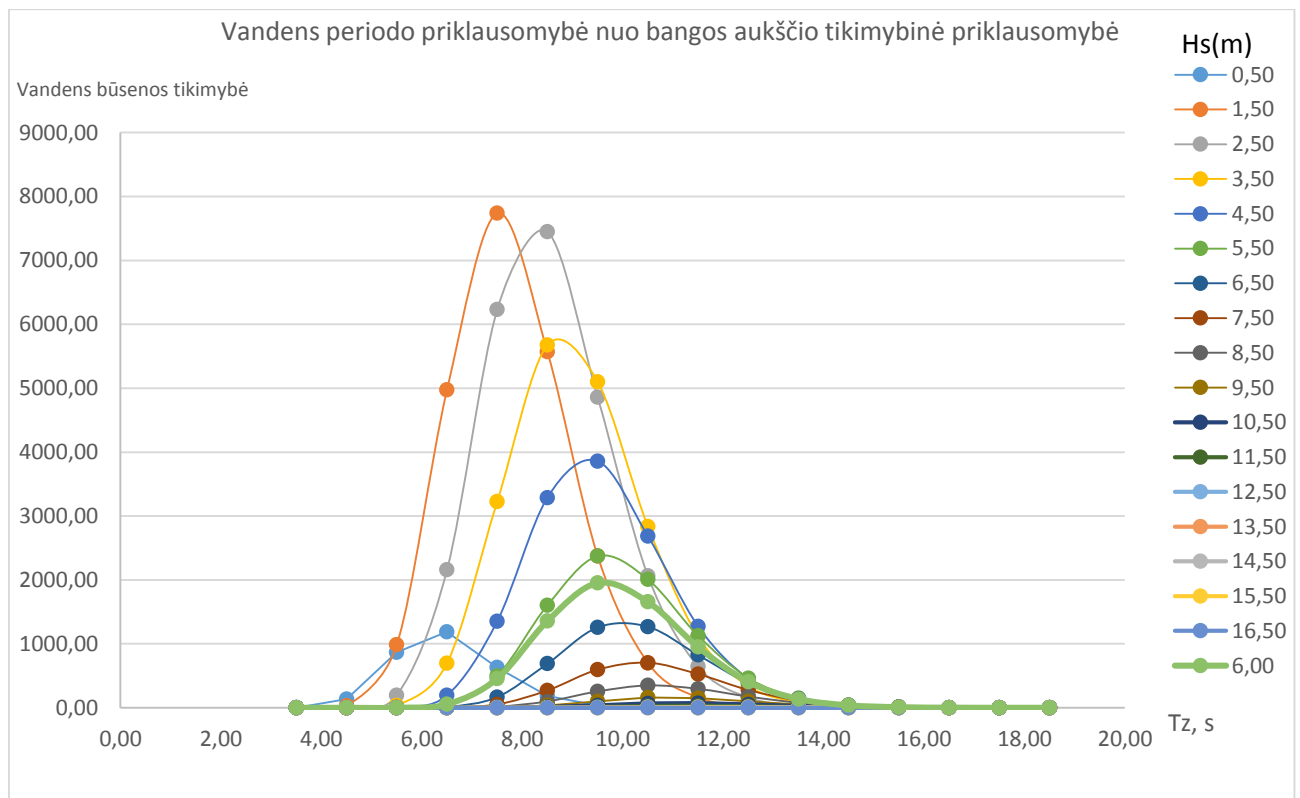
4.2. Antrasis eksperimentas

Antrasis eksperimentas atliekamas remiantis katamarano „Mintis“ pirmaisiais bandymais jūroje, kurių metu jūros bangavimas siekė iki 6 metrų aukščio bangas. Šio bangavimo metu slemingo jėga veikė katamarano tilto konstrukciją – tai yra konstrukcija, jungianti du katamarano korpusus esančius iš šonų. Antrasis eksperimentas atliktas siekiant nustatyti slemingo apkrovą konstrukcijai esant 6 metrų bangavimui Baltijos jūroje. Kadangi apatinė konstrukcijos dalis yra pakankamai aptaki,

o į aptakius paviršius hidrodinaminiai bangų smūgiai neturi tokios didelės įtakos kaip smūgiai į plokščią paviršių, slemingas į katamarano tilto konstrukciją yra galimai pavojingesnis. Antrasis eksperimentas skirtas nustatyti galimas slemingo apkrovas į tilto konstrukciją, bei palyginti kylio dalyje pasikeitusias apkrovas padidėjus bangavimui iki 6 metrų. Dauguma eksperimento parametrų bus paimami iš pirmojo eksperimento jau rastų duomenų.

4.2.1. Bangos parametrų ir Flow-3D parametrų nustatymas

Eksperimento simuliacijos parametrai atitinkamai nustatomi analogiškai kaip ir pirmajame eksperimente. Tačiau pasikeičia bangų aukštis bei periodas. Analogiškai, kaip ir pirmajame eksperimente, pagal IACS pateiktus Atlanto vandenyno šiaurinės dalies bangavimo duomenis, sudarome grafiką tam, kad rastume bangos periodą, kai bangavimas siekia 6 metrus.

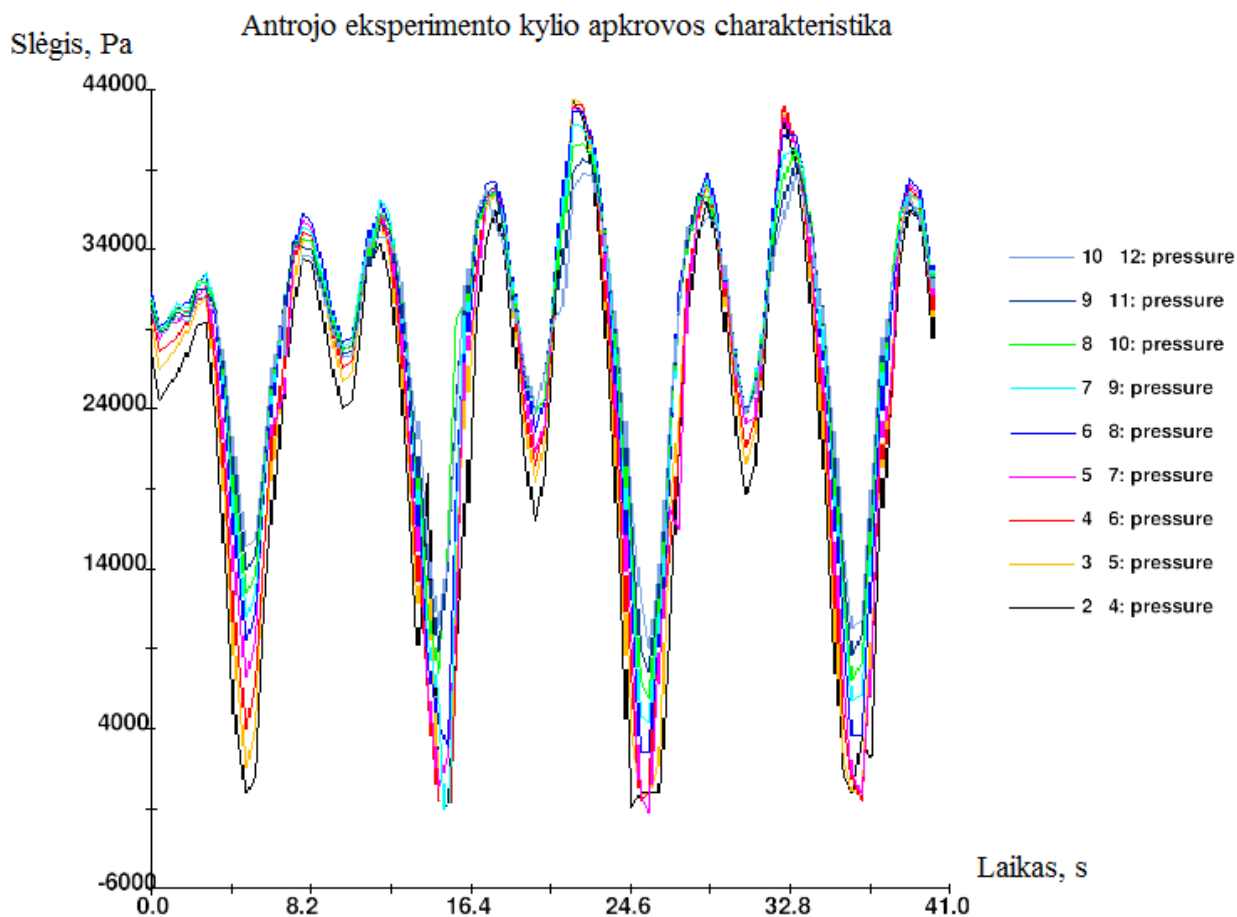


9 pav. Bangos periodo ir bangos aukščio tikimybinė priklausomybė (antrasis eksperimentas)

Iš devintame paveiksle pavaizduoto grafiko matyti, kad dažniausiai pasitaikantis bangų periodas esant 6 metrų bangavimui $T_z = 10$ s. Flow-3D nustatymuose duomenys iš pirmosios simuliacijos paliekami tie patys, pakeičiamas tik bangos periodo rodiklis – 10 s ir bangos aukštis 6 m. Panaikinamas papildomas tikslesnis tinklėlis laivapriekio kylio dalyje, bei padidinamas baigtinių elementų skaičius iki 1000000.

