

KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS

Jūros technologijų ir gamtos mokslų fakultetas

Jūrų inžinerijos katedra

Šarūnas Kontautas

Laivo nusėdimo Klaipėdos uoste tyrimas

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

Klaipėda, 2016

SANTRAUKA

Kontautas Š. Laivo nusėdimo Klaipėdos uoste tyrimas. Laivų projektavimo ir statybos magistrantūros studijų programos baigiamasis darbas. Darbo vadovas doc. dr. J. Čerka, Klaipėdos universitetas: Klaipėda, 2016 m. – 71 p.

Baigiamajame magistriniame darbe atliekamas laivo nusėdimo Klaipėdos uoste tyrimas. Baigiamasis darbas susideda iš dviejų pagrindinių dalių: teorinio aprašo bei tiriamosios dalies. Pirmojoje dalyje aprašomas nusėdimo efektas, kuomet jis pasireiškia, kodėl svarbu jį tiksliai nustatyti. Taip pat apžvelgiama dabartinė situacija Klaipėdos uoste, aprašomi būdai laivo nusėdimui skaičiuoti. Antroje darbo dalyje skaičiuojamas pasirinkto laivo nusėdimas Klaipėdos uoste. Skaičiavimai atliekami empirinėmis formulėmis bei fluidų dinamikos programa Flow 3D. Pateikiama gautų rezultatų analizė, pastebėjimai bei išvados.

Raktažodžiai: laivas, nusėdimas, uostas, avarija, sekluma.

SUMMARY

Kontautas Š. Study of the Ship Squat in Port of Klaipeda. Final thesis of Ship Building and Design master studies. Academic supervisor doc. dr. J. Čerka, Klaipeda University: Klaipeda, 2016 m.-71 p.

The study of ship squat in port of Klaipeda is analyzed in this final thesis. There are two parts in this work: theoretical description and calculations. Ship squat effect, when we can see it and why it is necessary to calculate is described in first part. Current situation of Port of Klaipeda and all ship squat calculation methods are also in this part. In second part of this thesis there are all ship squat calculations of selected ship in port of Klaipeda. Empirical calculations and CFD with Flow 3D program are in this part. Conclusions and recommendations are also in this final thesis.

Keywords: ship, squat, port, accident, shallow.

**Laivų projektavimo ir statybos magistrantūros studijų (studijų programa
[621H52001](#)) baigiamasis darbas**

Užduotis studentui: Šarūnui Kontautui

Darbo tema: **Laivo nusėdimo Klaipėdos uoste tyrimas**

Darbo sudėtis

ĮVADAS. Darbo tikslas, uždaviniai, tyrimo objektas, tyrimo metodai

- I.* TEORINIAI ASPEKTAI
- II.* LITERATŪROS APŽVALGA
- III.* KLASIKINIAI LAIVO NUSĖDIMO VERTINIMO METODAI
- IV.* SKAIČIUOJAMOSIOS FLUIDŲ DINAMIKOS PRINCIPAI
- V.* FLOW-3D KOMPIUTERINIO PROGRAMINIO PAKETO TAIKYMO GALIMYBĖS
- VI.* LAIVO NUSĖDIMO MATEMATINIS EKSPERIMENTAS
- VII.* TYRIMO REZULTATŲ ANALZĖ
- VIII.* IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS
- IX.* INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Laivų avarijos dėl nusėdimo efekto	16
2 lentelė. Modelių duomenys.....	18
3 lentelė. Laivo diferentas	18
4 lentelė. Laivo modelis ir realus laivas	19
5 lentelė. Skaičiuojamo Kriso konteinerinio laivo parametrai	23
6 lentelė. Laivo nusėdimas pagal skirtingas metodikas.....	35
7 lentelė. Skaičiuojamo laivo duomenys	44
8 lentelė. Skaičiavimuose naudojami parametrai	46
9 lentelė. Skaičiavimo rezultatai B. Barrass 1 metodu	47
10 lentelė. Skaičiavimo rezultatai B. Barrass 2 metodu	49
11 lentelė. Skaičiavimo rezultatai Eryuzlu ir Hausser metodu.....	51
12 lentelė. Skaičiavimo rezultatai Eryuzlu metodu	53
13 lentelė. Skaičiavimo rezultatai Hooft metodu	55
14 lentelė. Skaičiavimo rezultatai japonų metodu.....	57
15 lentelė. Skaičiavimo rezultatai Millward metodu.....	59
16 lentelė. Skaičiavimo rezultatai Norrbin metodu	61
17 lentelė. Skaičiavimo rezultatai Flow 3D programa	65

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Laivo statinis bei dinaminis diferentas	14
2 pav. MS Herald of Free Enterprise	15
3 pav. Queen Elizabeth 2	15
4 pav. Gento Universiteto bandymų baseinas	17
5 pav. Modelio U nusėdimo rezultatai	19
6 pav. Modelio U ir konteinerinio laivo Berlin Express nusėdimas nuo greičio.....	20
7 pav. Monrealio žemėlapis.....	20
8 pav. Skirtingų laivų nusėdimo priklausomybė nuo greičio	21
9 pav. Laivo nusėdimas ir nusėdimas į diferentą priklausomai nuo kanalo pločio bei gylio	22
10 pav. Skaičiuojamo laivo modelis.....	23
11 pav. Vandens gylių konfigūracijos	24
12 pav. Laivo nusėdimas priklausomai nuo greičio bei gylio	24
13 pav. Skirtingų nusėdimo skaičiavimo metodų palyginimas	25
14 pav. Laivo skersinis pjūvis kanale.....	27
15 pav. Nusėdimo skaičiavimams naudojami laivo parametrai	29
16 pav. Kanalų tipai.....	30
17 pav. Kanalo ir laivo skersinis pjūvis midelyje.....	31
18 pav. Koeficientų reikšmės nuo apribojimo dydžio	33
19 pav. Tinklelis aplink laivą	38
20 pav. Taškai rezultatų duomenims gauti	38
21 pav. Rezultatai 3d vizualizacija	39
22 pav. Klaipėdos uosto gylio schema pjūvis kanale	40
23 pav. Klaipėdos uosto gylio žemėlapis	42
24 pav. Didžiausi laivai Klaipėdos uoste	43
25 pav. Skaičiuojamo laivo forma	44
26 pav. Skaičiuojamo laivo teorinis brėžinys.....	45
27 pav. Skaičiavimo rezultatai B. Barrass 1 metodu.....	48
28 pav. Skaičiavimo rezultatai B. Barrass 2 metodu.....	50
29 pav. Skaičiavimo rezultatai Eryuzlu ir Hausser metodu.....	52
30 pav. Skaičiavimo rezultatai Eryuzlu metodu.....	54
31 pav. Skaičiavimo rezultatai Hooft metodu	56
32 pav. Skaičiavimo rezultatai japonų metodu.....	58

33 pav. Skaičiavimo rezultatai Millward metodu.....	60
34 pav. Skaičiavimo rezultatai Norrbin metodu.....	62
35 pav. Klasikinių skaičiavimo rezultatų palyginimas.....	63
36 pav. Laivo nusėdimo grafinė vizualizacija.....	64
37 pav. Skaičiavimo rezultatai Flow 3D programa	66

TURINYS

IVADAS.....	10
I.LAIVO NUSĖDIMO PROBLEMA	12
1.1. Laivo nusėdimo reiškinių esmė	12
1.2. Laivo nusėdimo pasekmė.....	14
II.ATLIKTŲ TYRIMŲ KRITINĖ ANALIZĖ	17
2.1. Gento Universiteto bandymų baseine atlikti tyrimai	17
2.2. Šv. Lauryno kanale atlikti tyrimai	20
2.3. Nusėdimo skaičiavimai naudojant kompiuterines simuliacijas	22
III.LAIVO NUSĖDIMO VERTINIMO KLASIKINĖS METODIKOS	26
3.1. Bryan Barrass metodas	26
3.2. Skirtingų mokslininkų metodai.....	28
3.3. Mokslininkų metodai įvertinant laivo formą	34
IV.LAIVO NUSĖDIMO PROGNOZAVIMAS TAIKANT SKAIČIUOJAMĄJĄ SKYSČIŲ HIDRODINAMIKĄ	37
V.KLAIPĖDOS UOSTO CHARAKTERISTIKOS	40
VI.TIRIAMOJO LAIVO CHARAKTERISTIKOS.....	43
VII.LAIVO NUSĖDIMO MATEMATINIS EKSPERIMENTAS	46
7.1. Laivo nusėdimo skaičiavimas empirinėmis formulėmis	46
7.2. Klasikinių laivo nusėdimo vertinimo metodikų palyginimas	62
7.3. Laivo nusėdimo skaičiavimas Flow 3D programa	64
<u>VIII</u>.ATLIKTŲ TYRIMŲ REZULTATŲ ANALIZĖ	67
IŠVADOS	68
LITERATŪRA	70

IVADAS

Pirmieji laivai atsirado daugiau kaip prieš 10000 metų. Tačiau jie buvo kitokie nei mes esame įpratę matyti. Pirmieji laivai buvo tarsi plaustai padaryti iš rąstų, kuriuos į priekį nešė srovė ar pats žmogus irdamasis. Po truputį laivai tobulėjo. Paprastus rąstus imta skaptuoti. Rąstus jungiant, konstrukcijos vis didėjo. Daugelis senovės tautų, tokios kaip kinai, finikiečiai, egiptiečiai, graikai, romėnai, išmoko vėją panaudoti kaip varomąją jėgą. Taip gimė pirmieji burlaiviai. Technologijų sparta vis augo, nauji išradimai leido labiau patobulinti laivų konstrukciją. Didelis lūžis laivų statyboje įvyko 1787 m. kuomet Anglijoje buvo pastatytas pirmasis plieninis laivas. Tačiau pagrindinis perversmas laivyboje įvyko 1807 m. JAV pastačius pirmąjį garlaivį. Tai atvėrė visai naujas galimybes [12].

Nuo pirmo laivo atsiradimo, jų konstrukcijos vis didėjo. Laivų greitis augo. Laivų daugėjo. Nenuostabu, kad laivų avarijos tapo neišvengiamos, dažnos ir vis didesnių mastų. Tai vertė daugiau dėmesio skirti saugumui. Viena iš žymiausių avarių, stipriai lėmusi naujų saugos reikalavimų atsiradimą, buvo legendinio transatlantinio keleivinio laivo „Titanikas“ sudužimas. Žuvo 1502 keleiviai bei įgulos nariai iš 2200 plaukusiųjų [15]. Kadangi laivai atsirado gana senai, jų statyba ilgą laiką rėmėsi praktika, o ne skaičiavimais. Tačiau atsiradus galimybėms laivo charakteristikas įvertinti išvestomis matematinėmis formulėmis, statyba tapo kur kas tikslesnė, našesnė bei saugesnė.

Laivo nusėdimas – tai fenomenas, kuomet padidėja laivo povandeninė dalis jam judant tam tikru greičiu negiliame vandenyje. Problema dažniausiai iškyla uostuose, upėse ar netoli krantų, kur gylis nėra didelis lyginant jį su laivo grimzle. Nusėdimo efektas pastebėtas gana senai, tačiau jį mokslškai išaiškinti prireikė laiko. Šiuolaikinės technologijos leidžia gana tiksliai apskaičiuoti laivo nusėdimą skeliamame vandenyje.

Šis darbas susideda iš dviejų dalių. Pirmoje dalyje pateikta laivo nusėdimo atsiradimo priežastis, nusėdimo rūšis. Išanalizuoti nusėdimo dydžio skaičiavimo metodai, jie palyginti. Antroje mokslinio darbo dalyje atliktas laivo nusėdimo Klaipėdos uoste matematinis modeliavimas. Skaičiavimams atlikti panaudoti realūs uosto duomenys bei teoriškai didžiausio laivo, galinčio įplaukti į Klaipėdos uostą, duomenys. Skaičiavimai atlikti empirinėmis formulėmis bei „Flow 3d“ skysčių dinamikos programa.

Darbo tikslas ir uždaviniai. Darbo tikslas – ištirti laivo nusėdimą Klaipėdos uoste. Pasiiekti šį tikslą nustatyti šie uždaviniai:

1. Išsiaiškinti laivo nusėdimo esmę;
2. Kritiškai išanalizuoti atliktus tyrimus;
3. Rasti visus laivo nusėdimo nustatymo metodus;

4. Apskaičiuoti laivo nusėdimą skirtingais metomais;
5. Gautus rezultatus palyginti bei atlikti rezultatų analizę.

Tyrimo objektas. Šio mokslinio darbo tyrimo objektas – tai laivo nusėdimo reiškiny. Kitaip sakant efektas, kuris gaunamas kaip pasėkmė laivui plaukiant sekliame vandenyje tam tikru greičiu.

Tyrimo metodai. Moksliniame darbe taikyti keli tyrimo metodai. Pirmasis – tai mokslinės literatūros analizė. Mokslininkų atlikti tyrimai aprašyti jų moksliniuose straipsniuose, kiti mokslininkai savo tyrimų išvadas pateikia mokslinėse knygose bei vadovėliuose. Antrasis tyrimo metodas, taikytas baigiamajame darbe, tai matematinis eksperimentas. Pirmąją eksperimento dalį sudaro skaičiavimai empirinėmis formulėmis, antrąją – skaičiavimai fluidų dinamikos kompiuterine programa.

I. LAIVO NUSĖDIMO PROBLEMA

1.1. Laivo nusėdimo reiškinių esmė

Laivo nusėdimas^{1*} apibrėžiamas kaip jo poslinkis vertikaliai į apačią nusileidus vandens lygiui laivo buvimo vietoje. Kitaip tariant, pakinta laivo povandeninės dalies forma ir padėtis absoliučioje koordinatų sistemoje. Pagrindinė laivo nusėdimo sąlyga - laivas turi judėti vandens atžvilgiu. Nusėdimo atveju pati grimzlė beveik nekinta (gali pasikeisti tik diferentas), tačiau laivas patiria skendimo būseną ir taip priartėja arčiau dugno [1].

Fiziškai paaiškinti laivo nusėdimą galima būtų susiejant su slėgių skirtumais. Laivui judant horizontaliai pirmyn yra išstumiamas prieš jį esantis vanduo. Tačiau už laivo negali likti tuščios erdmės, todėl vanduo turi užpildyti ją. Vanduo grįžta iš laivo šonų ir apačios. Aptekantis vandens srautas yra greitesnis laivo dugne. Greičiau ištekėjęs vanduo iš dugno sudaro slėgių skirtumus. Slėgis laivo apačioje tampa mažesnis, dėl šios priežasties laivas yra stumiamas vertikaliai žemyn. Priklausomai nuo diferento laivas pasvyra į laivapriekį arba į laivagalį [2].