4.2.2. Flow-3D antrojo eksperimento atlikimas

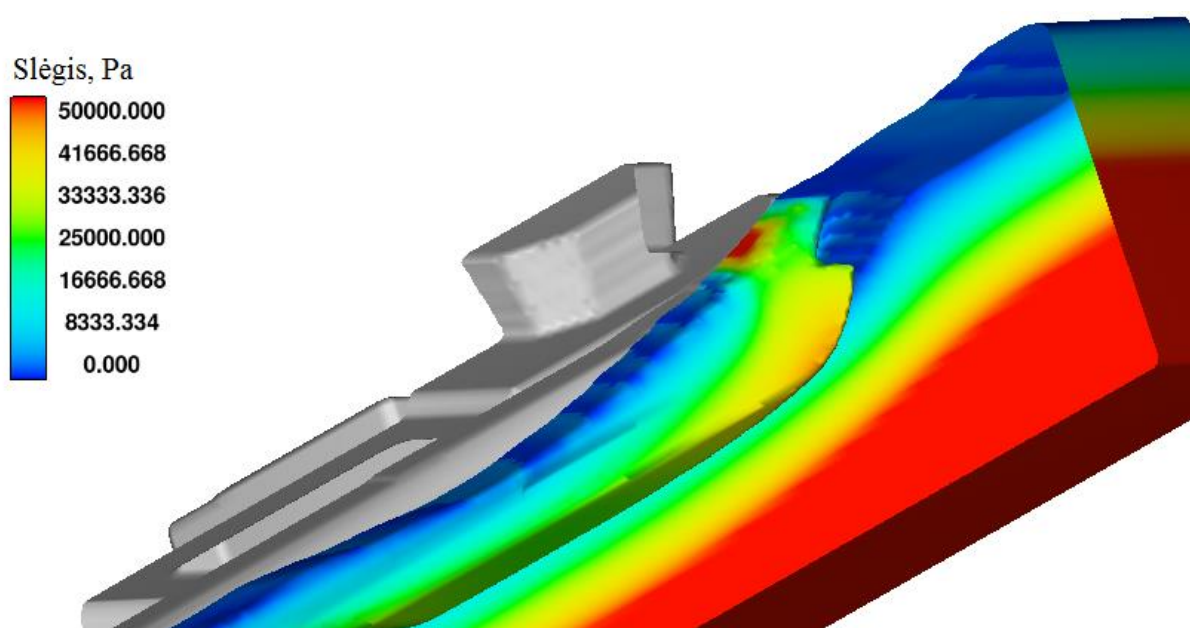
Antrojo eksperimento metu atliekamos simuliacijos trukmė – 40 sekundžių. Šio eksperimento metu simuliacija nedalinama į dvi atskiras dalis, kai antroje dalyje simuliacija atliekama didesniu tinkleliu, kadangi tiriama tilto forma mažiau įmantri, tad atliekama viena simuliacija. Taip pat nesudaromas papildomas tinklelis tilto konstrukcijai. Simuliacijai atlikti tiesiog pasirenkamas didesnis elementų skaičius. Antrajame eksperimente vykstančioje simuliacijoje papildomi matavimo taškai ant katamarano tilto nenustatomi, kadangi priešingai nei kylio dalyje, apkrova yra smūginė momentinė, ir smūgio apkrovos grafiko atvaizduoti netikslinga, kadangi grafike bus atvaizduojamas tik smūgio reikšmės šuolis ir staigus kritimas.



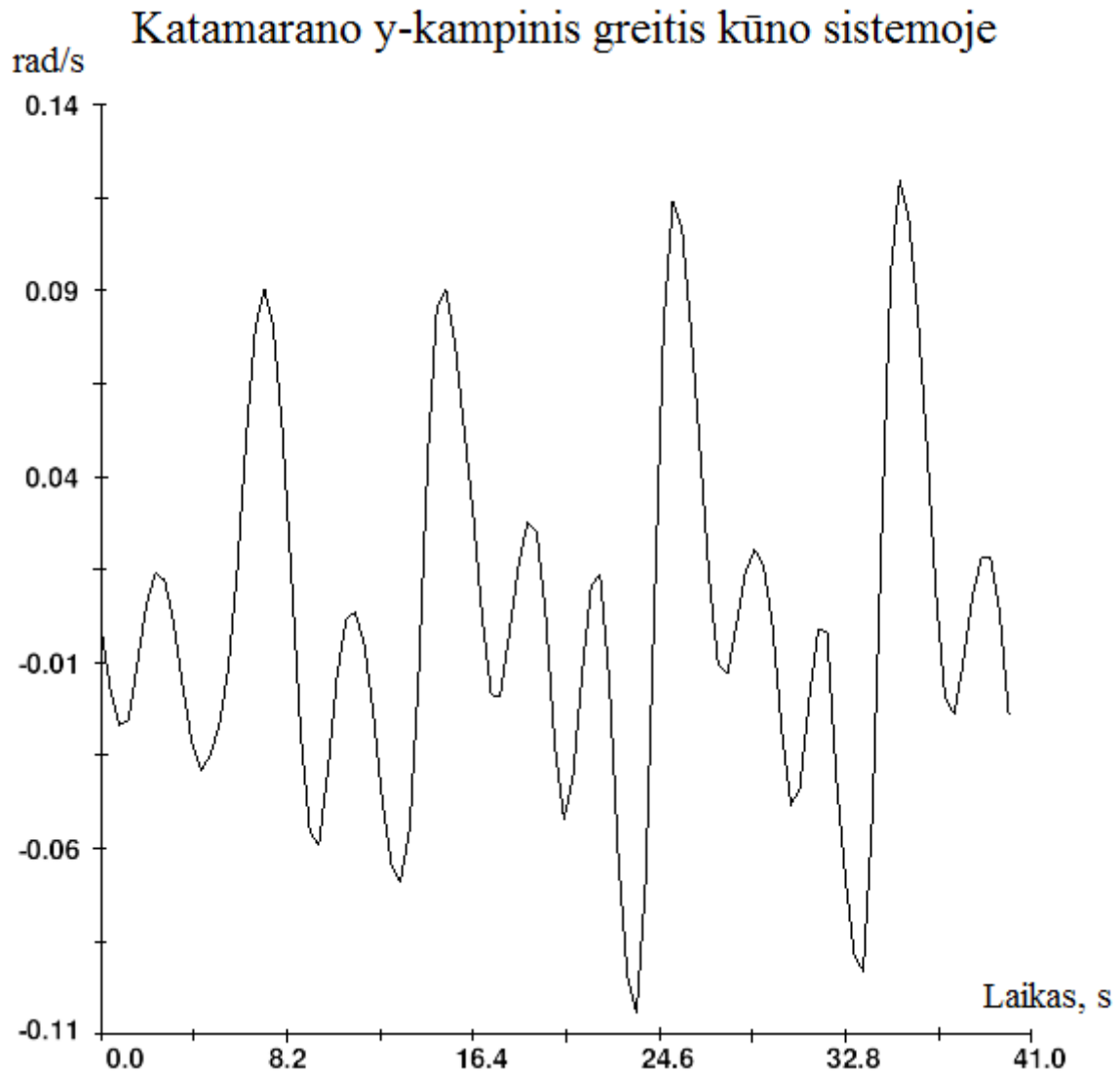
10 pav. Slemingo apkrovos laivapriekiui esant 6 m bangavimui

Atlikus antrojo eksperimento simuliaciją gaunamas laivapriekio apkrovos kitimas bėgant laikui. Aukščiau pateikiamas grafike (žr. 10 pav.) matyti slemingo apkrova katamarano laivapriekiui keičiantis laikui, kai vyksta 6 metrų bangavimas ir bangoms suteikiamas papildomas 3 m/s greitis,

nukreiptas į katamaraną. Laivapriekio apatinės dalies slėmingas, vykstant bangavimui, pasiekia iki 43 kPa, kai tuo tarpu esant 4 m bangavimui buvo pasiekta 23 kPa apkrova. Apkrova padidėjo beveik dvigubai, taip pat pasikeitė taškas, kuriame fiksuojamas maksimalus apkrovimas (iš 9 taško į 5-6 taškus). Tai reiškia, kad padidėjus bangavimui, buvo pažeidžiama labiau priekinė laivapriekio dalis. Antrojo eksperimento metu gauta apkrovos charakteristikos forma išlieka panašios formos kaip ir pirmajame eksperimente – du apkrovos šuoliai per ciklą, tačiau atkarpoje tarp šių apkrovų matomas staigesnis kreivių kilimas ir kritimas. Pirmojo apkrovos šuolio reikšmė mažesnė nei antrojo, tai reiškia kad bangos atsimušimo ir laivapriekio iškėlimo momentu apkrova yra mažesnė nei tuo momentu, kai laivapriekis krisdamas trenkiasi į vandenį. Tačiau 6 metrų bangavimo metu, slėmingo didžiausia apkrova susidarė ne laivapriekio kylio dalyje, o ties laivo tilto konstrukcija kaip ir tikėtasi. Smūgio metu, išsiskirsčiusi apkrova siekia 50 kPa. Vizualiai tai matoma 11 paveiksle. Toliau reikalinga ištirti, kurios konstrukcijos dalys yra labiausiai pažeidžiamos šio bangavimo metu.



11 pav. Slėmingas esant 6 m bangavimui



12 pav. Diferento kampo kitimas slemingo metu (antrasis eksperimentas)

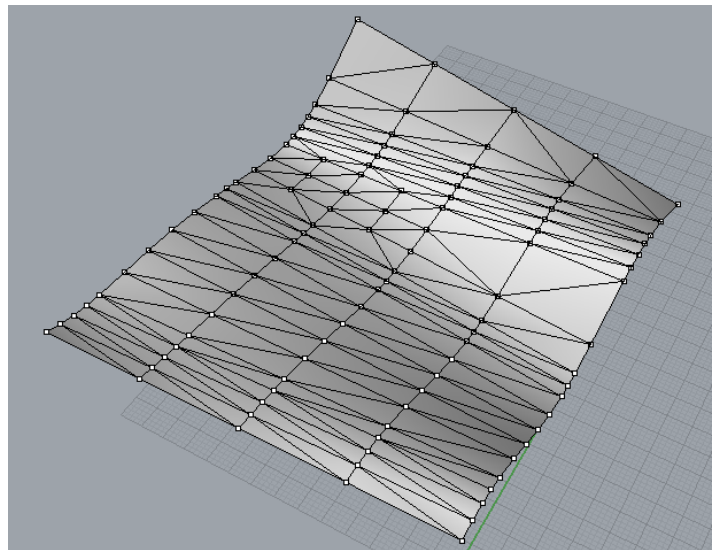
Aukščiau pateiktame grafike (žr. 12 pav.) galime matyti katamarano kylinio supimosi charakteristiką antrojo eksperimento metu, kai bangos buvo 6 metrų, o bangų periodas – 10 sekundžių. Iš grafiko (12 pav.) matome, kad katamaranas, judėdamas pagal bangas, po smūgio į vandenį dar pasisupa ant nueinančios bangos du kartus. Tada laivapriekis vėl pradėdamas kelti ateinančios bangos. Didžiausias diferento kampo greičio kitimas vykta laivapriekiui kylant aukštyn, kampinis greitis pakyla iki $0,11 \text{ rad/s}$, o laivaprekiui krintant žemyn reikšmė nukrinta iki $-0,10 \text{ rad/s}$.

V. SLEMINGO MATEMATINIŲ EKSPERIMENTŲ REZULTATŲ INTEGRAVIMAS IR BENDRO MATEMATINIO EKSPERIMENTO ATLIKIMAS

Atlikus Flow-3D hidrodinaminius slemingo eksperimentus ir gavus atitinkamas apkrovos reikšmes, reikalinga sukurti katamarano struktūros atitinkamus laivapriekio modelius, kurie bus baigtiniu elementų metodu apskaičiuojami ANSYS programoje. Šiam tikslui iš darbo vadovo buvo gauta dalis laivo modelio viename .wrl faile (*Angl. „Virtual Reality Modeling Language“* – virtualios realybės modeliavimo kalba). Tai trijų dimensijų failas, kuriame aprašoma vektorių informacija, iš kurios yra sudaryti 3D paviršiai. Šį failą sudarė 10 tūkst. atskirų konstrukcijos elementų, su 1 mln. „mesh“ paviršių. Norint atlikti struktūros stiprumo skaičiavimus ir sudaryti atitinkamą modelį reikalinga supaprastinti katamarano modelį. Buvo išskirta laivapriekio dalis, rankiniu būdu atrinktos smulkios ir simuliaciją apkraunančios detalės, tokios kaip varžtai ar rankenėlės ir tt. Tačiau nuspręsta palikti daugumą su pačia laivo struktūra nesusijusių elementų, tokių kaip laivapriekio pavairavimo variklis, vamzdžiai, kopėčios ir kiti didesni elementai. Atitinkamai reikalinga išskirti katamarano korpuso konstrukcijos tilto dalį ir analogiškai sudaryti 3D modelį.

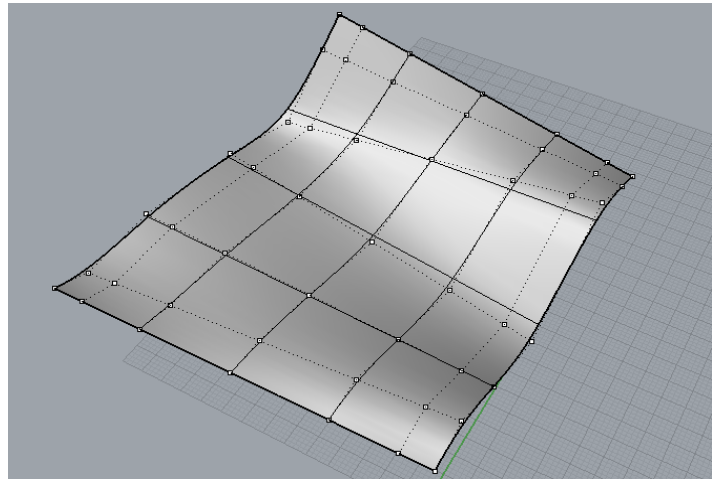
5.1. Paviršių sudarymas ir failo konvertavimas

Iš darbo vadovo gautas „.wrl“ failas yra redaguojamas Rhinoceros programa, kuri naudojama profesionaliam darbui su paviršiais. Ši programa populiari atliekant korpuso paviršiaus modeliavimo darbus. „.wrl“ failas sudarytas iš „mesh“ (žr. 13 pav.) paviršių, tai yra, trimis taškais apibrėžtas plokščias paviršius. „mesh“ objektų trūkumai: sunku dirbti norint koreguoti visą kūną, teoriškai neįmanoma gauti apvalių formų, didelis taškų skaičius, kuris apkrauna programą. Pranašumai: galima išgauti bet kokią neapvalią kūno formą, lengva koreguoti ir dirbti, veikia su daugybe programų, galimybė nesunkiai sujungti ir atskirti paviršius. Kiekviena plokštuma programoje skaičiuojama kaip atskiras paviršius. Dažniausiai naudojama modeliuojant tikslumo nereikalaujančius 3D modelius.



13 pav. „Mesh“ objekto paviršius

„Nurbs“ (žr. 14 pav.) paviršiai yra programos aprašomi matematiškai, šie paviršiai sudaryti iš „nurbs“ izolinijų, nuo šių linijų skaičiaus priklauso paviršiaus tikslumas. Izolinijos dažniausiai žymimos U ir V, jos išsidėsčiusios statmenai viena kitai. Izolinijų parametruose galima keisti jų priklausomybę tarp taškų (*Angl. degree*), tai yra, kiek gretimų taškų įtakoja paviršiaus išlenkimą. „Nurbs“ paviršiai savyje negali turėti kampų. Pranašumai:



14 pav. „Nurbs“ paviršius

didelis tikslumas, nesudėtingas viso paviršiaus koregavimas, didinant ir mažinant paviršių išlaikomas tikslumas. Mažai apkraunamas kompiuteris, failai užima mažai vietos.

Pagrindinė priežastis, kodėl reikalinga perdaryti laivo modelį iš „mesh“ į „nurbs“ paviršius yra ta, kad atliekant skaičiavimus „mesh“ paviršių plokštumos kiekviena priimama kaip atskiras kūnas. Rhinoceros programa leidžia „mesh“ kūnus perdaryti į „polisurface“ kūnus (daugelio paviršių junginys), tačiau perdaryti kūnai yra tuščiaviduriai. Reikalinga perdaryti „mesh“ detales į vientisus paviršius kurie atspindėtų „mesh“ kūną. Šiam tikslui naudojama „Patch“ komanda kuri iš „mesh“ kūno sukuria atitinkamą „nurbs“ paviršių, išlenktą pagal detalės formą per „mesh“ detalės pjūvį, tačiau neturi detalės formos, gaunamas tik lenktas keturkampis paviršius. Kad išgauti detalės formą pagal „mesh“ detalę, sukuriame „mesh“ detalės kontūrą pasinaudojant `_MeshOutline` funkcija. Pagal kontūro linijas apriname anksčiau kurtą „nurbs“ paviršių. Gautas paviršius atitinka „mesh“ detalės pjūvį. Kadangi modeliuojamuose katamarano korpuso struktūros modeliuose yra apytiksliai po 300 elementų, kuriuos reikia perdaryti iš „mesh“ į „nurbs“ paviršius, patogiu susikurti Rhinoceros makroprogramą (*Angl. macro*), kuri atliks reikalingus žingsnius sumažindama žmogui sudaromą mechaninį darbą.

Sudaryta makroprograma:

```
_RebuildMeshNormals  
_pause  
_Invert  
_Hide  
_pause  
_invert  
_pause
```

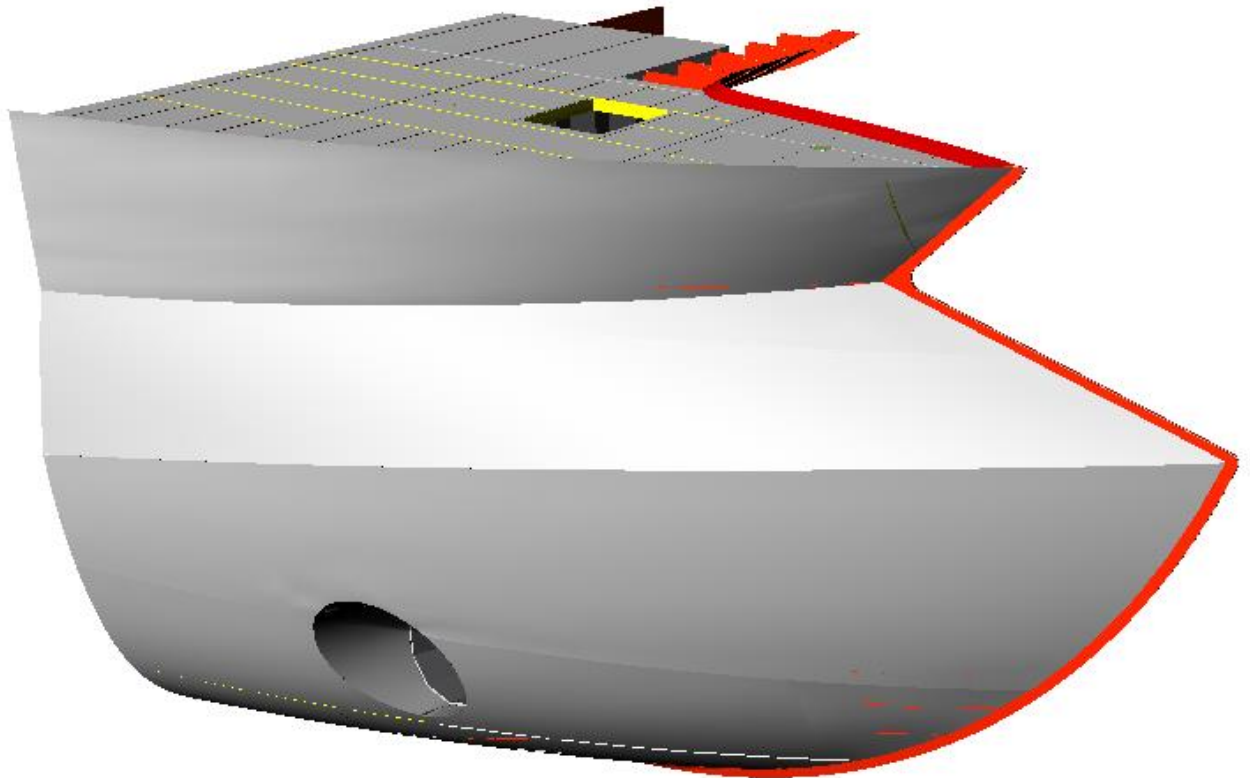
```
_ChangeToCurrentLayer
_Patch
_MeshOutline
_trim
_pause
_pause
_enter
_pause
_SelCrv
_delete
_show
```

Rhinoceros programa sudaryti „nurbs“ paviršiai perdaromi (*Angl. „Rebuild“*) su 2,5 mm tolerancija, tam kad būtų sumažinamas paviršių sudarančių izolinijų skaičius, taip pat perdaromi ir paviršių kraštai su 2,5 mm tolerancija.