Mokslininkai, nagrinėjantys laivo nusėdimą, būtent slėgio skirtumu ir remiasi darydami išvadas ar siūlydami naujus skaičiavimo būdus. Bernulio lygtis yra viena iš pagrindinių hidrodinamikos lygčių. Ji nusako ryšį tarp skysčio tekėjimo greičio, hidrodinaminio slėgio, skysčio sunkio jėgos ir skysčio čiurkšlės arba tėkmės padėties palyginimo plokštumos atžvilgiu, priklausomai nuo skysčio fizikinių savybių. Bertulio lygties empirinė išraiška:

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = const, \quad (1)$$

čia: ρ – skysčio tankis, kg/m^3 ;

v – skysčio tėkmės greitis, m/s ;

g – laisvojo kritimo pagreitis, m/s^2 ;

h – skysčio aukštis pasirinktoje atskaitos sistemoje, m ;

p – išorinių jėgų statinis slėgis, Pa .

Bernulio lygties pagalba skaičiuojami pagrindiniai tėkmės parametrai: debitas, greitis, slėgis, hidrauliniai nuostoliai. Vandens debitas, vienas iš faktorių, dėl kurių atsiranda slėgių skirtumai ir laivas priverstas judėti vertikaliai žemyn. Pasinaudojus Bernulio lygtimi [14] yra išvesta skysčio tėkmės vientisumo lygtis (2). Pagal ją, tėkmės debitas yra pastovus. Kitaip tariant skystis iš niekur nepriteka ir niekur nenuteka.

*rus., просадка судна; angl., ship squat

$$Q = w_1 \cdot v_1 = w_2 \cdot v_2 = \dots = w_n \cdot v_n = \text{const}, \quad (2)$$

čia: Q – skysčio debitas, m^3/val ;
 w – skysčio tekėjimo plotis, m^2 ;
 v – skysčio tekėjimo greitis, m/s ;

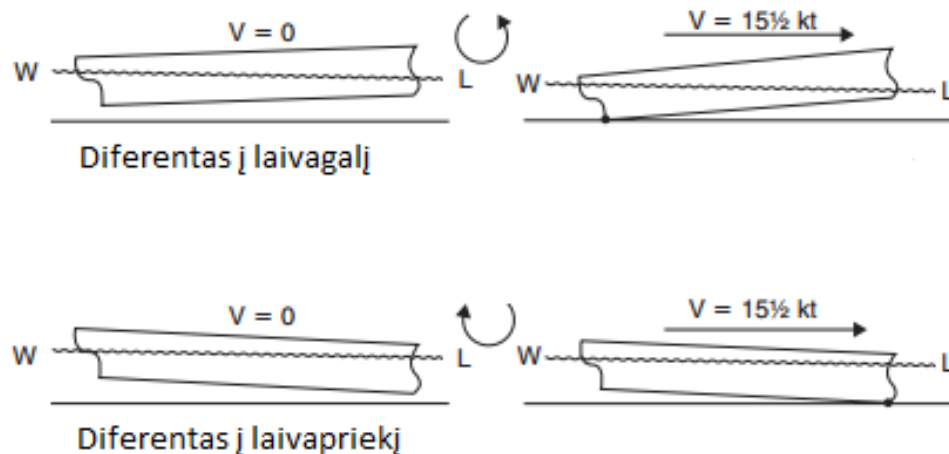
Pagal Bernulio lygtį bei tėkmės vientisumo lygtį, laivui judant tam tikru greičiu dėl slėgio skirtumų atsiranda jėgos, nukreiptos į dugną, fenomenas – laivo nusėdimas.

Laivo nusėdimo dydis bei priklauso nuo kelių faktorių. Juos galime aprašyti šia funkcija:

$$\delta = f(v_k, H, B, T, b, L_{pp}, C_b), \quad (3)$$

čia: δ – laivo nusėdimas, m.
 v_k – laivo greitis, m/s ;
 H – plaukimo kanalo gylis, m;
 B – plaukimo kanalo plotis, m;
 T – laivo grimzlė, m;
 b – laivo plotis, m;
 L_{pp} – laivo ilgis tarp statmenų, m;
 C_b – laivo pilnumo koeficientas.

Nusėdimo kampas priklauso nuo laivo korpuso formos pilnumo koeficiento, jau esamos statikoje diferento rūšies bei kitų faktorių. Anksčiau buvo manoma, kad didinant greitį laivas sėsta laivagalyje. Todėl laivu, turinčiu statinį diferentą laivapriekyje, įplaukus į negilų vandens telkinį, esant dideliui greičiui diferentas taps lygus 0 bei laivas išsilygins. Tačiau tokia teorija buvo klaidinga. Remiantis bandymų rezultatais nustatyta, kad statikoje laivui esant pasvirus į laivagalį, jam judant pirmyn vandens atžvilgiu, dinaminis diferentas taip pat bus į laivagalį. Ir atvirkščiai esant statiniam diferentui į laivapriekį (1 pav.).



1 pav. Laivo statinis bei dinaminis diferentas

Nustatyti skirtingų laivų elgseną plaukiant sekliame vandenyje gali tapti gana sudėtinga ar net neįmanoma, kadangi neįmanoma įvertinti visų laivo parametrų. Skaičiuojant laivo nusėdimą klasikinėmis empirinėmis formulėmis dažniausiai yra naudojami aukščiau minėtos funkcijos (3) parametrai. Kai kurie autoriai įvertina laivo statinį kyliškumą ar nurodo kokio tipo laivams jų sukurta formulė tinka. Tačiau nėra įvertinamas pavyzdžiui laivo forštevenis ir achterštevenis. Laivapriekyje esantis bulbas, jo dydis bei forma turi didelės įtakos laivo elgsenai. Lygiai taip pat svarbus ir laivo achterštevenis. Laivui plaukiant sekliam vandenyje šie parametrai gali nulemti laivo kyliškumą, faktinis laivo nusėdimas mažai atitiks klasikinėmis formulėmis gautas reikšmes.

1.2. Laivo nusėdimo pasekmė

Laivo nusėdimo problema pastebėta jau gana senai. Tačiau mažiems bei lėtiems laivams nusėdimo dydis nėra didelis, vos keli centimetrai, todėl jis ilgą laiką nekėlė rūpesčių. Nuo maždaug 20 amžiaus antros pusės laivai ėmė sparčiai didėti. Ilgis, plotis, grimzlė išaugo kelis kartus, naujos technologijos suteikė galimybę statyti galingesnius bei greitesnius laivus. Kadangi laivo nusėdimui didelę įtaką turi laivo gabaritai bei greitis, nusėdimo problema tapo labai svarbi [1].

1987 m. kovo 6 MS Herald of Free Enterprise RORO tipo keltas pilnai pakrautas su 80 žmonių įgūla, 459 keleiviais, 81 lengvąja mašina, 3 autobusais bei 47 vilkikais paliko Belgijos Zebriugės uostą. Laivui palikus uostą bei pasiekus 19 mazgų greitį, į denį pradėjo plūsti vanduo. Visa tai įvyko sekliame vandenyje, maždaug 1 km nuo kranto. Nors kapitonas supratęs esamą situaciją stengėsi keisti kryptį ir grįžti į uostą, tačiau vanduo per kelias minutes pilnai užliejo mašinų skyrių, atjungė pagrindinius variklius, laivą paliko be pagrindinės bei pagalbinės jėgainės. Laivas

apvirto, žuvo 193 žmonės. Nors laive buvo pažeidimų, tokių kaip pilnai neuždaryti dokai, tačiau laivo nusėdimas tapo pagrindine avarijos priežastimi [13].



2 pav. MS Herald of Free Enterprise

1992 m. rugpjūčio 7 Queen Elizabeth 2 kruizinis laivas išplaukė iš vienos Jungtinių Amerikos Valstijų salos. Dėl perdidelio greito bei navigacijoje nepažymetos seklumos, laivas patyrė nusėdimo efektą. Laivo dugnas atsitrenkė į seklumoje gulinius akmenis bei pažeidė korpusą. Keleiviai bei įgūla nenukentėjo, tačiau laivas kurį laiką praleido remonto dokuose. Klaida kainavo brangų laivo remontą bei prarastus užsakymus. Po kelių dienų narai avarijos vietoje nustatė, kad dėl perdidelio greičio laivas dugnu atsitrenkė į akmenis.



3 pav. Queen Elizabeth 2

Dėl laivo nusėdimo patirtų avarių skaičius pasaulyje yra labai didelis. Nors dažnai tai traktuojama kaip užplaukimas ant seklos, tačiau laikantis nustatyto greičio to galima išvengti. Didžiausias avarijas, kurių priežastis laivo nusėdimo efektas, pateikiu 1 lentelėje.

1 lentelė. Laivų avarijos dėl nusėdimo efekto [1]

Laivo pavadinimas	Laivo tipas	Data
Herald of Free Enterprise	Roro keltas	1987 03 06
Queen Elizabeth 2	Kruizinis	1992 08 07
Sea Empress	Tanklaivis	1996 02 15
Heidrun	Tanklaivis	1996 09 10
Diamond Grace	Konteinerinis	1997 07 02
Napoleon Bonaparte	Kruizinis	1999 02 05
Treguier	Tanklaivis	1999 08 04
Don Raul	Balkeris	2001 03 31
Tasman Spirit	Tanklaivis	2003 07 27

Avarijos dėl laivo nusėdimo, kaip rodo praktika, gali kainuoti žmonių gyvybes, atnešti didelių nuostolių laivų savininkams, uostams ar pakenkti ekologinei sistemai.

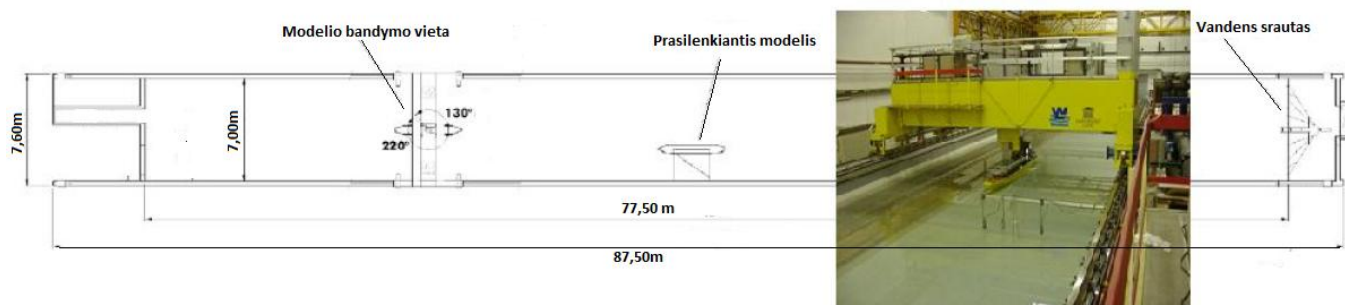
II. ATLIKTŲ TYRIMŲ KRITINĖ ANALIZĖ

Apskaičiuoti tai, kaip laivas elgiasi plaukdamas sekliu vandeniu, galime formulėmis. Tačiau formulės yra išvedamos iš atliktų bandymų, stebėjimų ir analizių. Norint informaciją susisteminti į tam tikras formules, turime atlikti gana didelę aibę bandymų ir nustatyti dėsningumus bei priklausomybes. Paprasčiausias ir turbūt greičiausias būdas – susikurti modelį ir jį ištirti visais įmanomais būdais bandymų baseine. Siekiant tikslesnių rezultatų, bandymus reikia atlikti su skirtingų formų modeliais. Šiek tiek tikslesnis, tačiau žymiai didesnių resursų reikalaujantis būdas – bandymus atlikti su tikrais laivais. Atlikus tam tikrą kiekį bandymų galima išvesti tam tikrus dėsningumus. Tikslus ir sąlyginai nedaug resursų reikalaujantis būdas – kompiuterinė simuliacija. Tačiau techniškai sudėtingas ir reikalaujantis specialios įrangos.

2.1. Gento Universiteto bandymų baseine atlikti tyrimai

2008 metais grupė mokslininkų iš Belgijos susistemino atliktus skaičiavimus bandymų baseine bei realaus laivo plaukimą sekliame vandenyje.

Pagrindinis tikslas atliekant bandymus baseine, gauti kuo tikslesnius ir realesnius rezultatus. Dėl to bandymai atlikti dideliame ir sudėtingą mokslinę įrangą turinčiame Belgijos Gento Universiteto baseine (4 pav.). Baseino bendras ilgis siekia 87 metrus, o plotis 7 metrus. Tai leidžia gauti duomenis, artimus realiems.



4 pav. Gento Universiteto bandymų baseinas

Bandymai atlikti su trimis skirtingais realių laivų modeliais. Jų duomenis pateikiu 1 lentelėje. Kadangi tyrimo metu buvo tiriami keli parametrai, visi laivo modeliai buvo naudojami skirtingams tikslams. Tarkim modelis F buvo naudojamas kaip prasilenkiantis laivas todėl jo parametrai kitokie. Pačio nusėdimo bandymai buvo atlikti su U modeliu, o gauti rezultatai susisteminti žemiau pateiktuose grafikuose ir lentelėse.

2 lentelė. Modelių duomenys

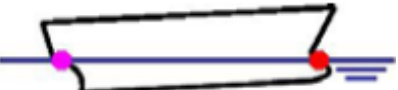
Modelis	L _{pp} , m	b, m	L/b
D	3,864	0,536	7,2
F	3,800	0,640	5,9
U	4,106	0,530	7,7

Siekdami nustatyti laivo nusėdimą mokslininkai viską vertino specialiu T_{nh} parametru, kuris iš esmės yra Frūdo skaičiaus išraiška:

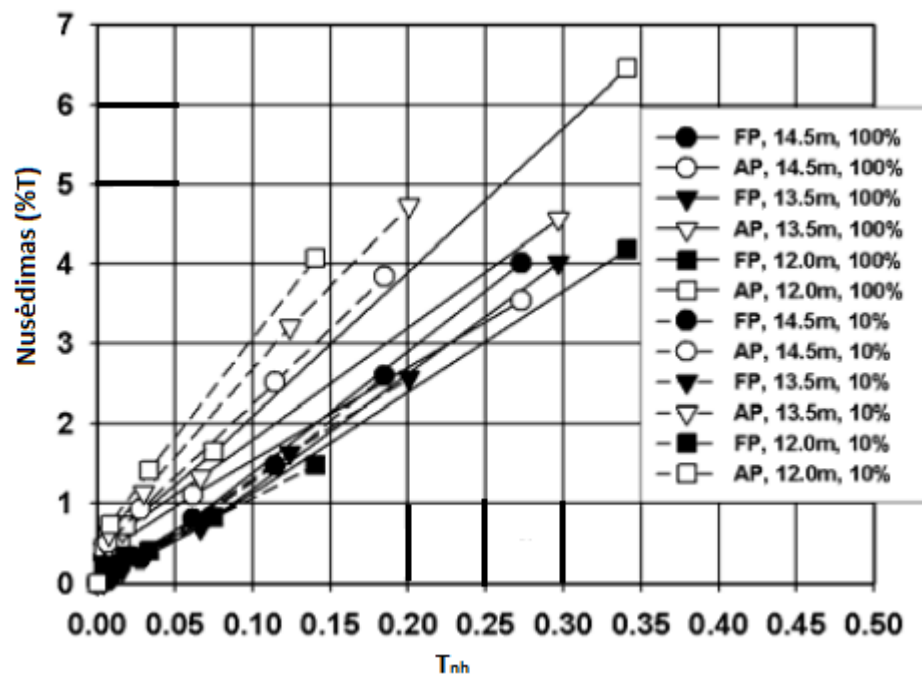
$$T_{nh} = \frac{Fr_h^2}{\sqrt{1 - Fr_h^2}}, \quad (4)$$

Skaičiavimai atlikti esant skirtingoms laivo grimzlėms – nuo 12,0 m iki 14,5 m. Taip pat esant skirtingiems gyliams – tarp laivo dugno ir baseino dugno esant 100 % laivo povandeninės dalies ir esant 10 % laivo povandeninės dalies. Kaip keisis laivo diferentas jam plaukiant pavaizduota 3 lentelėje.

3 lentelė. Laivo diferentas

	Gilus vanduo (100 % T)	Seklus vanduo (10 % T)
T=14,5 m		
T=12,0 m		

Atlikų bandymų rezultatai išreikšti procentine priklausomybe nuo laivo pavandeninės dalies dydžio ir T_{nh} parametro. Skirtingos reikšmės nurodytos laivaprieikiui (FP) bei laivagaliui (AP). Rezultatai pateikti 5 paveiksle.



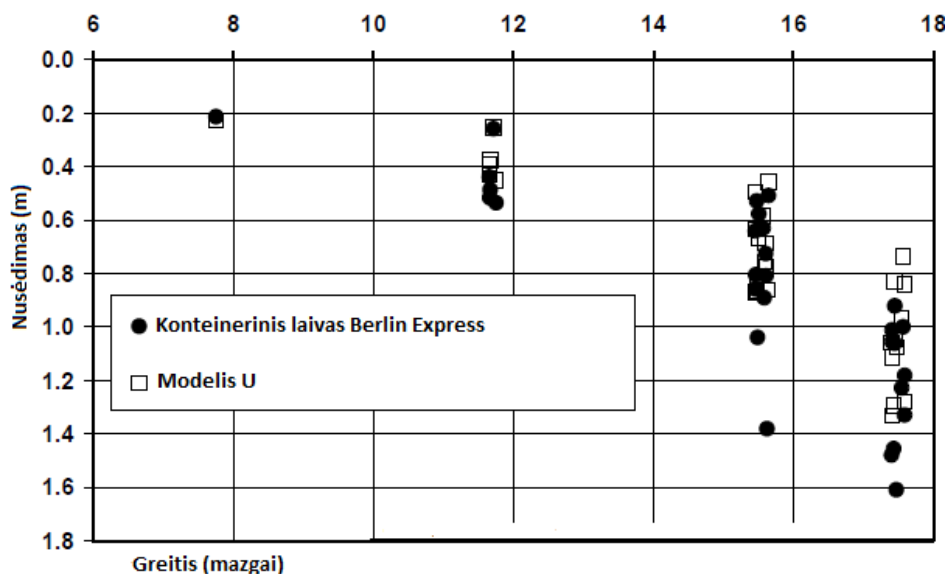
5 pav. Modelio U nusėdimo rezultatai

Mokslininkai, norėdami pagrįsti atliktus skaičiavimus, duomenis palygimo su realiu laivu, pagal kurį buvo pagamintas modelis U. Modelis buvo 80,8 sumažinto konteinerinio laivo Berlin Express kopija (3 lentelė).

4 lentelė. Laivo modelis ir realus laivas

Laivas	L_{pp} , m	b, m
Modelis U (mąstelis 1:80,8)	331,8	42,8
Berlin Express	320,4	42,8

Atlikti 29 konteinerinio laivo plaukimai Elbės upe prie skirtingų greičių ir atitinkamomis sąlygomis atlikti modelio U plaukimai baseine. Nusėdimo priklausomybė nuo greičio pateikta 6 paveiksle.

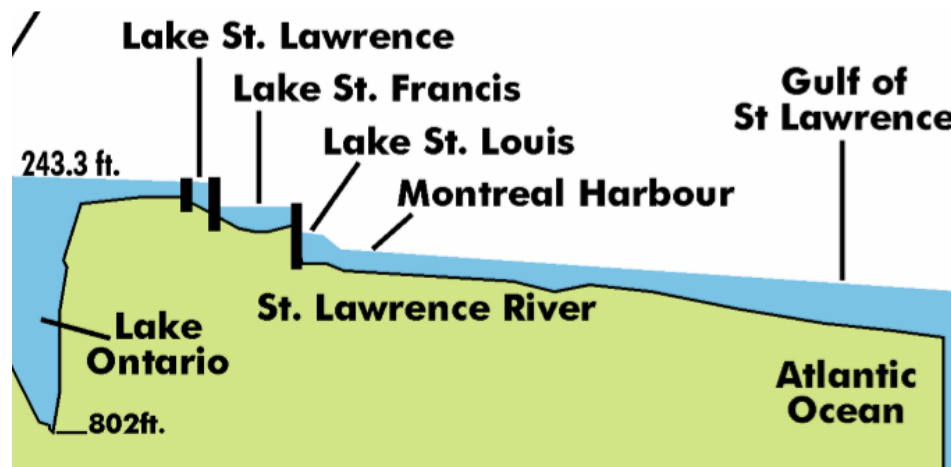


6 pav. Modelio U ir konteinerinio laivo Berlin Express nusėdimas nuo greičio

Po atliktų bandymų, skaičiavimų bei darbo sisteminimų mokslininkai priėjo išvados, kad laivo nusėdimą galima nustatyti baseine bei tiriant realų laivo plaukimą. Tačiau skaičiavimai nebus tikslūs. Kadangi laivo nusėdimas pagrįdė priklauso nuo dviejų faktorių – plaukimo greičio bei formos pilnumo koeficiento – dėl pastarojo reiktų atlikti begalinę aibę skaičiavimų siekiant tikslaus rezultato [4].

2.2. Šv. Lauryno kanale atlikti tyrimai

Nuo 1959 m iki 2000 m šv. Lauryno kanale Monrealyje (7 pav.) maksimali leistina laivų grimzlė padidinta nuo 6,9 m iki 8,0 m. Visa tai pasiekta ne dėl kanalo valymo ar gilinimo darbų. Vis augantis poreikis didesnių bei talpesnių laivų privertė ieškoti būdų kaip šį poreikį įgyvendinti. Buvo nuspręsta atlikti skaičiavimus ir jeigu yra įmanoma sumažinti klirensą.

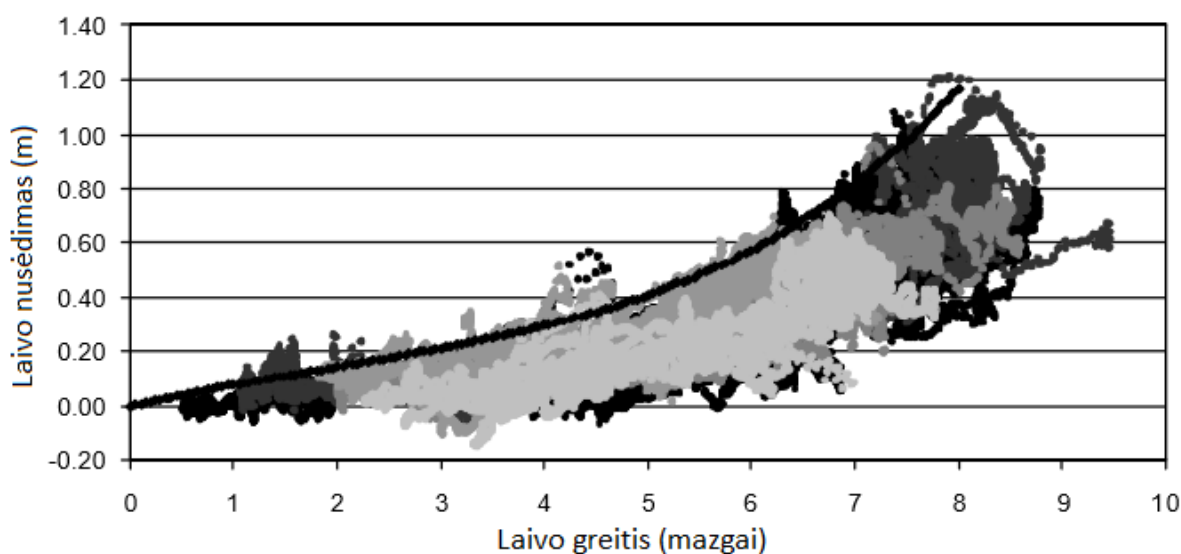


7 pav. Monrealio žemėlapis

1994 m. grupė mokslininkų atliko pirmuosius laivų nusėdimo skaičiavimus. Per metus mokslininkai išmatavo 7 laivų, plaukiančių šiuo kanalu, nusėdimą naudodami GPS technologiją. Tačiau rezultatai nesuteikė daug naudingos informacijos, kadangi visa informacija buvo prastos kokybės. Po metų mokslininkai atliko matavimus 5 konteineriniams laivams naudodami naują, patobulintą technologiją. Rezultatai buvo labai naudingi ir davė nemažai reikalingos informacijos. Tai suteikė mokslininkams ne tik daug naudingos informacijos apie laivo nusėdimą plaukiant sekliame vandenyje, tačiau taip pat leido gauti didesnę valstybės bei didžiųjų jūrinių kompanijų paramą.

Iš viso mokslininkai atliko 33 skirtingų laivų nusėdimo skaičiavimus. Dauguma skaičiavimų buvo atlikta Kanadoje (daugiausia vidaus vandenyse), kita dalis Jungtinėse Amerikos Valstijose. Pagrindiniai duomenys, kurių siekė mokslininkai, ištirti kiek laivas nusėda priklausomai nuo laivo greičio. Šie duomenys grafiškai atvaizduoti 8 paveiksle.

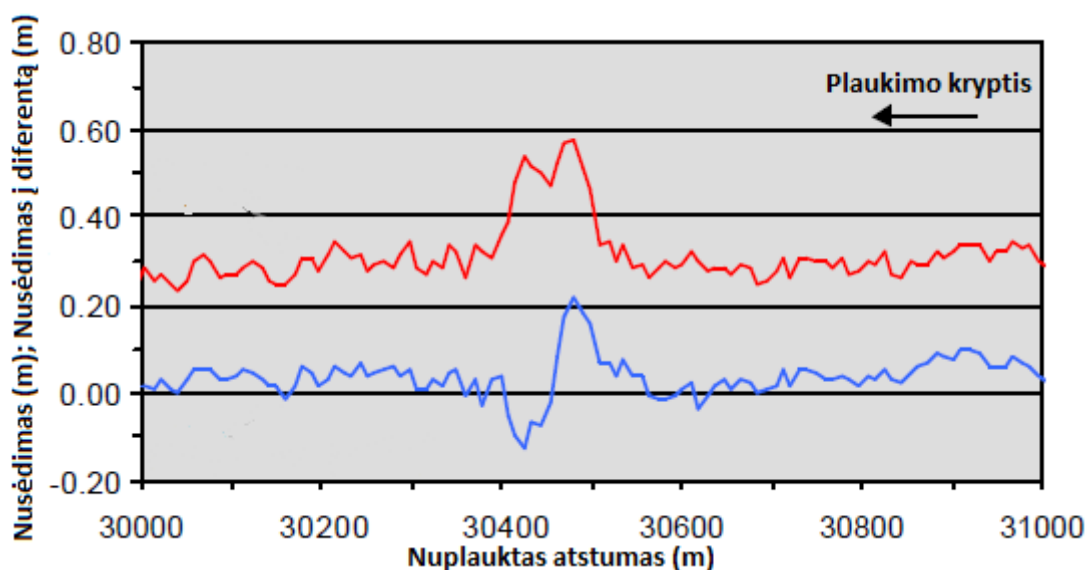
Taip pat mokslininkai grafiškai atvaizdavo kaip kinta laivo nusėdimas bei nusėdimas į diferencialą jam perplaukiant iš plataus bei gilaus vandens į siaurą negilų kanalą (9 pav.). Pasiekus 30400 plaukimo metrą staiga stipriai išauga laivo nusėdimas bei nusėdimas į diferencialą. Visa tai trunka maždaug 100 metrų.



8 pav. Skirtingų laivų nusėdimo priklausomybė nuo greičio

Mokslininkų atlikti skaičiavimai leido sumažinti klirensą, taip padidino uosto darbą, pralaidumą, atvėrė naujas galimybes uosto kompanijoms. Šie skaičiavimai taip pat atnešė didelę naudą mokslui kadangi faktinis laivų stebėjimas ir aprašymas yra pats pirmas žingsnis į tolesnį srities nagrinėjimą. Ištirta skirtinga laivų elgsena mokslininkams leidžia rasti priklausomybes bei

sudaryti tam tikras formules, kuriomis remiantis skaičiavimai tampa kur kas greitesni ir patikimesni [11].



9 pav. Laivo nusėdimas ir nusėdimas į diferentą priklausomai nuo kanalo pločio bei gylio

2.3. Nusėdimo skaičiavimai naudojant kompiuterines simuliacijas

Kompiuterinės simuliacijos yra vienas iš patikimiausių, pigiausių bei greičiausių būdų ištirti tam tikras laivo elgsenas. Specialiomis programomis galima sukurti laivo modelį. Skyrę tam pakankamai laiko, galime gauti idealią laivo kompiuterinę kopiją. Turėdami šį virtualų modelį, galime jį patalpinti kokiam nors skystyje (mūsų atveju - jūros vandenyje). Galime priversti vandenį aptekėti laivą taip simuliudami laivo plaukimą.