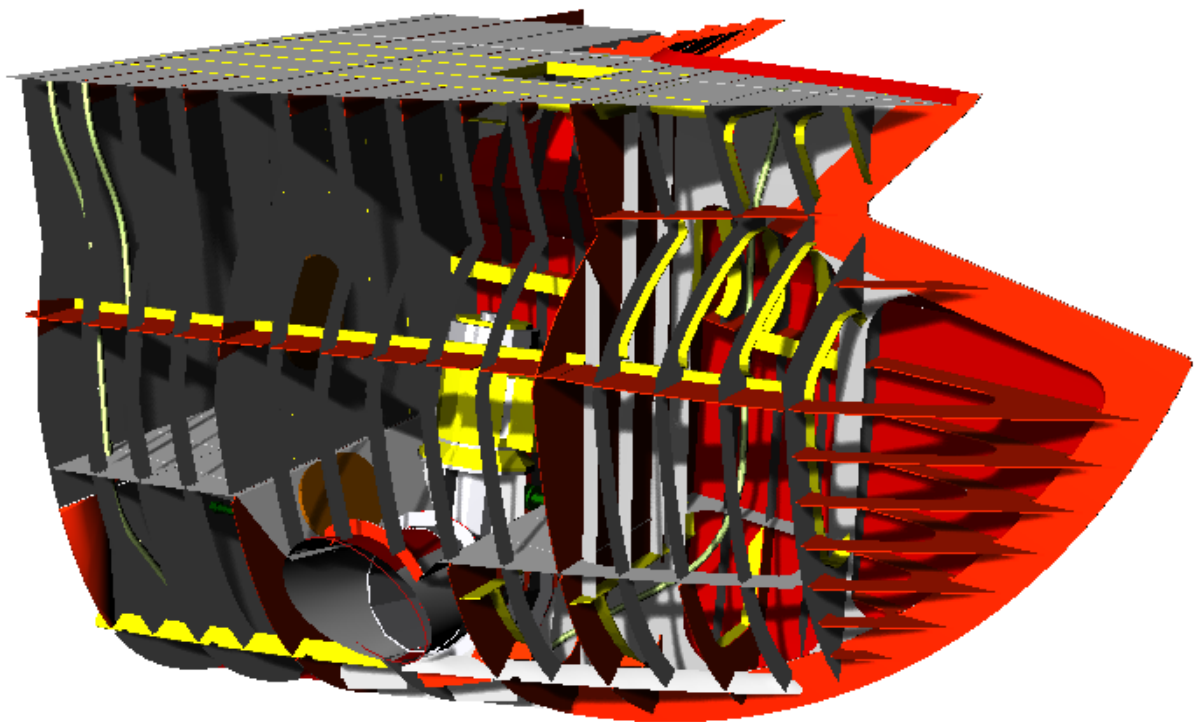
5.2. Katamarano struktūros modeliai abiem eksperimentams

Rhinoceros programa sudaryti „nurbs“ paviršiai buvo supaprastinti su atitinkama tolerancija, šitaip nežymiai sumažinant sudarytų paviršių detalumą, tačiau duomenų kiekis nusakantis paviršių parametrus sumažinamas iki trisdešimties kartų. Sutvarkyti 3D laivapriekio ir tilto modeliai yra sugrupuojami atskirais struktūros elementų tipais ir priskiriami atitinkamiems sluoksniams (*Angl. „layer“*). Šitaip importuojant geometriją į ANSYS programą išvengiama didelis vienu sykiu įkeliamų elementų skaičius, kuris išdalinamas į dalis. Taip pat, esant geometrijos klaidoms, yra lengviau nustatyti kurie elementai brokuoti. Paviršiai sudaryti Rhinoceros programa atskirais struktūros elementų sluoksniais eksportuoti „.sat“ failo formatu (3D formatas, kuris atpažįstamas daugybėje programų, naudojamas 3D cad modeliams sudaryti ir eksportuoti). Sudaryti modeliai pakankamai detalūs atlikti korpuso stiprumo skaičiavimus, nustatyti ar struktūra pakankamai tvirta. Sekančiame žingsnyje šie failai yra importuojami į ANSYS programą, tam kad būtų galima sudaryti katamarano laivapriekio ir tilto konstrukcijos modelio geometriją. Sudaryti modeliai yra pavaizduoti žemiau pateiktuose paveiksluose.

15 ir 16 paveiksluose pavaizduoti sudaryti katamarano laivapriečio modeliai.

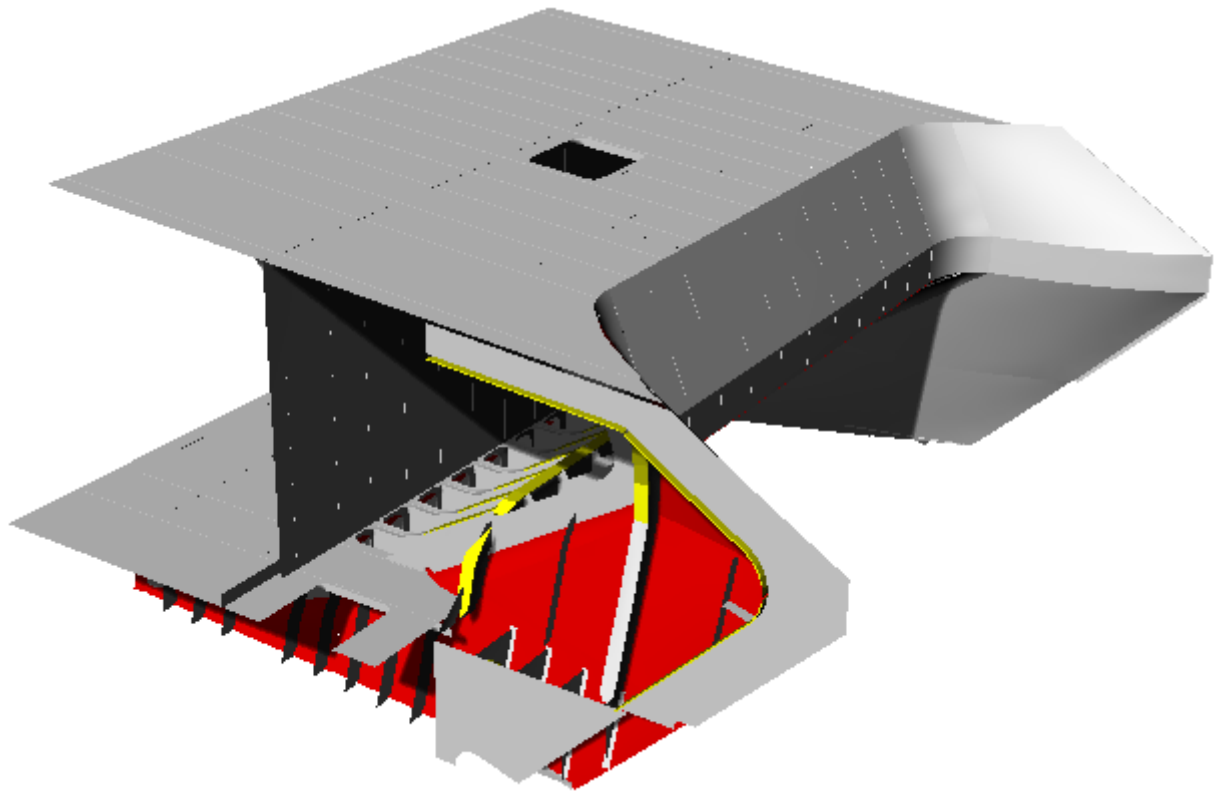


15 pav. Katamarano laivapriečio apkalos modelio vaizdas

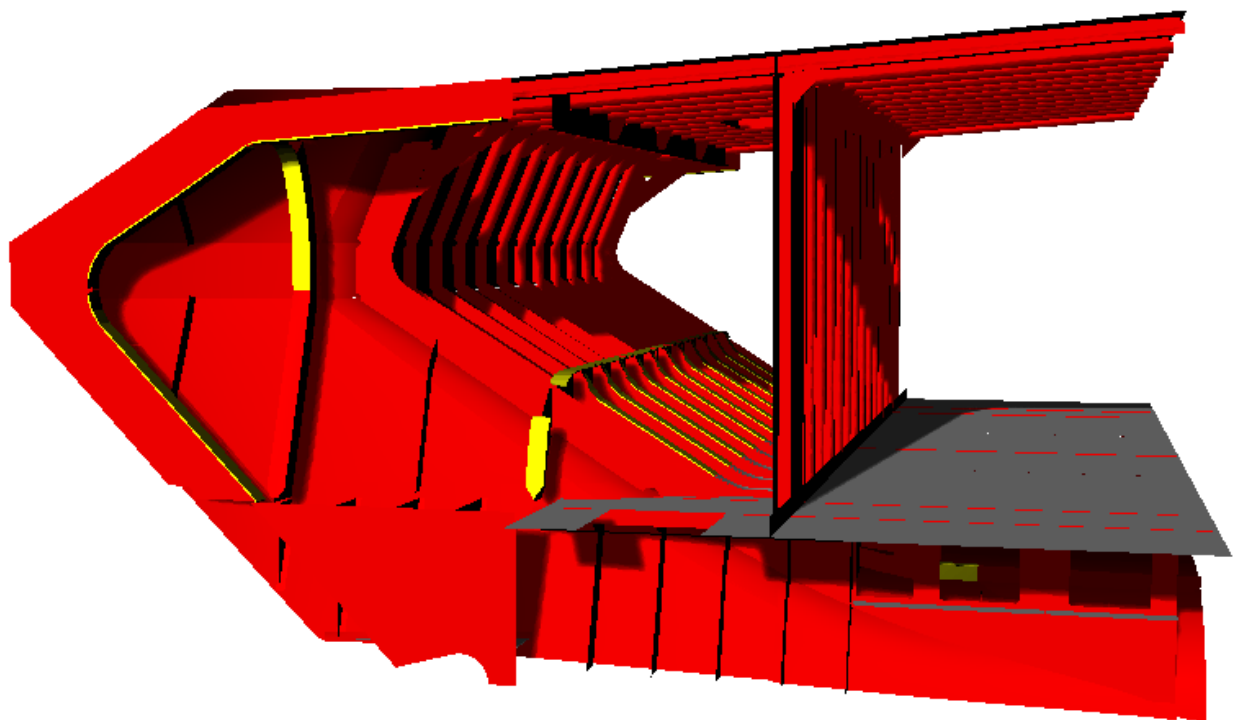


16 pav. Katamarano laivapriečio konstrukcijos modelio vaizdas

17 ir 18 paveiksluose pavaizduoti sudaryti katamarano tilto modeliai.