Jacekas Jachowskis, Gdanskio Technologijos Universiteto mokslininkas, 2008 m. ištyrė kaip laivo nusėdimo dydis skiriasi skaičiavimus atliekant tradicinėmis formulėmis bei naudojant kompiuterines simuliacijas. Mokslininkas pasirinko nusėdimą skaičiuoti konteineriniam laivui Kriso (5 lentelė). Atlikti simuliacijas pasirinko kompiuterine programa Fluent, o skaičiavimus empirinėmis formulėmis atliko 6 skirtingais metodais:

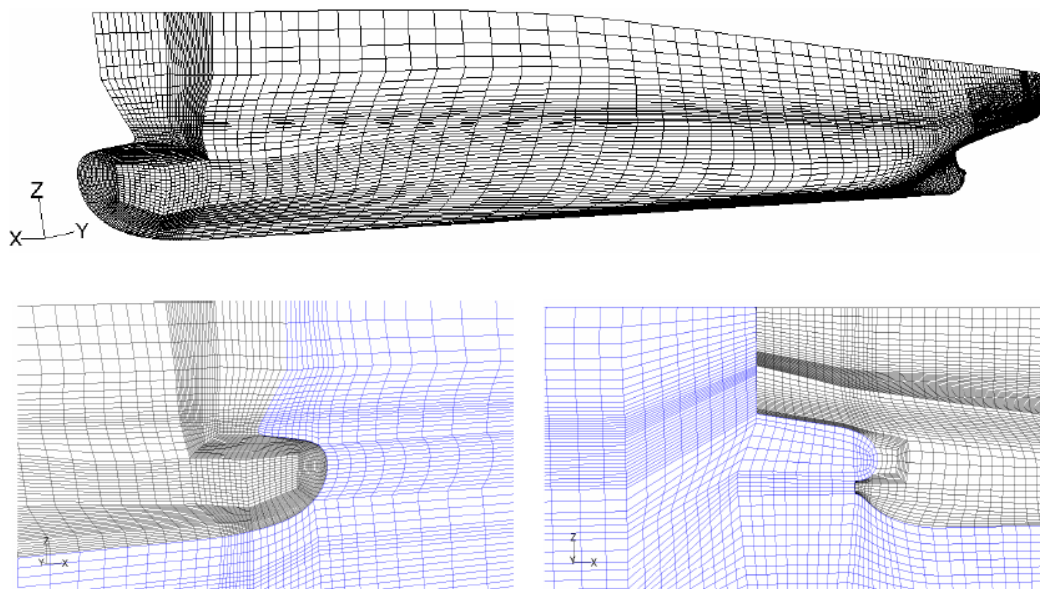
1. B. Barrass metodas;
2. Huuska metodas;
3. Eryuzlu metodas;
4. Eryuzlu ir Hausser metodas;
5. Icorels metodas;
6. Hooft ir Turner metodas.

5 lentelė. Skaičiuojamo Krišo konteinerinio laivo parametrai

Parametrai	L_{pp} , m	B, m	T, m	C_b	C_p	C_m	V, m ³	S_w , m ²
Skaičiuojama laivas	184,87	25,88	8,68	0,6508	0,6608	0,9849	27531	9,4984

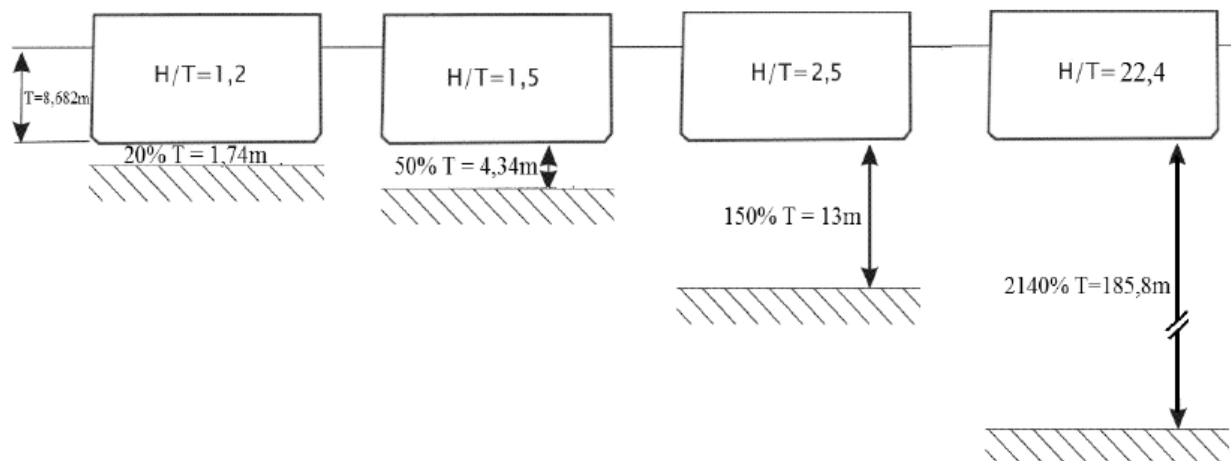
Fluent programa atlieka skaičiavimus tinklelio principu. Tai reiškia, kad laivo modelis yra sudarytas iš daug taškelių, kurie sujungti tarpusavyje. Skystis, kuriame patalpintas laivo modelis, taip pat turi savo taškelius, kurie sujungti. Daugiau taškelių tame pačiame plote reiškia smulkesnį tinklėlį, o tai suteikia tikslesnius skaičiavimo rezultatus.

Jacekas atlikdamas savo skaičiavimus Fluent programa, turimą modelį suskirstė į maždaug 700 000 langelių turintį šešiabriaunį tinklėlį. Vandens tinklėlį prigretino prie laivo modelio nepalikdamas erlmės net sudėtingose laivapriekio bei laivagalio vietose (10 pav.).



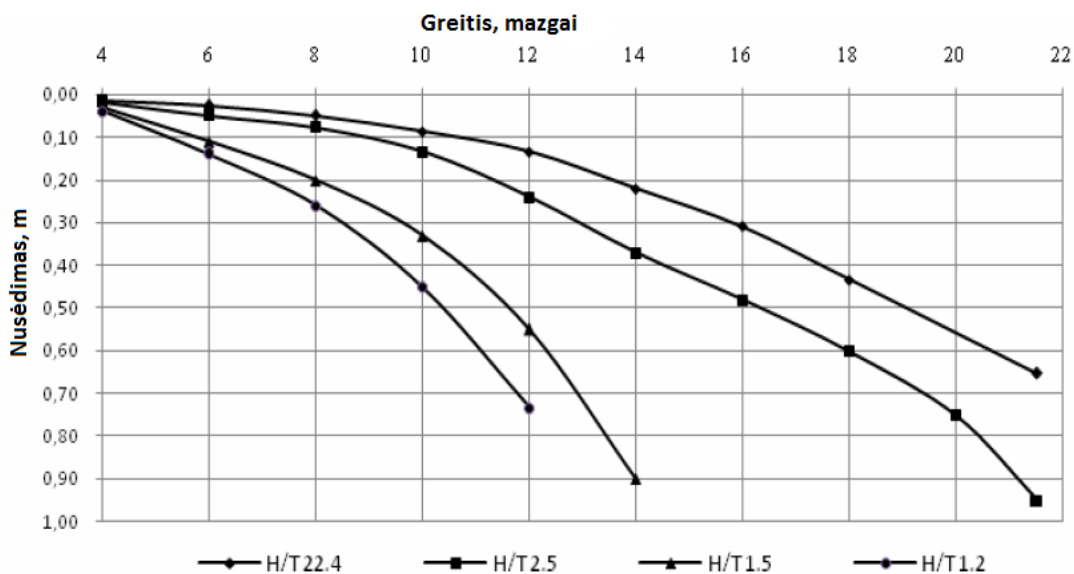
10 pav. Skaičiuojamo laivo modelis

Kaip jau minėjau anksčiau, laivo nusėdimas priklauso nuo gylis, kuriame laivas plaukia. Todėl atlikdamas skaičiavimus, mokslininkas išskiria skirtingus gylis. Imant vandens gylis H santykį su laivo grimzle T , išskiriami atvejai: $H/T=1,2$; $H/T=1,5$; $H/T=2,5$; $H/T=22,4$ (11 pav.). Šiuo atveju pirmos dvi reikšmės galėtų būti priskiriamos prie seklaus vandens, vidurinioji prie vidutinio seklumo, o paskutinė reikšmė būtų priskiriama prie gilaus vandens. Skaičiavimai šiuose gyliuose atliekami tiek su empirinėmis formulėmis, tiek simuliacine programa.



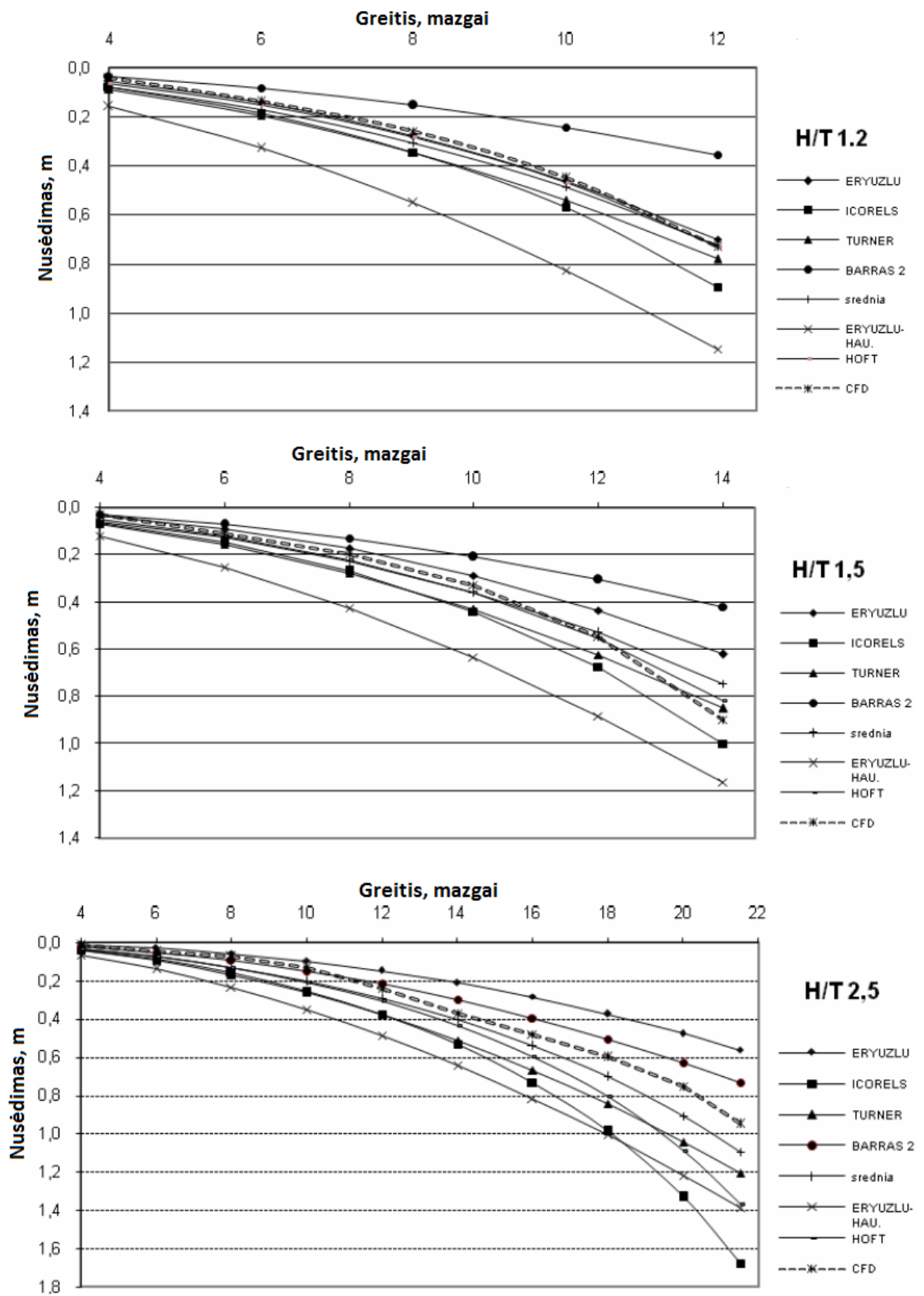
11 pav. Vandens gylių konfigūracijos

Atliekant skaičiavimus, programa Fluent vertino vertikalią jėgą. Ją sudaro statinė jėga, bei dalis, atsiradusi judant laivui. Laivo nusėdimą apibūdina tas skirtumas tarp statinės jėgos ir jėgos, laivui judant. Laivo nusėdimas priklauso nuo plaukimo greičio bei vandens gylio, pateiktas 12 paveiksle.



12 pav. Laivo nusėdimas priklauso nuo greičio bei gylis

Empirinėmis formulėmis atlikti skaičiavimai skyrėsi, kadangi mokslininkai, išvedę formules, priklausomybės išvedė iš skirtingų laivo parametrų. Prie mažų greičių rezultatai panašūs, tačiau greičiui didėjant, jie ženkliai skiriasi. Skaičiavimų skirtingomis empirinėmis formulėmis ir Fluent simuliacine programa palyginimas pateiktas 13 paveiksle [6].



13 pav. Skirtingų nusėdimo skaičiavimo metodų palyginimas

III. LAIVO NUSĖDIMO VERTINIMO KLASIKINĖS METODIKOS

Jeigu anksčiau praktikoje laivo nusėdimui buvo taikoma atsarga tiesiogiai susijusi su laivo grimzlės dydžiu, tai technologijoms sparčiai judant pirmyn dabar galima atlikti žymiai tikslesnius skaičiavimus empirinėmis formulėmis arba dar tikslesnius naudojant kompiuterines programas. Jau kelis pastaruosius dešimtmečius mokslininkai įvairiais būdais stengiasi rasti bendrų formulių, tinkančių apskaičiuoti laivo nusėdimui. Šios formulės išvedamos atliekant modelių bandymus specialiuose bandymų baseinuose, skaičiuojant realių laivų nusėdimus. Kitas variantas, nustatyti kaip laivas elgiasi tam tikro gylio vandenyje – atlikti specialius skaičiavimus skysčių aptekėjimo programomis.

3.1. Bryan Barrass metodas

Laivo nusėdimas pasireiškia laivui judant. Ši problema pastebima laivui judant atvirame vandenyje sąlyginai dideliame gylyje. Tačiau nusėdimas tampa kur kas didesne problema laivui judant sekliam vandenyje.