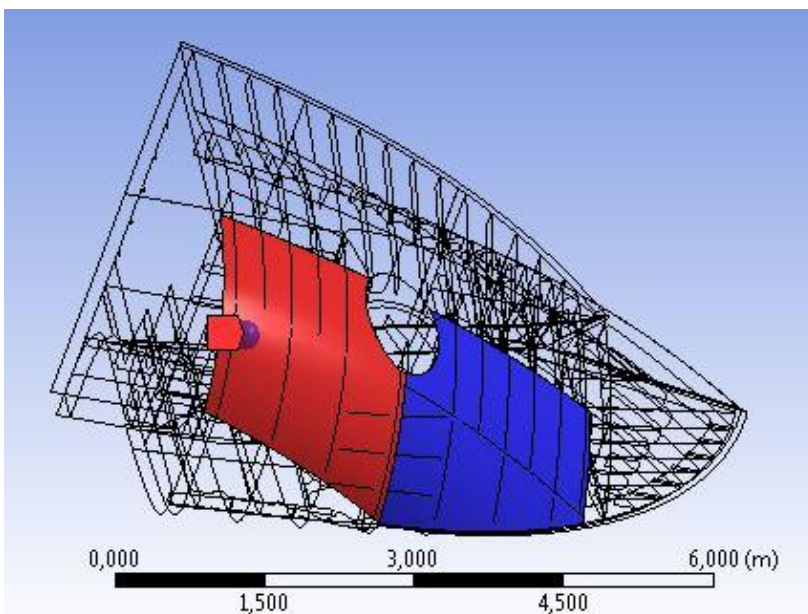
17 pav. Katamarano tilto išorinės konstrukcijos vaizdas



18 pav. Katamarano tilto konstrukcijos vaizdas

Toliau laivo modelis yra dalimis įkeliamas į programą ANSYS. Programa atlieka skaičiavimus baigtinių elementų metodu, tam tikrose ribose aproksimuotai apskaičiuoja uždavinį naudojant matricas. Kūnai yra sudalinami į mažesnes dalis - baigtinius elementus. Šitokio sudalinimo pranašumas yra didesnis tikslumas sudėtingoje geometrijoje. ANSYS programa turi labai stabiliai veikiančius skaičiavimo ir dalinimo (*Angl. „meshing“*) variklius. Programa „nenulūžta“ kai netinkamai suvesti parametrai, ar netinkamai sudarytas modelis. Ši programa labai plačiai naudojama mokslinių tyrimų srityje, kadangi turi įvairius programos modulius, tokius kaip struktūros, skysčių, elektros, magnetizmo ir tt. Kitas programos privalumas – tai galimybė iš vienos simuliacijos duomenis įkelti į kitą simuliaciją. Tačiau vienas iš didžiausių programos ANSYS minusų – tai vartotojo sąsaja, kuri yra nepatogi dirbti, nepatogu modeliuoti 3D objektus. Dėl šios priežasties ANSYS buvo naudojamas tik skaičiavimams importavus failus, o failų redagavimas atliekamas Rhinoceros programa.

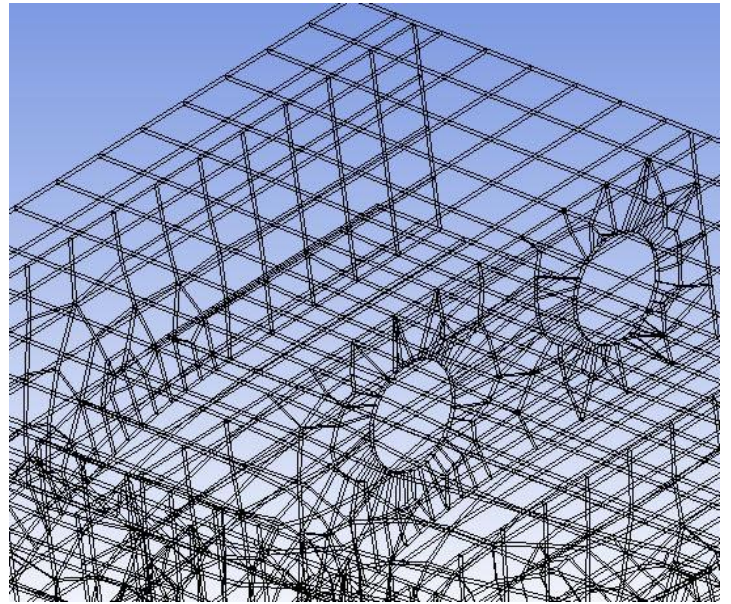
Į ANSYS programą importuoti geometrijos failai visų pirma patikrinami ir apdorojami. Nurodomas importuojamos geometrijos mastelis ir paviršių parametrai. Parenkama medžiaga – struktūrinis plienas A36, apkalos plieno storis 8 milimetrai. Sudaromi ryšiai tarp atskirų struktūros elementų parenkant toleranciją ir elementų tarpusavio ryšių tipą, šiuo atveju plokštuma/plokštuma, kraštas/plokštuma ir



19 pav. Elementų tarpusavio ryšys

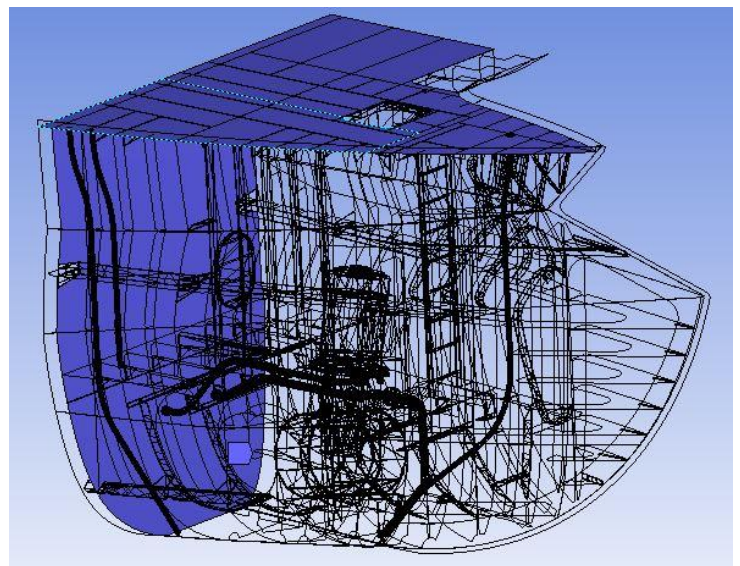
kraštas/kraštas. Šitai ANSYS sugeneruoja sąveiką tarp elementų. Dviejų apkalos elementų karštų tarpusavio sąveika pavaizduota 19 paveiksle. Šis žingsnis reikalingas tam, kad elementai turėtų atramą ir perduotų informaciją gretimiems surištiems elementams.

Sudarius ir sujungus geometriją atitinkamais ryšiais, elementai yra sudalinami į baigtinius elementus, kurių mažiausias dydis yra 0,021 m, o didžiausias elementas – 0,105 m. Elementų dydis priklauso nuo skaičiuojamos struktūros dydžio ir norimo tikslumo. Parinktas mastelis pakankamai tikslus norint nustatyti ir ištirti problemines vietas. Tinklas sudarytas iš keturkampių elementų, kai tuo tarpu sudėtingesnės vietos, kaip matyti 20 paveiksle, sudarytos iš mažesnių trikampių elementų. Mažiausių ir didžiausių elementų santykis yra 5:1.



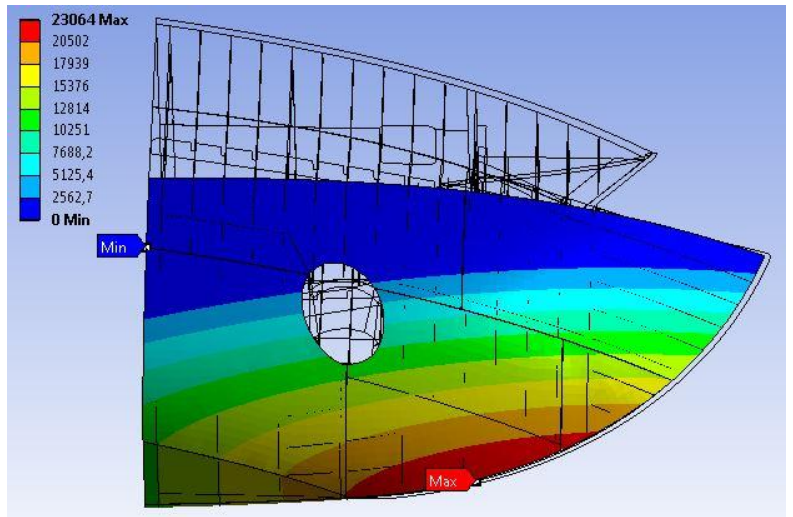
20 pav. Baigtinio elemento dydis struktūroje

Sudarius elementų tinklę reikalinga apibrėžti struktūros elgesį simuliacijos metu. Nurodoma, koku būdu kurie elementai yra įtvirtinti struktūroje. Šiuo atveju pasirenkamas pilnas elementų įtvirtinimas visais laisvės laipsniais, įtvirtinami tik elementai, kurie jungiasi su kitais laivo elementais. Įtvirtinama laivapriekio modelio pertvara ir virš laivapriekio esantis denis. Šie elementai 21 paveiksle pažymėti mėlyna spalva. Visi kiti elementai nėra įtvirtinami ir yra laikomi tik prieš tai aprašytais ryšiais tarp skirtingų elementų. Šie elementai, priklausomai nuo geometrijos ir baigtinių elementų pasiskirstymo, pasiskirsto sukuriamas apkrovas ir lenkimo momentus.



21 pav. Struktūros įtvirtinimas simuliacijoje

Sekantis žingsnis sudarant simuliaciją – tai apkrovos parinkimas ir nustatymas (žr. 22 pav.). Šiuo atveju, kadangi apkrova yra išskirstyta ant laivapriekio skirtingų elementų, pasirenkama hidrostatinė apkrova laivo korpuso elementams. Apkrovai pasirenkami tik apatiniai korpuso elementai, kadangi būtent ten slemingo smūgio metu susidaro išskirstyta apkrova.

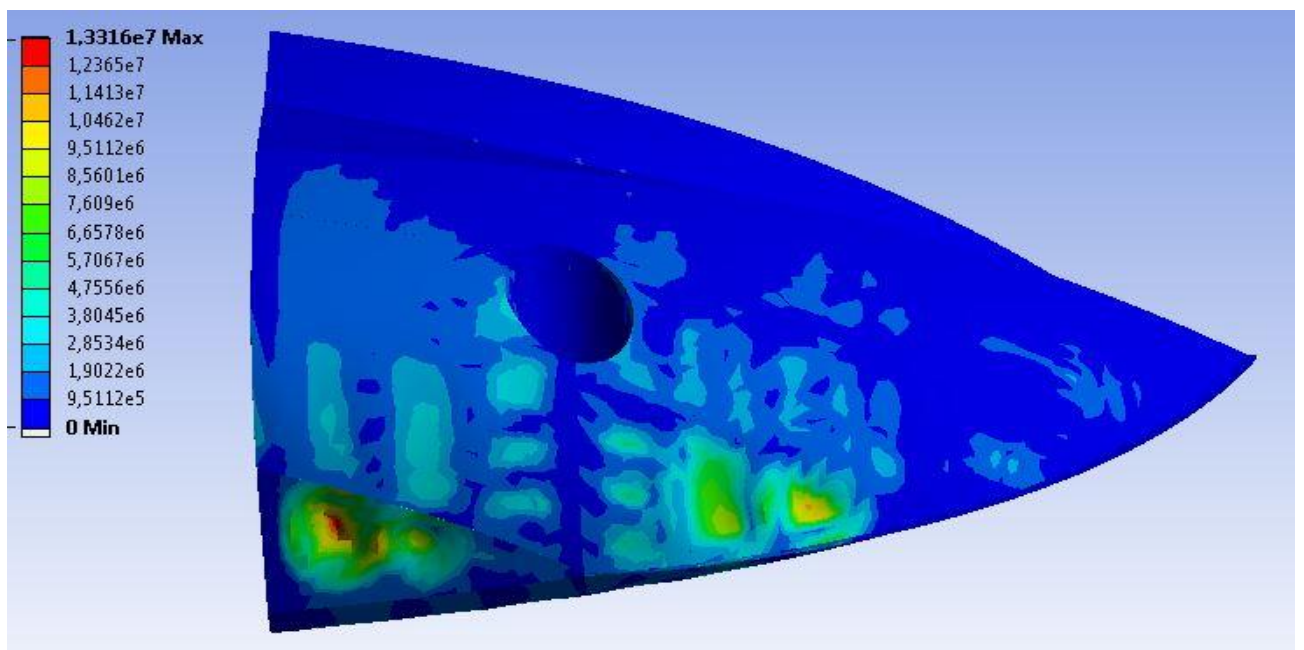


22 pav. Struktūros apkrova simuliacijoje

Skysčio tankis pasirinktas 1027 kg/m^3 , hidrostatinės apkrovos vektorius parinktas šiek tiek nukreiptas kampu nei horizontas, kad būtų atspindima smūgio vieta ir apkrovos išsiskirstymas pagal Flow-3D simuliacijoje gautus rezultatus. Prieš pradedant lieka pasirinkti norimus rezultatus. Šiuo atveju norint patikrinti ar korpuso struktūra pakankamai tvirta, pakanka rezultatu pasirinkti išskirstytą apkrovą (*Angl. Stress*).

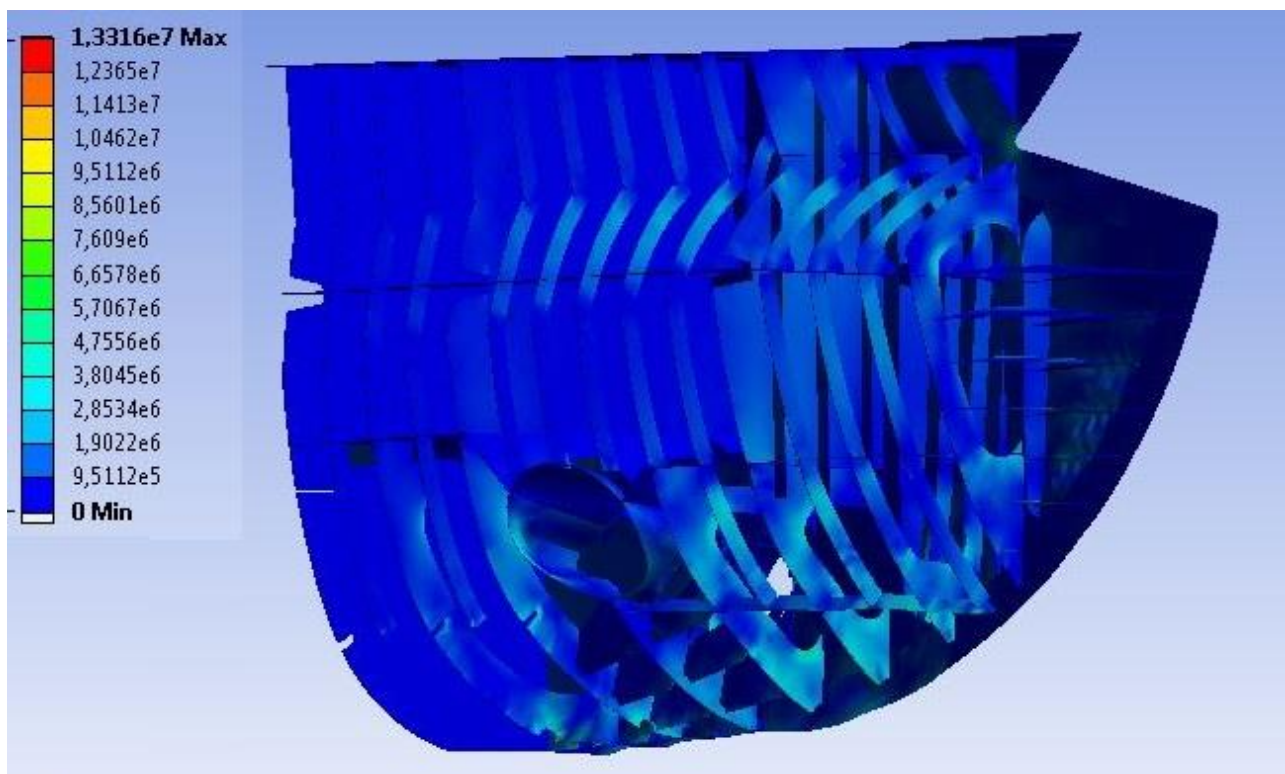
VI. MATEMATINIO EKSPERIMENTO REZULTATŲ APIBENDRINIMAS

ANSYS programa buvo atlikti du katamarano konstrukcijos apkrovos skaičiavimai, naudojant Flow-3D programą apskaičiuotos slemingo apkrovos reikšmės, esant 4 metrų bangavimui; 6 metrų bangavimui. Pirmieji konstrukcijos skaičiavimai ANSYS programa buvo atlikti naudojant pirmojo Flow-3D eksperimento gautus apkrovos rezultatus. Atlikus skaičiavimus gaunamos išskirstytos apkrovos reikšmės konstrukcijai, kurios siekia iki 13,3 MPa. Labiausiai konstrukcijos apkraunama vieta, kaip matyti 23 paveiksle – tai po laivapriekio kylio esanti plokščioji apkalos dalis. Šis rajonas slemingo metu taip pat buvo labiausiai apkrautas hidrodinaminių smūgių metu atliekant simuliaciją programa Flow-3D. Šitokia smūginė vienkartinė apkrova konstrukcijai nėra pavojinga kadangi struktūrinio plieno plastinės deformacijos riba yra apie $250,0 \text{ N/mm}^2$ arba $250,0 \text{ MPa}$ priklausomai nuo plieno lydinio rūšies. Plastinė deformacija, tai metalo deformacija, kurios pakitimai po apkrovos dingimo negrįžta į pradinę padėtį [34]. Pagal atliktą eksperimentą 4 metrų bangavimas neturi didelės įtakos laivo korpuso priekinės dalies struktūrai skaičiuojant vieno smūgio žalą, tačiau pastovus smūgiavimas į laivapriekį gali turėti ilgalaikės žalos, dėl susidariusio metalo nuovargio. Pastovūs smūgiai, nors ir nedideli per laiką gali susilpninti konstrukciją ir pakliuvus į didesnę bangą galimai įvykti konstrukcijos gedimas. Klaipėdos universiteto mokslinis-tiriamasis laivo – katamarano aprašuose teigiama, jog jis gali plaukioti jūroje, kai bangavimas siekia iki 3,5 metro be didesnių pasekmių konstrukcijai. Atlikti skaičiavimai parodo, kad 4 metrų bangavimas taip pat nesukuria didesnės žalos konstrukcijai.