Laivo nusėdimo dydį nusako trys faktoriai:

1. Laivo greitis.
2. Laivo pilnumo koeficientas.
3. Santykinis kanalo dydis.

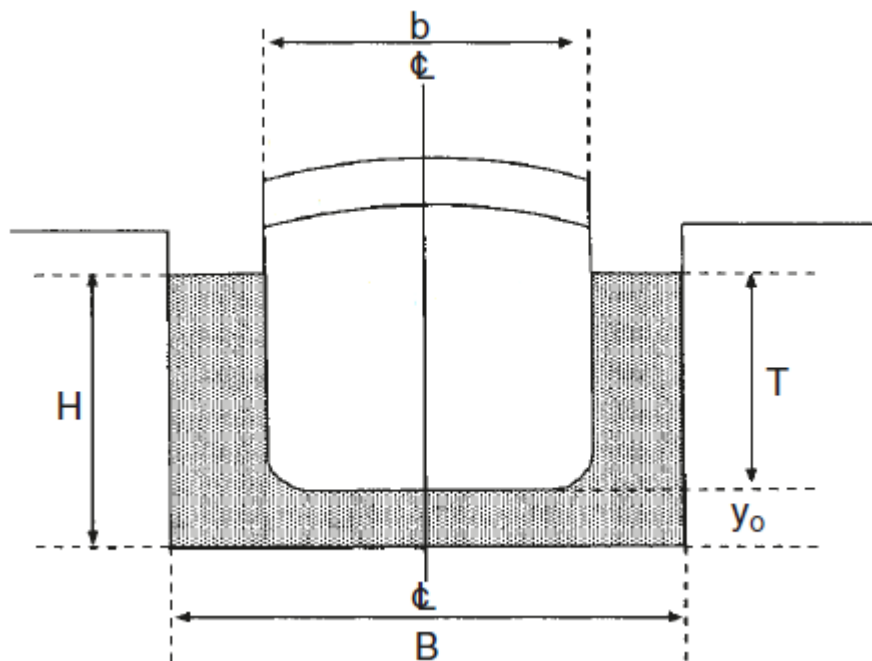
Pagrindinis faktorius, lemiantis laivo nusėdimą yra greitis v_K . Apytiksliai galima teigti, kad laivo greitį padidinus du kartus, nusėdimas padidėja keturis kartus. Turima omenyje, jog laivo greitis reliatyvus vandeniui, taigi reikia atsižvelgti į vandens tekėjimo greitį bei kryptį.

Laivo pilnumo koeficientas C_b apibūdina laivo formą. Šis faktorius paaiškina kodėl tankeris pasižymi didesniu nusėdimu nei keleivinis laivas.

Santykinis kanalo dydis, tai povandeninės dalies aukščio bei laivo pločio sandauga padalinta iš kanalo gylio bei pločio (14 pav.). Laivo matmenys skaičiuojami midelyje. Laivui plaukiant atvirame vandenyje, kanalo pločio reikšmė pakeičiame apytiksliai apskaičiuotu dydžiu. Tankeriams ši reikšmė yra 8,25b, konteineriniams laivams 9,50b.

Laivui plaukiant siauru kanalu, reikia atkreipti dėmesį ar nėra prasilenkiančių laivų. Atsiradus prasilenkimui, nusėdimo reikšmė padvigubėja.

Formulės, kuriomis galime apskaičiuoti laivo nusėdimą, gautos atlikus ir išanalizavus apie 600 bandymų.



14 pav. Laivo skersinis pjūvis kanale

Santykinį kanalo dydį būtina apskaičiuoti, jeigu reikalingas rezultatas laivui plaukiant sekliam. Jį rasime šia formule:

$$S = \frac{b \cdot T}{B \cdot H}, \quad (5)$$

- čia: S – santykinis kanalo dydis;
 b – laivo plotis midelyje (m);
 T – laivo povandeninė dalis midelyje (m);
 B – kanalo plotis (m);
 H – kanalo gylis (m).

Maksimalus laivo nusėdimas atvirame vandenyje bei nedideliuose kanaluose randamas šia formule:

$$\delta_{max} = \frac{C_b \cdot S^{0,81} \cdot v_K^{2,08}}{20}, \quad (6)$$

- čia: δ_{max} – maksimalus laivo nusėdimas;
 C_b – laivo pilnumo koeficientas;
 v_K – laivo greitis.

Tais atvejais, kuomet laivas plaukia atvirame vandenyje:

$$B = (7,7 + 20(1 - C_b)^2) \cdot T, \quad (7)$$

Maksimalus laivo nusėdimas tik atvirame vandenyje, kai $H/T=1,1 \div 1,4$, randamas šia formule:

$$\delta_{max} = \frac{C_b \cdot v_K^2}{100}, \quad (8)$$

Maksimalus laivo nusėdimas tik kanaluose, kai $S=0,1 \div 0,265$, randamas šia formule:

$$\delta_{max} = \frac{C_b \cdot v_K^2}{50}, \quad (9)$$

3.2. Skirtingų mokslininkų metodai

Laivo nusėdimas atsiranda dėl slėgio skirtumų. Visos mokslininkų išvestos formulės remiasi Bernulio lygtimi. Bernulio lygtis yra viena iš pagrindinių hidrodinamiko lygčių. Ji nusako ryšį tarp skysčio tekėjimo greičio, hidrodinaminio slėgio, skysčio sunkio jėgos ir skysčio čiurkšlės arba tėkmės padėties palyginimo plokštumos atžvilgiu, priklausomai nuo skysčio fizikinių savybių. Būtent Bernulio lygties pagalba skaičiuojami pagrindiniai tėkmės parametrai: debitas, greitis, slėgis, hidrauliniai nuostoliai.

Bernulio lygties empirinė išraiška:

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

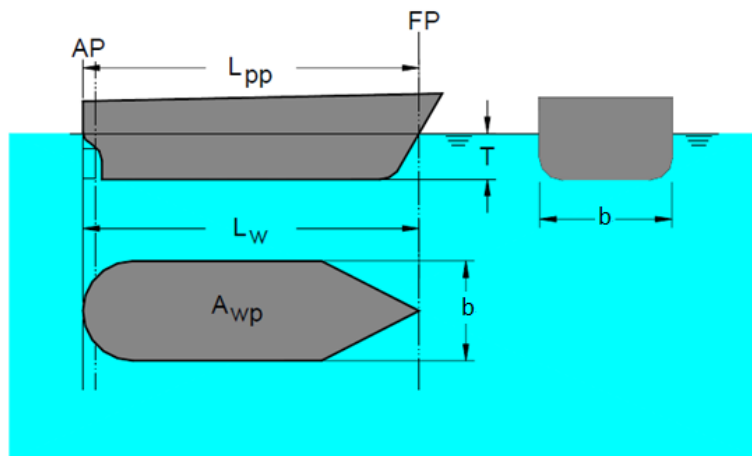
- čia: ρ – skysčio tankis, kg/m^3 ;
 v – skysčio tėkmės greitis, m/s ;
 g – laisvojo kritimo pagreitis, m/s^2 ;
 h – skysčio aukštis pasirinktoje atskaitos sistemoje, m ;
 p – išorinių jėgų statinis slėgis, Pa ;

Pagal Bernulio lygtį, laivui judant tam tikru greičiu dėl slėgio skirtumų atsiranda jėgos, nukreiptos į dugną, fenomenas – laivo nusėdimas.

Nusėdimas bendraja prasme priklauso nuo laivo bei kanalo, kuriuo plaukia laivas, charakteristikų. Pagrindiniai laivo parametrai, turintys įtakos nusėdimo efektui, yra grimzlė, pilnumo koeficientas ir laivo greitis. Pagrindiniai kanalo parametrai, turintys įtakos nusėdimo efektui, yra kanalo gylis bei plotis. Skaičiavimai visomis formulėmis yra apytiksliai. Todėl kanalas, kuriuo plaukia laivas, imamas idealus, t.y. visiškai lygus dugnas, lygūs šonai ir laivas plaukia pačiam centre.

Vienas iš laivo parametrų, vaterlinijos koeficientas, skaičiuojamas šia formule:

$$C_{wp} = \frac{A_{wp}}{L_{pp}B}, \quad (11)$$



15 pav. Nusėdimo skaičiavimams naudojami laivo parametrai

Laivo vaterlinijos koeficientas priklauso nuo laivo ilgio tarp statmenų, pločio bei laivo vaterlinijos ploto. Vaterlinijos koeficientas yra bedimensinis dydis. Dažniausiai jo reikšmė skirtingų tipų laivams būna tarp 0,75 – 0,85. Dideliems konteineriniams laivams vaterlinijos koeficientas gali siekti ir 0,9.

Kitas svarbus laivo parametras – vandentalpa. Ši charakteristika įvertinama laivo ilgiu tarp statmenų, laivo pilnumo koeficientu, pločiu bei grimzle:

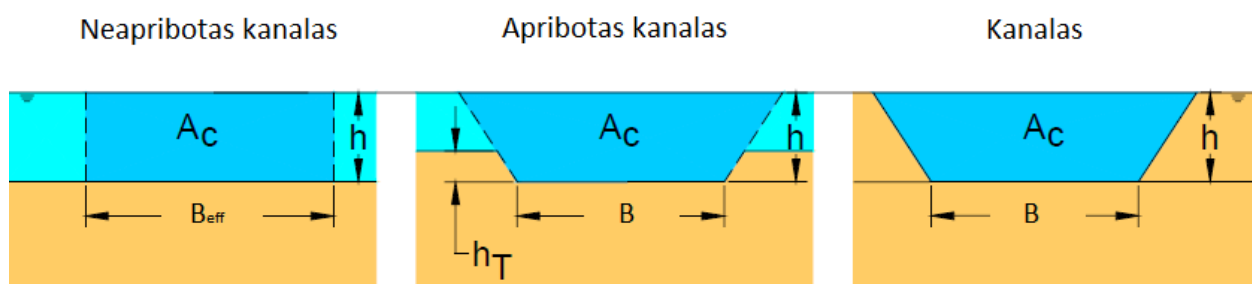
$$\nabla = C_b L_{pp} B T, \quad (12)$$

Vandentalpa, gauta šia formule, matuojama kubiniais metrais. Pačiuose nusėdimo skaičiavimuose konkrečiai vandentalpa nėra naudojama, tačiau formulės išvestos taikant jos skaičiavimą.

Skersinis laivo povandeninės dalies pjūvis, naudojamas nusėdimo skaičiavimuose, skaičiuojamas šia formule:

$$A_s = 0,98BT, \quad (13)$$

Pagal mokslininkus skaičiuojant nusėdimą plaukiančiam laivui, plaukimo kanalas gali būti trijų skirtingų tipų (16 pav.). Neapribotas kanalas reiškia, kad nėra konkrečių kanalo šonų, kurie ribotų vandens judėjimą. Skaičiavimuose naudojamas įtaką turinčio vandens plotis B_{eff} . Apribotas kanalas dažniausiai pasitaiko tuose vietose, kur dėl didelės grimzlės laivų praplaukimo vieta yra pagilinta. Tuomet atsiranda papildomas kanalo parametras h_T .



16 pav. Kanalų tipai

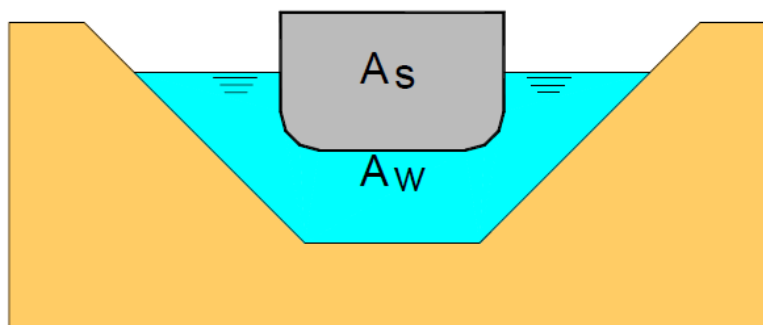
Esant neapribotam kanalui, įtaką turinčio vandens plotis B_{eff} apskaičiuojamas:

$$B_{eff} = (7,7 + 45(1 - C_{wp})^2) \cdot T, \quad (14)$$

Nusėdimo skaičiavimuose yra naudojamas laivo ploto A_s ir kanalo ploto santykis A_c santykis S ir santykis S_2 , kuriame A_c plote atimtas laivo užimamas plotas:

$$S = \frac{A_s}{A_c}, \quad (15)$$

$$S_2 = \frac{A_s}{A_w} = \frac{A_s}{A_c - A_s} = \frac{S}{1 - S}, \quad (16)$$



17 pav. Kanalo ir laivo skersinis pjūvis videlyje

Kai kurie mokslininkai savo išvestose formulėse kaip vieną iš parametrų naudoja laivo greitį. Kiti skaičiavimuose kaip vieną iš pagrindinių parametrų naudoja Frūdo skaičių. Frūdo skaičius suprantamas kaip laivo pasipriešinimas judėjimui sekliam vandenyje.

$$F_{nh} = \frac{v_s}{\sqrt{gH}}, \quad (17)$$

Mokslininkų išvestos formulės laivo nusėdimui skaičiuoti:

Eryuzlu ir Hausser. 1978 metais mokslininkai atliko pilnai pakrauto tanklaivio bandymus neapribotame kanale. Mokslininkai siūlo šią nusėdimo skaičiavimo formulę:

$$\delta = 0,113b \left(\frac{1}{H/T} \right)^{0,27} F_{nh}^{1,8}, \quad (18)$$

Eryuzlu. Viena iš naujesnių mokslininko pateikta formulė laivo nusėdimui skaičiuoti. 1994 metais publikuota formulė skirta pagrinde konteineriniams bei sausakrūviams laivams su priekinius bulbu, plaukiantiems apribotame ir neapribotame kanaluose.

$$\delta = 0,298 \frac{H^2}{T} \left(\frac{v_s}{\sqrt{gT}} \right)^{2,289} \left(\frac{H}{T} \right)^{-2,972} K_b, \quad (19)$$

čia: K_b – kanalo pločio koeficientas:

Kai $B/b \geq 9,61$, tai K_b :

$$K_b = 1,$$

Kai $B/b \leq 9,61$, tai K_b :

$$K_b = \frac{3,1}{\sqrt{B/b}}, \quad (20)$$

Hoof. 1974 metais mokslininkas papildė Tucko (kito mokslininko, tyrinėjusio laivo nusėdimą) formulę ir išvedė tinkančią neapribotiems kanalams:

$$\delta = 1,96 \frac{\nabla}{L_{pp}^2} \frac{F_{nh}^2}{\sqrt{1 - F_{nh}^2}}, \quad (21)$$

Koeficientas 1,96 dažniausia naudojamas kaip vidurkis, tačiau reikšmė galima nuo 1,9 iki 2,03.

Huuska/Guliev. 1976 metais mokslininkai papildė Hoofto išreikštą formulę. Mokslininkų naujoji formulė tinka skaičiuoti nusėdimą apribotuose kanaluose bei kanaluose. Tai pasiekta papildomu K_s koeficientu.

$$\delta = 2,4 \frac{\nabla}{L_{pp}^2} \frac{F_{nh}^2}{\sqrt{1 - F_{nh}^2}} K_s, \quad (22)$$

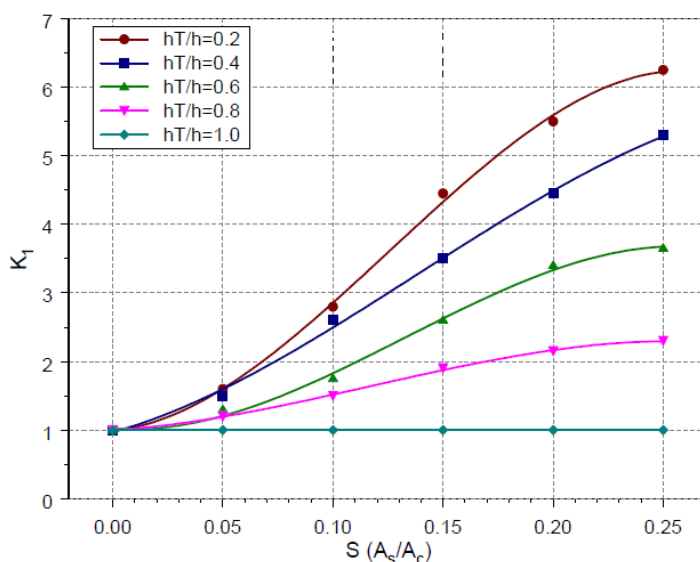
Ši formulė tinka tik tais atvejais, kai frūdo skaičius F_{nh} nėra didesnis kaip 0,7.