23 pav. Apkalos apkrovos rezultatai (pirmasis eksperimentas)

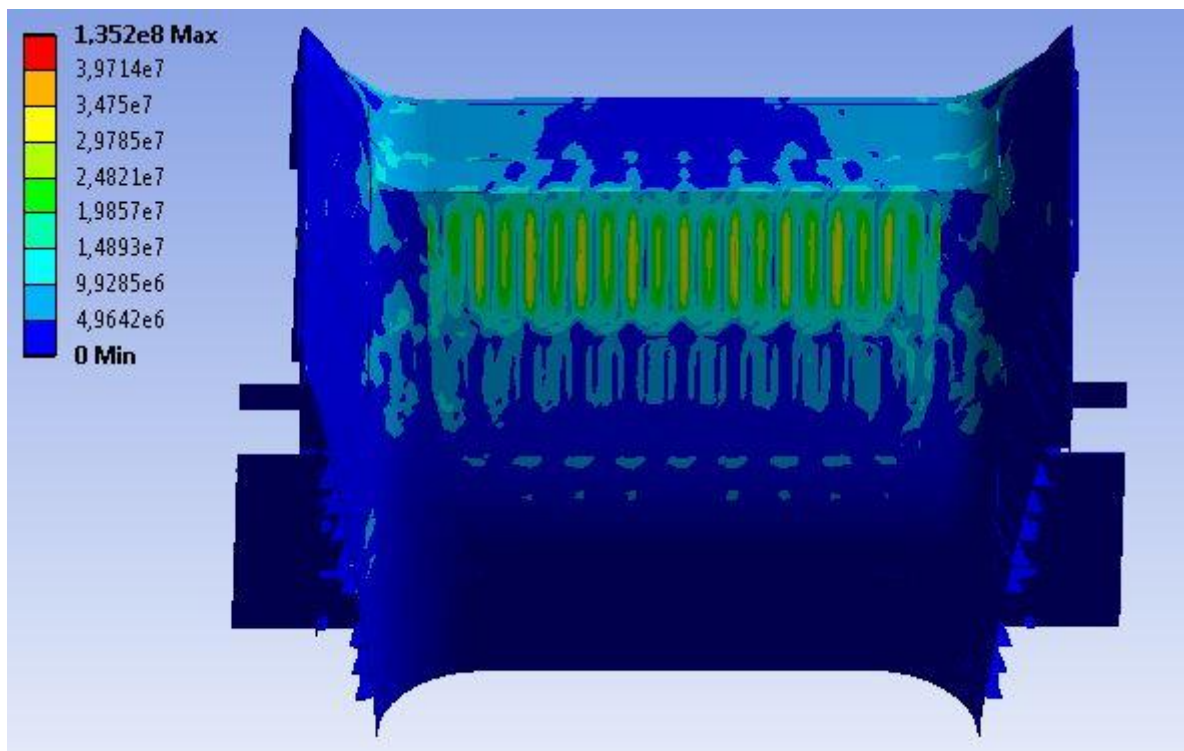
Sekančiame, 24 paveiksle galima matyti katamarano korpuso konstrukciją tomis pačiomis apkrovos sąlygomis, apkrovų rezultatų spalvų skalės maksimumas paliekamas kaip ir 23 paveiksle pateiktoje skalėje tam, kad būtų galima analogiškai palyginti konstrukcijos apkrovas su apkalos apkrovomis. Iš 24 paveikslo matyti, kad apkrovos korpuso konstrukcijai yra sąlyginai mažesnės nei susidariusios apkrovos ant apkalos. Apkrovos katamarano struktūros konstrukcijai siekia iki 4,0 MPa, tai yra daugiau nei tris kartus mažesnės nei apkrovos susidariusios ant apkalos.



24 pav. Struktūros apkrovos rezultatai (pirmasis eksperimentas)

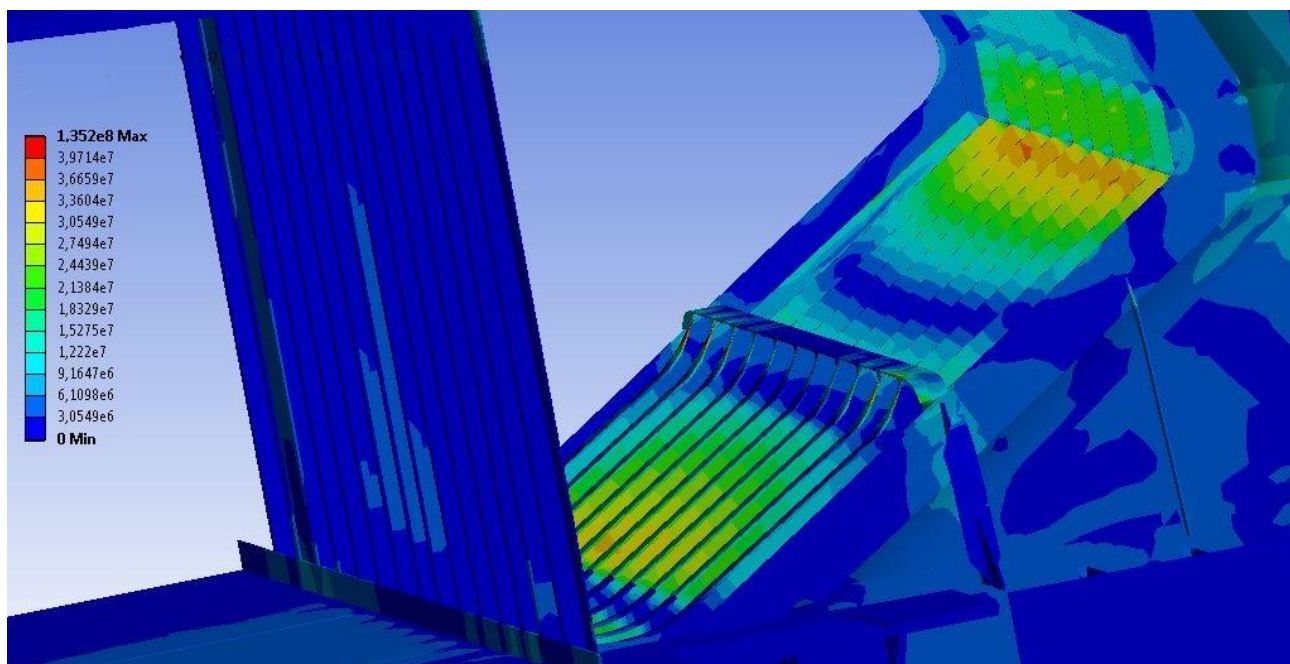
Sekančiuose 25 ir 26paveiksluose pateikiami rezultatai, gauti atlikus antrąjį eksperimentą, kai Flow-3D programoje katamaranas buvo veikiamas 6 metrų aukščio bangomis. Flow-3D simuliacijos gautos apkrovos siekia iki 50 kPa, ši reikšmė buvo panaudota ANSYS programoje, kurios pagalba apskaičiuoti konstrukcijos elementų stiprumai, bei nustatytos labiausiai tikėtinos konstrukcijos pažeidimo vietos.

25 paveiksle matyti, kad didžiausi apkrovimai ant tilto apkalos susidaro rajonuose, esančiuose tarp profilių. Apkrovos ten siekia iki 35 MPa. Šios apkrovos yra beveik tris kartus didesnės nei 4 metrų bangavimo metu laivapriekio kylio dalyje vykstančio slemingo sudarytos apkrovos.



25 pav. Apkalo apkrovos rezultatai (antrasis eksperimentas)

26 paveiksle pavaizduotas apkrovos pasiskirstymas katamarano tilto konstrukcijoje. Iš paveikslo matyti, kad labiausiai apkraunami elementai yra profiliai. Apkrovos siekia iki 40 MPa.



26 pav. 6 metrų bangavimo sukuriamos apkrovos tilto struktūrai

Atlikus visus skaičiavimus matyti, kad didžiausias apkrovas patiria profiliai, pavaizduoti 26 paveiksle. Tai sutampa su tyrimų apžvalgoje rasta informacija, jog profiliai - pirmieji elementai, kurie neatlaikydavo apkrovų sukeliama lenkimo [20]. Laivo eksploatacijos metu po susidūrimo su slemingu, esant sąlygoms, šį rajoną rekomenduojama patikrinti, ar nėra likusių padarinių. Šie profiliai potencialiai bus pirmieji elementai, kurie neatlaikys slemingo metu sukeliama apkrovų.

VI. IŠVADOS IR PASIŪLYMAI

Darbe išanalizuojamos slemingo sukeltos pasekmės KU moksliniam-tiriamajam laivui – katamaranui. Delftship programa sudarytas modelis tinkamas Flow-3D programos simuliacijoms. Taip pat Rhinoceros programa sumodeliuoti du katamarano konstrukcijos modeliai atskiriems struktūros skaičiavimams. Išanalizuotos Baltijos jūros vandens savybės bei galimi bangų aukščiai simuliacijoms. Atlikti du slemingo sukeltų apkrovų skaičiavimo eksperimentai programa Flow-3D programa, kai bangavimas yra 4 m ir 6 m aukščio. Gauti apkrovos rezultatai yra integruojami į ANSYS programą, kurioje atlikti struktūros skaičiavimai. Atlikus ketverias simuliacijas nustatyta, kad:

- Flow-3D programa apskaičiuota, kai Baltijos jūros bangavimas yra 4 metrų aukščio, labiausiai slemingo apkraunama apatinė laivapriekio dalis ties kyliu, apkrovos siekė iki 23 kPa;
- atlikus skaičiavimus programa ANSYS išskirstytos apkrovos reikšmės ant apkalos, ties kyliu siekia iki 13,3 MPa. Katamarano struktūros konstrukcijos apkrovos siekia iki 4,0 MPa, esant 4 metrų bangavimui;
- Flow-3D programa apskaičiuota, kai Baltijos jūros bangavimui esant 6 metrų aukščio, buvo labiausiai slemingo apkraunama katamarano tilto konstrukcija, apkrovos siekė iki 50 kPa. apkrovos apatinėje laivapriekio dalyje ties kylių apkrovos siekė iki 43 kPa;
- atlikus skaičiavimus programa ANSYS, rasta, kad labiausiai apkraunami profilio elementai esanti katamarano tilto konstrukcijoje, apkrovos siekė iki 40 MPa. Tilto konstrukcijos apkalos išskirstyta apkrova siekia iki 35 MPa, kur didžiausios reikšmės susidaro tarp profilio elementų.