Koeficientas K_s apribotiems kanalams bei kanalams yra randamas taip:

$$K_s = \begin{cases} 7,45s_1 + 0,76 & s_1 > 0,03 \\ 1,0 & s_1 \leq 0,03 \end{cases}.$$

Formulėje naudojamas s_1 priklauso kanalo apriboto dydžio hT (18 pav.). Šis dydis apskaičiuojamas naudojant patikslinimo koeficientus, ir reikšmes, atvaizduotas 12 paveiksle.

$$s_1 = \frac{S}{K_1}, \quad (23)$$



18 pav. Koeficientų reikšmės nuo apribojimo dydžio

Icorels metodu (angl. International Commission for the Reception of Large Ships) skaičiuojant laivui, su dideliu laivo pilnumo koeficientu C_b , formulė naudojama lygiai tokia, tik 2,4 koeficientą reikia pakeisti 1,75 koeficientu.

Japonų. 2002 metais japonų mokslų institutas pasiūlė pasiūlė laivo nusėdimą skaičiuoti šia formule:

$$\delta = \left(\left(0,7 + 1,5 \frac{1}{h/T} \right) \left(\frac{C_b}{L_{pp}/b} \right) + 15 \frac{1}{h/T} \left(\frac{C_b}{L_{pp}/b} \right)^3 \right) \frac{v_s^2}{g}, \quad (24)$$

Millward. 1990 metais mokslininkas atliko modelio bandymus baseine simuliuodamas neapribotą kanalą (kanalo plotis apie 2 kartus didesnis nei laivo ilgis tarp statmenų).

$$\delta = 0,01 L_{pp} \left(15 C_b \frac{1}{L_{pp}/b} - 0,55 \right) \frac{F_{nh}^2}{1 - 0,9 F_{nh}^2}, \quad (25)$$

1992 metais mokslininkas pataisė savo išvestą formulę ir ją suformulavo taip:

$$\delta = 0,01 L_{pp} \left(61,7 C_b \frac{1}{L_{pp}/T} - 0,6 \right) \frac{F_{nh}^2}{\sqrt{1 - F_{nh}^2}}, \quad (26)$$

Norrbin. Mokslininkas 1986 metais išvedė formulę, skirta skaičiuoti laivo nusėdimą neapribotame kanale. Pagrindinė sąlyga, formulė tinka skaičiuoti tik tuo atveju kai Frūdo skaičius $F_{nh} < 0,4$. Tuomet laivo nusėdimas randamas:

$$\delta = \frac{C_b}{15} \left(\frac{1}{L_{pp}/b} \right) \left(\frac{1}{h/T} \right) v_k^2, \quad (27)$$

3.3. Mokslininkų metodai įvertinant laivo formą

Dinaminį laivo nusėdimą įvairiais aspektais nagrinėjo labai daug Rusijos ir Ukrainos mokslininkų [3], [8] – V. G. Pavlenka, A. Liachovitskis, P. N. Šančurovas, G. I. Suchomelas, M.Y. Čurinas ir kt.

Siūlomų laivo nusėdimo dydžio skaičiavimo metodikų įvairovė ir pagal jas gaunamų rezultatų išsisklaidymas leidžia daryti išvadą, kad šiose metodikose nepilnai įvertinama atskirų laivo korpuso povandeninės dalies geometrinių charakteristikų įtaka laivo nusėdimui.

Vieną iš universalesnių metodikų yra sudaręs Čurinas (6 lent.):

$$\delta d_{\otimes} = \bar{\delta} \cdot \frac{B \cdot v^2}{L \cdot g} \cdot \sqrt{\frac{d}{H}} = \bar{\delta} \cdot B \cdot Fr^2 \cdot \sqrt{\frac{d}{H}}, \quad (28)$$

čia: $\bar{\delta}$ – laivapriekinės ir laivagalinės dalių pilnumo koeficientų santykis;

L – laivo ilgis;

B – laivo plotis;

d – laivo grimzlė;

H – vandens gylis;

g – laisvojo kritimo pagreitis;

Fr – Frūdo skaičius.

6 lentelė. Laivagalio nusėdimas pagal skirtingas metodikas (laivo projektas 05074 MA–020–002, Rusija)

Santykinis gylis d/H	Laivagalio nusėdimas, m					
	Vidutinis greitis			Mažas greitis		
	Pavlenkos metodas	Šančurovo metodas	Čurino metodas	Pavlenkos metodas	Šančurovo metodas	Čurino metodas
0,5	0,282	0,234	0,285	0,125	0,104	0,127
0,6	0,309	0,256	0,311	0,137	0,114	0,139
0,7	0,333	0,333	0,336	0,148	0,148	0,149
0,8	0,356	0,356	0,360	0,158	0,158	0,160
0,9	0,378	0,378	0,381	0,168	0,168	0,170

Šių ir kitų paminėtų tyrėjų laivo nusėdimo metodikose įvertinami tik kai kurie laivo korpuso geometriniai ir kinematiniai parametrai:

$$\delta d = f\left(\frac{d}{H}; \frac{L}{B}; \delta; v; \dots, Fr\right),$$

bet to aiškiai neužtenka, nes skaičiavimų rezultatai ne visuomet derinasi su eksperimentinių tyrimų duomenimis – šie metodai taikytini tik konkrečių tipų laivams. Deja, dažniausiai nėra informacijos apie laivų geometrinių ir kinematinų charakteristikų apribojimus, o 6 lentelėje pateikti duomenys gauti pagal skirtingas metodikas, bet visos jos buvo sudarytos tam tikro tipo upiniams laivams.

Siekiant unifikuoti ir sukurti universalią metodiką tikslinga pasinaudoti J. Holtropo ir G.G.J. Menneno [10]. Šie tyrėjai analizavo kompleksiskai laivo povandeninės dalies geometrinių ir hidrodinaminių charakteristikų įtaką srauto greičiams ir dinaminio slėgio pasiskirstymui arti laivo korpuso. Galutinis tyrimų tikslas buvo apytikriai įvertinti bangavimo pasipriešinimą – logiška, kad tikslinga atsižvelgti į tuos pačius faktorius vertinant ir laivo nusėdimą.

Pagal Holtropą ir Mennoną laivo bangavimo pasipriešinimas, kartu ir srauto greičių bei slėgių funkcinės priklausomybės yra daugiaparametrės. Kitaip tariant, esant skirtingoms laivo povandeninėms dalims, skirtingas bus vandens aptekėjimas apie laivo korpusą, skirtingai pasiskirstys slėgiai ir todėl laivo nusėdimas bus kitoks. Holtropas ir Mennenas pateikia koeficientus, kurių pagalba galima įvertinti laivo korpusą ir duomenis panaudoti tolimesniuose skaičiavimuose [5].

Laivo korpuso formą įvertina 29 formulė. Čia C_p koeficientas įvertina vaterlinijos ilgį bei vandentalpos centro padėtį.

$$1 + k_1 = c_{13} \left\{ 0,93 + c_{12} (B/L_R)^{0,92497} (0,95 - C_p)^{-0,521448} (1 - C_p + 0,0225 lcb)^{0,6906} \right\} \quad (29)$$

Šioje formulėje koeficientas c_{12} priklauso nuo laivo grimzlės santykio su laivo ilgiu. Jis apskaičiuojamas taip:

Jeigu $T/L > 0,05$ tuomet:

$$c_{12} = (T/L)^{0,2228446}, \quad (30)$$

Jeigu $0,05 > T/L > 0,02$ tuomet:

$$c_{12} = 48,20(T/L - 0,02)^{2,078} + 0,479948, \quad (31)$$

Jeigu $T/L < 0,02$ tuomet:

$$c_{12} = 0,479948. \quad (32)$$

Koeficientas c_{13} priklauso nuo laivapriekio formos. Išskiriamos pagrindinės trys laivapriekio formos: V forma ($C_{sten} = -10$), U forma ($C_{sten} = 10$) bei nei tokia, nei tokia ($C_{sten} = 0$).

$$c_{13} = 1 + 0,003 C_{stern}, \quad (33)$$

Holtropas ir Mennenas įvertina laivo korpusą visais galimais aspektais. Jie siūlo koeficientą, kuris nusako laivo bulbo dydį bei padėtį. Atsižvelgia į laivagalio formą, diferentą, propelerių tipą bei kiekį. Pateikiama daug skirtingų koeficientų, kuriuos įvertinus skaičiavimai tampa tikslesni.

Tačiau svarbu suprasti, kad pateiktos formulės bei koeficientai taip pat yra išvesti iš atliktų bandymų bei eksperimentų. Jie taip pat nėra visiškai universalūs bei tikslūs kaip ir kitų mokslininkų siūlomos formulės nusėdimo skaičiavimui.

Visos mokslininkų formulės atsižvelgia į tam tikrus konkrečius kintamuosius. Svarbiausi- tai kanalo gylis bei laivo greitis (dažnai naudojamas Frūdo skaičius). Tačiau praktiškai nėra atsižvelgiama į korpuso formą, banganimą ir panašius faktorius. Todėl akivaizdu, kad siekiant tikslaus laivo nusėdimo nustatymo, reikia atlikti skaičiavimus fluidų dinamikos kompiuterinėmis programomis.

IV. LAIVO NUSĖDIMO PROGNOZAVIMAS TAIKANT SKAIČIUOJAMĄJĄ SKYSČIŲ HIDRODINAMIKĄ

Flow 3d kompiuterinė programa pagrįste skirta skaičiuoti skysčių dinamikai (CFD). Naudodama daugybę technikų ir matematinių modelių, programa geba spręsti srauto tekėjimo problemas realiu laiku rezultatus pateikdama trimatėje erdvėje. Daugybę skirtingų parametrų pasirinkimų Flow 3D programoje suteikia galimybę stebėti skysčių aptekėjimo fenomeną.

Skysčių judėjimas aprašomas diferencialinėmis lygtimis. Diferencialinė lygtis – tai lygtis, kuri susieja nežinomą funkciją, jos išvestines vieno ar keleto nepriklausomų kintamųjų atžvilgiu, ir šiuos nepriklausomus kintamuosius. Diferencialinės lygtys dažnai naudojamas įvairiose mokslo šakose. Įprasta su lygtimis susidurti, fizikoje, ekonomijoje, inžinerijoje.

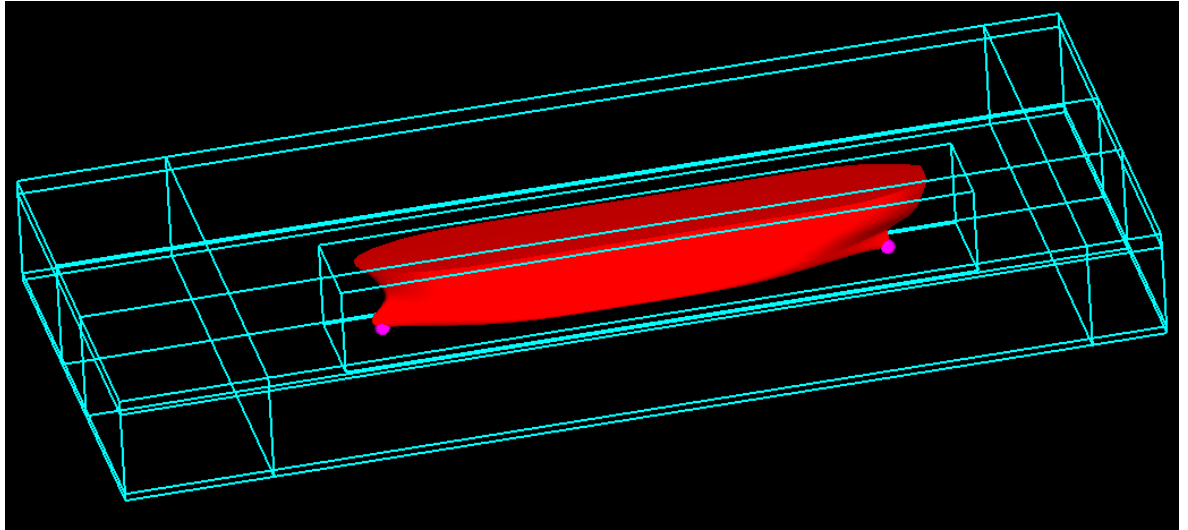
Flow 3 D atlieka skaičiavimus remiantis Navier-Stokso lygtimi. Ši lygtis naudojama skaičiuojant įvairius skysčių dinamikos uždavinius. Matematinė šios diferencialinės lygties išraiška pateikta žemiau:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \xi \frac{A_y u v}{x V_F} &= -\frac{1}{\rho} \left(R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s) \end{aligned}$$

čia: G_x, G_y, G_z – kūno tankis,
 f_x, f_y, f_z – skysčio tankis,
 b_x, b_y, b_z – skysčio nuostoliai.

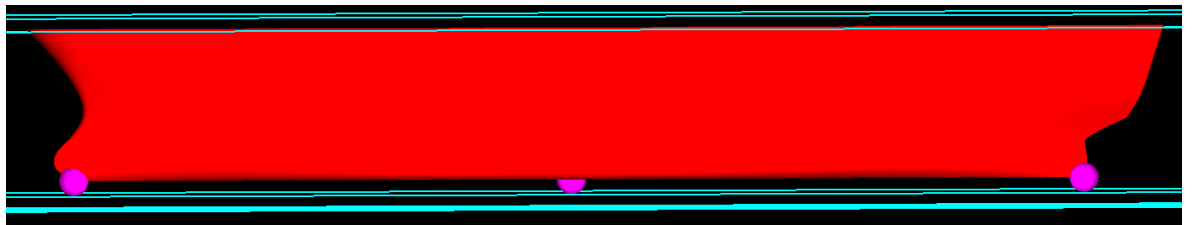
Programa skaičiuoja reikšmes nuosekliai tam tikrais etapais. Dažniausiai patalpintas į Flow 3D programą modelis yra suskirstomas į tam tikro dydžio dalis. Priklausomai nuo reikiamo tikslumo dalis gali būti nuo kelių kubinių mikrometrų iki kelių centimetrų. Uždedamas tam tikras tinklėlis. Tuomet kiekviena dalis turi savo skirtingas reikšmes, kurios matematinėmis formulėmis yra skaičiuojamos. Galiausiai rezultatai apjungiami, apvalinami ir gaunamas bendras į programą patalpinto modelio skaičiavimo rezultatas.

Atliekant laivo nusėdimo skaičiavimus, pirmiausia reikia patalpinti laivo modelį į programą, nustatyti, kad jį aptekės tam tikro dydžio vandens kiekis. Programa tarsi sukuriamas kanalas, kuriuo plauks laivas. Šiek tiek paprastėja skaičiavimai užduodant, kad laivas stovi vietoje, o jį apteka vandens srautas. Taigi yra sukuriamas laukas, kuriuo aplink laivą teka vanduo (19 pav.). Yra išskiriami du laukai, dėl skirtingo tinklėlio.



19 pav. Tinklelis aplink laivą

Laukas, esantis arčiau laivo, dažniausiai turi smulkesnį tinklėlį, kad rezultatai būtų tikslesnis. Tolimesniame lauke nustatytas stambesnis tinklėlis, nes tai skaičiavimų tikslesnių nedaro, tačiau taip programa galės greičiau apdoroti rezultatus. Skaičiuojant laivo nusėdimą taip pat svarbu laive sukurti taškus, kurių judėjimą z ordinatėje galėsime stebėti ir taip apdoroti duomenis. Taigi nustatome tris taškus – laivapriekyje, midelyje bei laivagalyje (20 pav.).



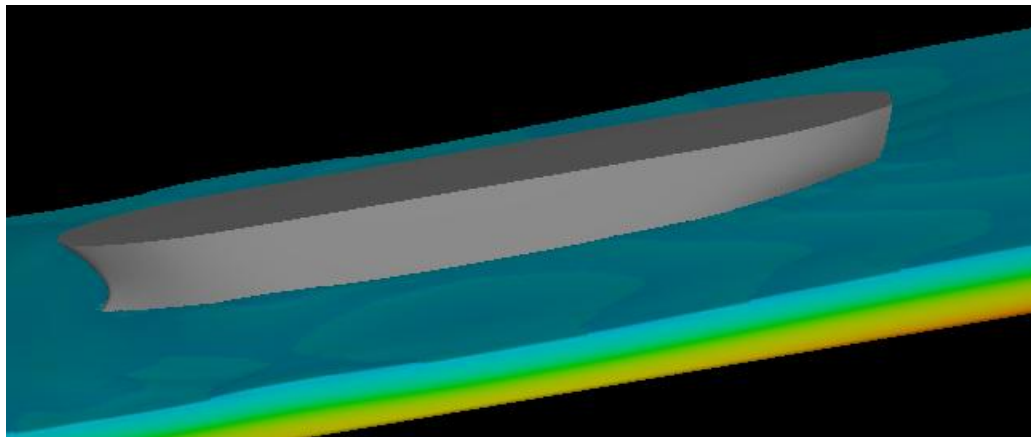
20 pav. Taškai rezultatų duomenims gauti

Skaičiavimų parametrus prieš atliekant kiekvieną skaičiavimą nustatome „Model Setup“ laukelyje. Prieš skaičiavimus reikia pasirinkti:

1. Kiek laiko truks skaičiavimai. Programa nuo pirmos skaičiavimų sekundės paleidžia vandenį nustatytu greičiu (laivo x ir y ordinatės nekinta), tad šiek tiek užtrunka kol laivas nusistovi pastovioje būsenoje ir galime matyti rezultatą.
2. Tinklelyje esantį skystį. Kadangi skaičiuojamas laivas Klapėdos uoste, reikia naudoti jūrinį vandenį. Jūros vandens tankis ($\rho=1030 \text{ kg/m}^3$) šiek tiek didesnis už įprasto vandens tankį ($\rho=1000 \text{ kg/m}^3$), todėl laivas šioje aplinkoje elgsis taip pat kitaip.
3. Vandens lygį, laivo grimzlę. Vandens lygį nustatome pagal parametrus koks reikalingas uoste. Taip pat nustatome pradinę laivo grimzlę, arba klirensą.

4. Laivo greitį vandens atžvilgiu. Skaičiavimus supaprastina laivą laikant vietoje ir jį aptekant vandeniu. Todėl laivo greitis vandens atžvilgiu vedamas su minuso ženklu.

Rezultatai kompiuterine programa pateikiami dviem būdais. Pirmasis tai tam tikro laiko momento 3d vizualizacija (21 pav.). Renkantis skirtingus laikus galima aiškiai stebėti kaip kito laivo koordinatės, kada skendimo funkciją patyrė laivagalis, o kada laivapriekis. Antrasis būdas, kuriuo programa pateikia rezultatus, tai pasirinktų trijų taškų ordinatės tam tikru laiko momentu. Šie taškai turi tikslias reikšmes ir aiškiai galime matyti kiek laivas nusėdo.



21 pav. Rezultatai 3d vizualizacija

V. KLAIPĖDOS UOSTO CHARAKTERISTIKOS

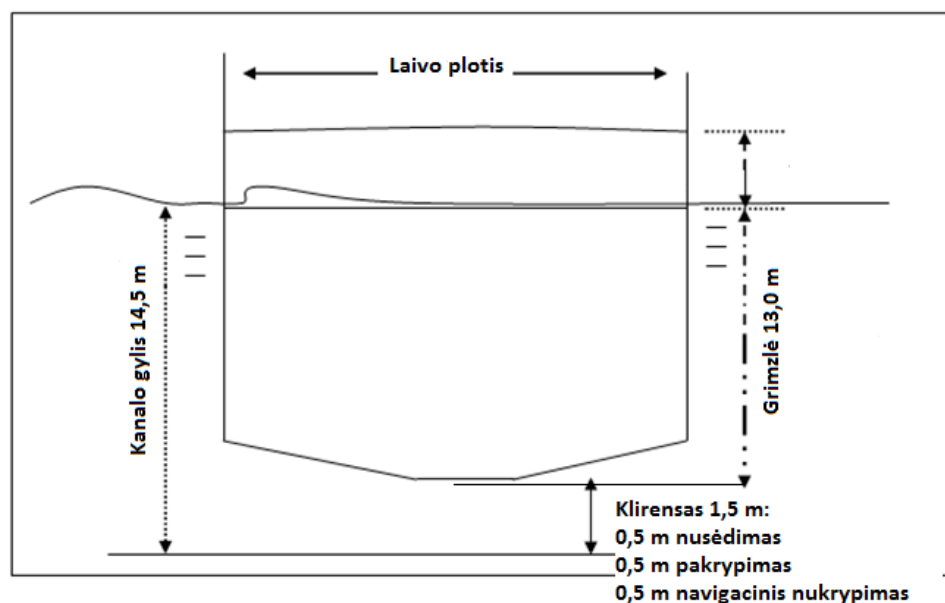
Šiame moksliniame tiriamajame darbe nagrinėju laivo nusėdimo galimybės konkrečioje vietoje – Klaipėdos uoste. Laivo nusėdimą lemia pagrinde laivo greitis, povandeninės dalies statikoje dydis bei uosto gylis. Skaičiuojant laivo nusėdimą taip pat svarbus kanalo plotis, tačiau, kadangi laivo plotis yra kelis kartus mažesnis už uosto plotį, šį dydį galime ignoruoti.

Vandens gylis uoste yra kintantis. Šis dydis skirtingas, priklauso nuo metų laikų, paros meto, oro sąlygų. Be gamtos reiškinių, uosto gylį taip pat lemia ir eismas uoste (įplaukiantys ar išplaukiantys dideli laivai). Pagrindiniai faktoriai, dėl kurių gylis nėra pastovus yra šie:

- Bangavimas;
- Potvyniai, atoslūgiai;
- Srovės.

Standartinis uosto gylis įplaukos kanale dabar siekia 14,5 m. Per pastaruosiu 10-15 metų jis padidėjo 2,5 m. Vidinio uosto kanalo gylis padidėjo nuo 9,5 iki 14,5 m. Šiuos gilinimo darbus buvo privaloma atlikti norint, kad Klaipėdos uostas būtų konkurencingas bei padidintų savo perkraunamų krovinių kiekį. Uosto gilinimo darbai (tarp jų krantinių statyba bei rekonstrukcijos) nuo 1994 iki 2012 m. pareikalavo 550 mln. eurų investicijų [16].

Klaipėdos uosto laivybos kanale šiuo metu leidžiamas mažiausias klirensas yra 1,5 m. Išorės laivybos kanale – 2 m. Skaičiuojama, kad pusė metro atsarga privaloma dėl laivo nusėdimo, kitas pusė metro – dėl laivo pakrypimo. Pusė metro atsarga taip pat pridedama dėl navigacinio nukrypimo. Taigi uosto gyliui įplaukos kanale esant 14,5 m, gali įplaukti laivai turintys ne didesnę kaip 13,0 m grimzlę (22 pav.) [9].



22 pav. Klaipėdos uosto gylio schema

Nustatytas klirensas stipriai apriboja laivybą Klaipėdos uoste. Vienas iš būdų sumažinti priimtą atsargą – sudaryti tikslų uosto žemėlapi. 2013 metais Baltijos pajūrio aplinkos tyrimų ir planavimo institutas užsakė viso Klaipėdos uosto gylių žemėlapi (23 pav.). Projekto duomenys gauti naudojant geoakustinę Norvegijos Kongsbergo sistemą. Projektą finansavo Europos Sąjunga. Projekto pagrindinis tikslas – nustatyti pagrindines uosto sąnašų vietas. Visą Klaipėdos uostą dengiantis žemėlapis parodo seklias akvatorijos vietas, vietas su įdubomis bei vietas kuriose linkęs kauptis gruntas [7].

Kitas būdas mažinti klirensą – palikti mažesnę atsargą laivo nusėdimui bei pakrypimui. Klaipėdos uostą lyginant su kaimyniniais Baltijos jūros uostais, pastarasis turi gerokai didesnę bendrą klirensą. Estijos Mugos uoste yra nustatytas saugus klirensas: sausakrūviams laivams – 0,4 m, tanklaiviams – nuo 0,6 iki 0,8 m, dujovežiams – 0,9 m.

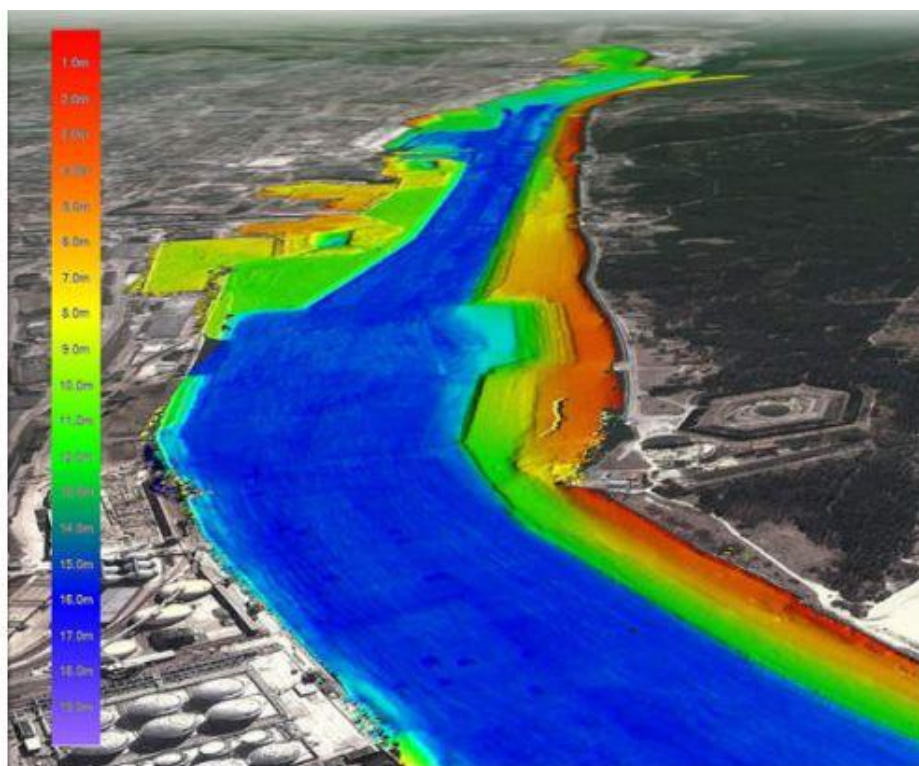
Yra priimta ši klirenso skaičiavimo formulė:

$$K = 0,1 \cdot T;$$

čia: K – klirensas, m;

T – uosto gylis, m.

Tokiu atveju, Klaipėdoje taikomas 1,5 m klirensas būtų teisingas. Tačiau pagal praktiką, daugelyje Europos miestų imamas 1 m klirensas. Išskirtiniais atvejais jis būna koreguojamas priklausomai pagal situaciją.



23 pav. Klaipėdos uosto gylio žemėlapis

Klirenso dalį, kuri dėl laivo nusėdimo, galime sumažinti ne tik aklai didindami riziką. Yra žinoma, kad laivo nusėdimas priklauso nuo plaukimo greičio. Galbūt greičio mažinimas dideliems laivams užtikrintų mažesnę jo nusėdimą. Tačiau tokias prielaidas reikia pagrįsti. Tik atlikti skaičiavimai suteiks mums galimybę įvertinti ir taip sumažinti nustatytą atsargą.

VI. TIRIAMOJO LAIVO CHARAKTERISTIKOS

Klaipėdos uostas per pastaruosius 10 metų sulaukia vis didesnių, rekordinio dydžio laivų. 2008 metais kovą Klaipėdos uostą aplankė 274,47 m ilgio tankeris „Tour“, kurio grimzlė siekia net 17 m. Grimzlė tai rekordinis laivas Klaipėdos uostui. 2010 metais sausio mėnesį Klaipėdos uoste prisišvartavo didžiausias sausakrūvis laivas „Aghios Makarios“. Jo ilgis 228,6 m, plotis 43 m, o grimzlė 12,85 m. 2012 metais sausio mėnesį Lietuva pasiekė naują ilgiausio laivo Klaipėdos uoste rekordą. „MSC Krystal“ konteinerinis laivas prisišvartavo uoste, jo ilgis 277,3 m, plotis 56 m, grimzlė 14,5 m (24 pav.) [16].