Darbas gali būti tęsiamas atliekant katamarano laivagalio slemingo skaičiavimais. Pagal struktūros skaičiavimuose gautas apkrovos reikšmes atlikti metalo nuovargio skaičiavimus, nustatyti konstrukcijos ilgaamžiškumą eksploatuojant slemingo sąlygomis. Įvertinti slemingo sukuriamas vibracijos apkrovas, nustatyti vibracijų įtaką laivo konstrukcijai.

VII. LITERATŪROS ŠALTINIAI

- [1] American Bureau of Shipping. 2013. *Slamming loads and strength assessment for vessels: rekomendacijos*. 39 p.
- [2] Galkus A. 2007. Gėlo ir druskingo vandens cirkuliacijos ypatumai Klaipėdos sąsiauryje ir Kurš marių šiaurinėje dalyje. *Annales Geographicae*, vol. 9 , No. 40, p. 3-16.
- [3] American sailing association. Catamaran Sailing – What’s the Difference? [žiūrėta 2015 m. Balandžio 25 d]. Prieiga per Internetą: <<https://asa.com/news/2013/01/18/catamaran-sailing/>>
- [4] Tarek B., Drid S., Benbouzid M. 2013. Maximum Power Point Tracking Control. Monakas: Grimaldi forum, Konferencija.
- [5] Hamn C., Ching ir Kai Yu. 2008. CFD simulations of wave–current–body interactions. *Computers & Fluids*, No. 38, p. 970-980.
- [6] Zhenju C., Steen S. 2011. Prediction of speed loss of a ship in waves. Hamburgas: Second International Symposium on Marine Propulsors, Konferencija.
- [7] CIIT. 2011. Recommended Procedures - Fresh water and seawater properties. Rio de Janeiro, Konferencija.
- [8] Dessi D., Ciappi E. 2013. Slamming clustering on fast ships: From impact dynamics to global response analysis. *Ocean Engineering*, No. 62, p. 110-122.
- [9] DNV. 2007. Environmental conditions and environmental loads. Det Norske Veritas, Rekomendacijos.
- [10] DNV. 2010. Environmental conditions and environmental loads. Det Norske Veritas, Rekomendacijos.
- [11] Albert E., Davies J. Naval architecture - Ship. *Encyclopedia britannica*. [žiūrėta 2015 Vasario 1 d]. Prieiga per Internetą: <<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/540904/ship/64202/Structural-integrity#ref528258>>
- [12] Greco M., Lugni C. 2012. 3-D seakeeping analysis with water on deck and slamming. *Journal of Fluids and Structures*, No. 33, p. 127-147.
- [13] HELCOM. Baltic sea climate [žiūrėta 2015 Sausio 20 d]. Prieiga per Internetą: <<http://helcom.fi/baltic-sea-trends/environment-fact-sheets/hydrography/wave-climate-in-the-baltic-sea>>
- [14] Institute Finnish meteorological. Wave height records in the Baltic Sea [žiūrėta 2015 Vasario 1 d]. Prieiga per Internetą: <<http://en.ilmatieteenlaitos.fi/wave-height-records-in-the-baltic-sea>>

- [15] Virgin islands property & yacht. Catamarans vs Monohulls, Which is more popular? [žiūrėta 2015 Vasario 1 d]. Prieiga per Internetą: <<http://www.bvipropertyyacht.com/vi-bvi/catamaran/>>
- [16] Tuitman J. T., Theo N., Bosman H. 2013. Local structural response to seakeeping and slamming loads. *Marine Structures*, No. 33, p. 214-237.
- [17] Čerka J. 2009. *Laivo hidroaeromechanika*. Klaipėda : Klaipėdos universiteto leidykla.
- [18] Kapsenberg G. K. 2011. Slamming of ships: where are we now? *Philosophical transaction of a royal society*, No. 369, p. 2892-2919.
- [19] Kapsenberg G. K. 2010. Slamming of ships in waves: where are we now? *Edinburgas: Mathematical challenges and modelling of hydro-elasticity*. Konferencija.
- [20] Khedmati M. R. ir Pedram M. 2014. A numerical investigation into the effects of slamming impulsive loads on the elastic-plastic response of imperfect stiffened aluminium plates *Thin-Walled Structures*, No. 76, p. 118-144.
- [21] Kim J. H. 2015. Comparison of slamming and whipping loads by fully coupled hydroelastic analysis and experimental measuremen. *Journal of Fluidsand Structures*, No. 52, p. 145-165.
- [22] McGinty B. *Continuum Mechanics*. [žiūrėta 2015 Vasario 22 d]. Prieiga per Internetą: <<http://www.continuummechanics.org/cm/vonmisesstress.html>>
- [23] Mostafa H., Sharqawya J. H., Lienhard V., Syed M. Z. 2010 *Thermophysical properties of seawater: a review of existing*. *Desalination and Water Treatment*, Konferencija.
- [24] DNV GL Group. Non-linear hydrodynamics, slamming and whipping. [žiūrėta 2015 Vasario 25 d]. Prieiga per Internetą: <<http://www.dnv.in/industry/maritime/servicessolutions/consulting/technicalconsulting/sml/nor near.asp>>
- [25] Parengta pagal PhysOrg. *Technologijos.lt* [žiūrėta 2015 kovo 22 d]. Prieiga per Internetą: <http://www.technologijos.lt/n/mokslas/gamta_ir_biologija/S-21965/straipsnis/Paaiskejo-bangu zudikiu-susidarymo-paslaptis>
- [26] Pilaitienė A. Į vandenį nuleistas Lietuvos meistrų pastatytas mokslinis laivas. [žiūrėta 2015 Vasario 27 d]. Prieiga per Internetą: <<http://www.lrytas.lt/lietuvos-diena/aktualijos/i-vandeni-nuleistas-lietuvos-meistru-pastatytas-mokslinis-laivas.htm#.VW0jA53HuAh>>
- [27] Punys P., Kasiulis E. 2012. Baltijos jūros priekrantės ties Klaipėda bangų aukščių ir vėjo greičių tikimybinių skirstinių analizė. *Kaunas : Aleksandro Stulginskio universitetas*.
- [28] Rahmid S., Tae-wan K., Richard L. S., Hans J. J. H., Stein O. E. 2015. Challenges in computer applications for ship and floating structure design. *Computer-Aided Design*, No. 44, p. 166-185

- [29] Rakauskaitė G. Unikaliam laivui – liaupsės [žiūrėta 2015 Kovo 6 d]. Prieiga per Internetą: <<http://klaipeda.diena.lt/naujienos/klaipeda/miesto-pulsas/unikaliam-laivui-liaupses-649186>>
- [30] Roberto O., Gangadhara B., Salas M. P. 2003. Finite element investigation on the static response of a composite catamaran under slamming loads. *Ocean Engineering*, No. 31, p. 901–929.
- [31] Sėlenienė L. Prezidentei Daliai Grybauskaitei patikėta mokslinio laivo krikštamotės pareiga [žiūrėta 2015 Kovo 6 d]. Prieiga per Internetą: <<http://www.15min.lt/naujiena/aktualu/lietuva/prezidentei-daliai-grybauskaitei-patiketa-mokslinio-laivo-krikstamotes-pareiga-56-468907?cf=vl>>
- [32] Siegel H., Gerth M. Sea Surface Temperature in the Baltic Sea. [žiūrėta 2015 Balandžio 13 d]. Prieiga per Internetą: <http://www.helcom.fi/baltic-sea-trends/environment-fact-sheets/hydrography>
- [33] History.com. Estonia sinks. [žiūrėta 2015 Balandžio 12 d]. Prieiga per Internetą: <<http://www.history.com/this-day-in-history/estonia-sinks>>
- [34] SteelConstruction. Steel material properties. [žiūrėta 2015 Balandžio 20 d]. Prieiga per Internetą: <http://www.steelconstruction.info/Steel_material_properties>
- [35] Stonkus V. 2006. Laivo teorija. Klaipėda : Klaipėdos universiteto leidykla.
- [36] Storhaug G. 2007. Experimental investigation of wave induced vibrations and their effect on the fatigue loading of ships. Oslas: Department of Marine Technology, konferencija.
- [37] Sung-Jin C., Kwang H., Gudmestad O. 2015. The effect of dynamic amplification due to a structure's vibration. *Ocean Engineering*, No. 96, p. 8-20.
- [38] Thomas G. 2011. Slam events of high-speed catamarans in irregular waves. *Marine Science and Technology*, No. 16, p. 8-21.
- [39] National ocean service. What is a rogue wave? [žiūrėta 2015 Balandžio 15 d]. Prieiga per Internetą: <<http://oceanservice.noaa.gov/facts/roguewaves.html>>
- [40] Wikipedia. Katamaranas [žiūrėta 2015 Sausio 15 d]. Prieiga per Internetą: <<http://lt.wikipedia.org/wiki/Katamaranas>>
- [41] Zm Q., Batra R.C. 2008. Local slamming impact of sandwich composite hulls. *International Journal of Solids and Structures*, No. 46, p. 2011–2035.