24 pav. Didžiausi laivai Klaipėdos uoste

Tanklaivis „Tour“ ir konteinerinis laivas „MSC Krystal“ turi didesnę grimzlę nei yra leistina plaukti Klaipėdos uoste. Todėl jie buvo pakrauti ne pilnai, kad neviršytų leistinos normos. Nepilnai pakrauti laivai dažnai laivybos kompanijoms, o tuo pačiu ir valstybei, neatneša didelės dalies pelno. Didžiųjų Klaipėdos uosto kompanijų, tokių kaip „Klasco“, „Klaipėdos Smeltė“, vadovai siekia sumažinti kliresą. Juozas Benetis, „Klasco“ technikos direktorius, teigia, kad svarbiausia saugumas. Klirensą galima mažinti esant tiksliai žinomiems gyliams. „Klaipėdos Smeltės“ generalinis

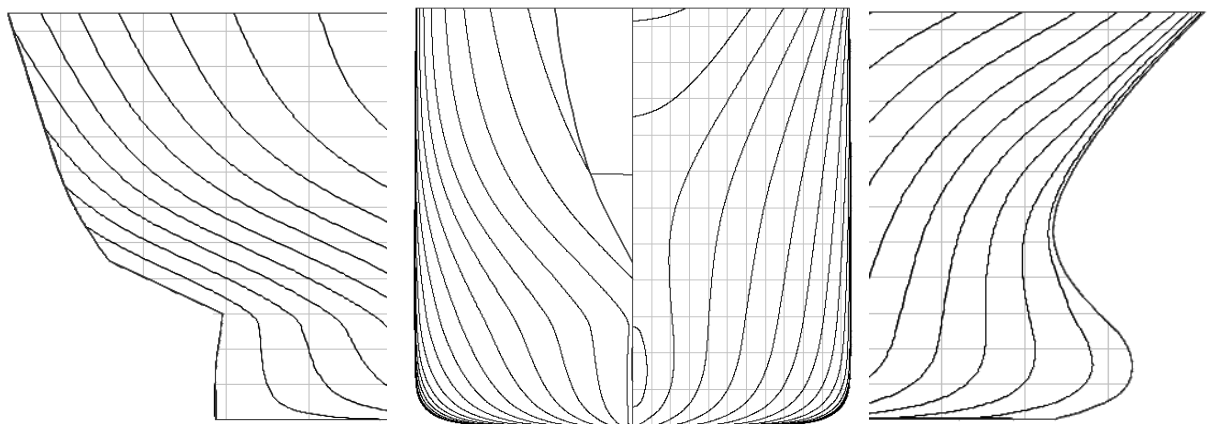
direktorius Rimantas Juška linkęs mažinti klirensą iš atsargos, skirtos neutralizuoti laivo pakrypimų poveikį [9].

Laivo nusėdimo Klaipėdos uoste skaičiavimams atlikti naudosiu kursiniame darbe brėžtą sausakrūvį laivą. Šiek tiek pakeičiau jo parametrus ir pritaikiau dabartiniai situacijai. Laivo duomenys pateikti 7 lentelėje.

7 lentelė. Skaičiuojamo laivo duomenys

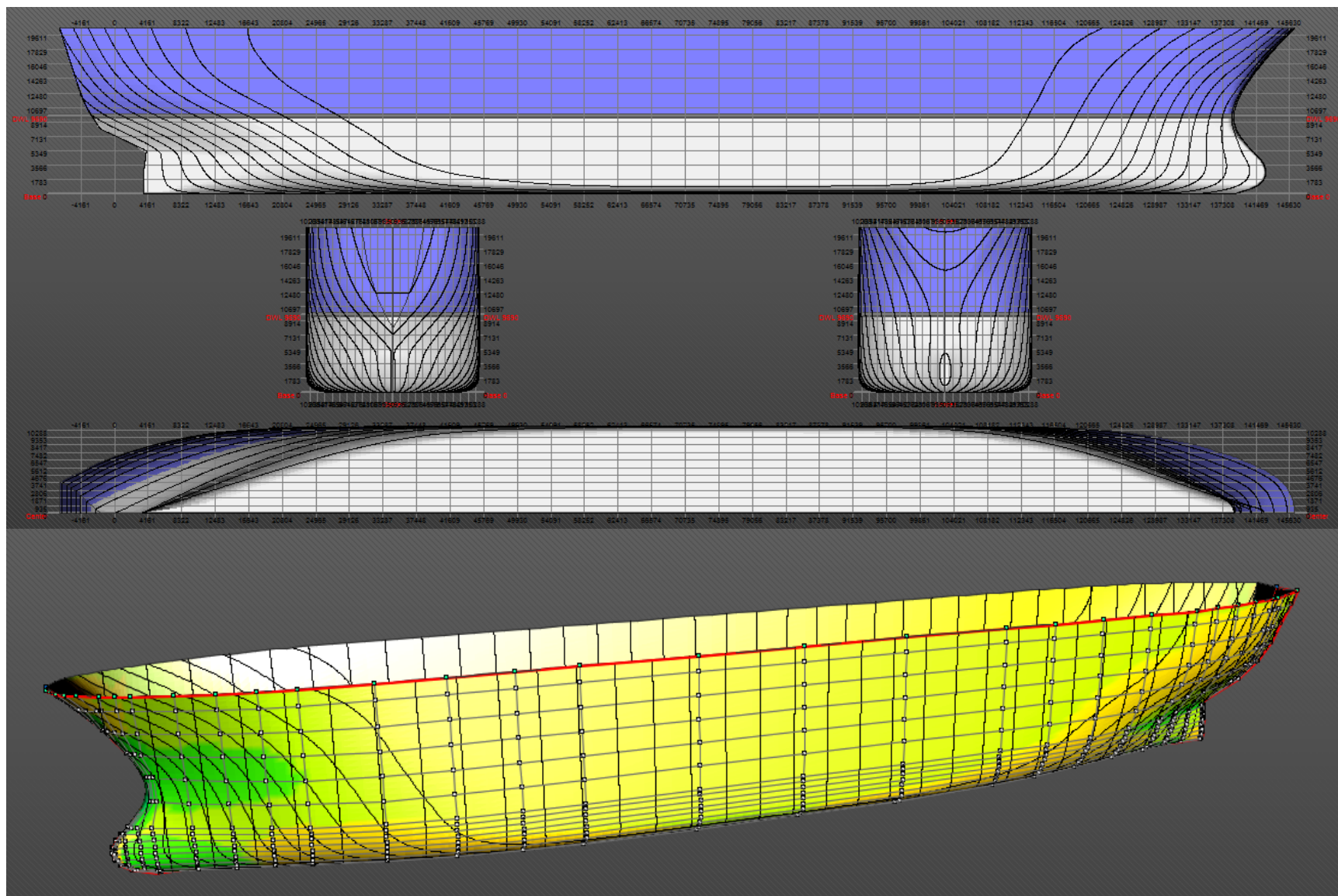
Laivo tipas	Sausakrūvis
Laivo ilgis tarp statmenų L, m	153,06
Laivo plotis b, m	21,38
Laivo grimzlė T, m	9,69
Laivo vandentalpa ∇, m^3	22637
Laivo pilnumo koeficientas C_b	0,745

Suprojektuojamam laivui parengtas laivapriekis su bulbu, trancinis laivagalis, tiesi denio linija (25 pav., 26 pav.). Tokia laivo forma būdinga daugeliui sausakrūvių laivų.



25 pav. Skaičiuojamo laivo forma

Laivo grimzlė pasirinkta mažesnė už maksimalią leistiną grimzlę Klaipėdos uoste. Taip pasirinkau su tikslu keisti gylis Klaipėdos uoste. Kadangi tikslas yra nustatyti kaip laive pasireiškia nusėdimo reiškinys, keisiu du parametrus: vandens gylį ir laivo greitį. Uosto gylis kis nuo 11,5 iki 14,5 metrų, todėl 9,69 m laivo grimzlė yra optimali. Laivo parametrai visi išliks nekeičiami, keisiu tik laivo plaukimo greitį, kuris bus nuo 2,0 iki 4,0 m/s.



26 pav. Skaiciuojamo laivo teorinis brėžinys

VII. LAIVO NUSĖDIMO MATEMATINIS EKSPERIMENTAS

Darbo tikslas yra apskaičiuoti laivo nusėdimą Klaipėdos uoste. Klaipėdos uosto gylis 14,5 m. Kadangi nustatytas minimalus klirensas uoste 1,5m, maksimalus laivas, galintis įplaukti į Klaipėdos uostą, privalo turėti nedidesnę kaip 13,0 m grimzlę. Tačiau vienas skaičiavimas, atliktas su maksimaliu greičiu, leistinu Klaipėdos uoste, ir maksimalia laivo grimzle, mažai atskleis pačią laivo elgseną. Todėl šiek tiek praplėsiu skaičiavimus, kad gaučiau tendencijas.

Kadangi laivo parametrus keisti būtų gana sudėtinga, skaičiavimuose keisiu uosto gylį. Skaičiavimuose bus naudojamas uosto gylis nuo 11,5 ir 14,5 metrų. Tuomet projektuojamas laivas taip pat bus mažesnis nei leistinas maksimalus Klaipėdos uoste. Laivo parametrai bus tokie kaip nurodyta skyriuje aukščiau. Skaičiavimus atliksiu klirensui esant nuo 1,8 m iki 4,8 m. Greitį keisiu nuo 2 m/s iki maksimalaus leistino Klaipėdos uoste – 4 m/s. Skaičiavimų duomenys pateikti 8 lentelėje.

8 lentelė. Skaičiavimuose naudojami parametrai

Laivo greitis, m/s	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
Uosto gylis, m	11,5	12,5	13,5	14,5	

7.1. Laivo nusėdimo skaičiavimas empirinėmis formulėmis

Laivo nusėdimo skaičiavimas B. Barrass (1) metodu (B1)

Mokslininkas pateikia dvi skirtingas nusėdimo skaičiavimo formules neapribotame kanale. Viena formulė yra konkrečiai skirta skaičiavimams neapribotuose kanaluose, kita universali – tinka ir tam ir tam. Jos pagrindu skiriasi dėl santykinio kanalo dydžio koeficiento S. Idėja ta, kad kanalo pločiui B esant santykinai dideliame, koeficientas S tampa nereikšmingu.

Mano skaičiavimus labiausiai atitiktų formulė, skirta skaičiuoti atviraime vandenyje. Tačiau pagal sąlygą, kad H/T santykis turi būti tarp 1,1 ir 1,4, negalėsiu atlikti visų skaičiavimų.

Pirmuoju B. Barrass metodu atlikti skaičiavimai:

$$\frac{H}{T} = \frac{11,5}{9,69} = 1,19;$$

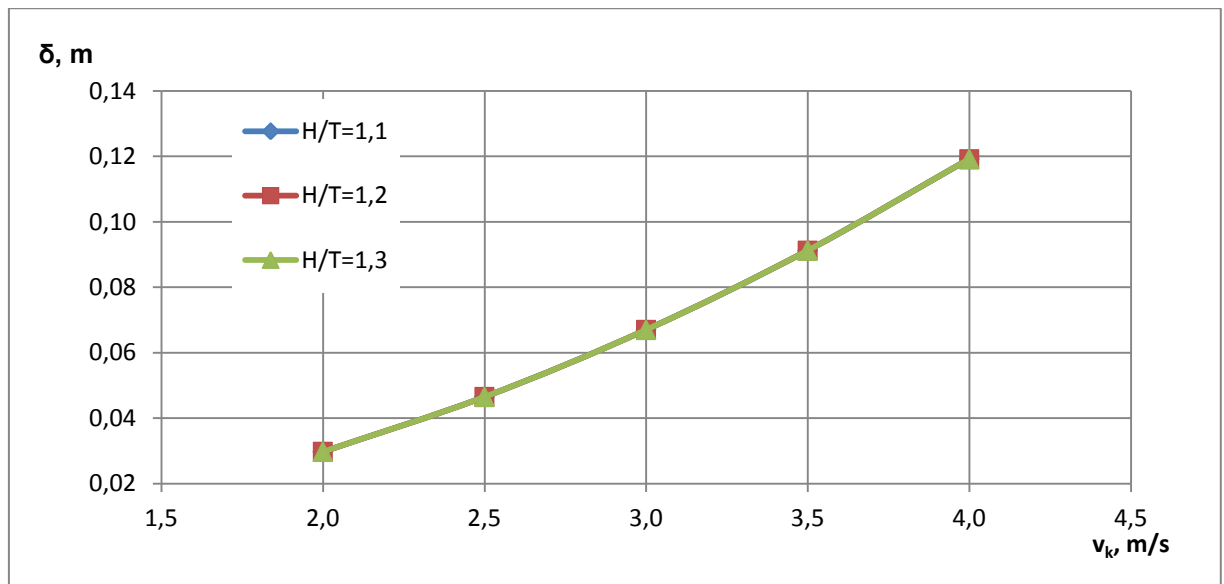
Santykis 1,19 yra leistinas, todėl skaičiuojame laivo nusėdimą pagal 8 formulę:

$$\delta_{max} = \frac{0,745 \cdot 2^2}{100} = 0,0298 \text{ m.}$$

Visi skaičiavimai, esant skirtingiems duomenims, pateikti 9 lentelėje.

9 lentelė. Skaičiavimo rezultatai B. Barrass 1 metodu

Gylis H, m	Greitis v_k , m/s	Santykis H/T	Laivo nusėdimas δ_{max} , m
11,5	2,0	1,19	0,03
11,5	2,5	1,19	0,05
11,5	3,0	1,19	0,07
11,5	3,5	1,19	0,09
11,5	4,0	1,19	0,12
12,5	2,0	1,29	0,03
12,5	2,5	1,29	0,05
12,5	3,0	1,29	0,07
12,5	3,5	1,29	0,09
12,5	4,0	1,29	0,12
13,5	2,0	1,40	0,03
13,5	2,5	1,40	0,05
13,5	3,0	1,40	0,07
13,5	3,5	1,40	0,09
13,5	4,0	1,40	0,12
14,5	2,0	1,50	X
14,5	2,5	1,50	X
14,5	3,0	1,50	X
14,5	3,5	1,50	X
14,5	4,0	1,50	X



27 pav. Skaičiavimo rezultatai B. Barrass 1 metodu

Pagal šią formulę apskaičiuotas laivo nusėdimas yra gana netikslus, kadangi yra vertinamas ne gylis, o imama gylių imtis. Mano atveju, uosto gyliui esant nuo 11,5 m iki 13,5 m, pats gylis nėra vertinamas. Formulėje kinta tik laivo greitis.

Laivo nusėdimo skaičiavimas B. Barrass (2) metodu (B2)

B. Barrass siūlo formulę, skirtą skaičiuoti laivo nusėdimą kanaluose ir atviruose kanaluose. Formulę naudojant atvirų kanalų skaičiavimuose, mokslininkas taip pat pateikia formulę, kuria apskaičiuojamas įtaką turinčio vandens kiekis B.

Mano skaičiavimai, naudojant 5, 6 bei 7 formules:

$$B = (7,7 + 20(1 - 0,745)^2) \cdot 9,69 = 87,21 \text{ m},$$

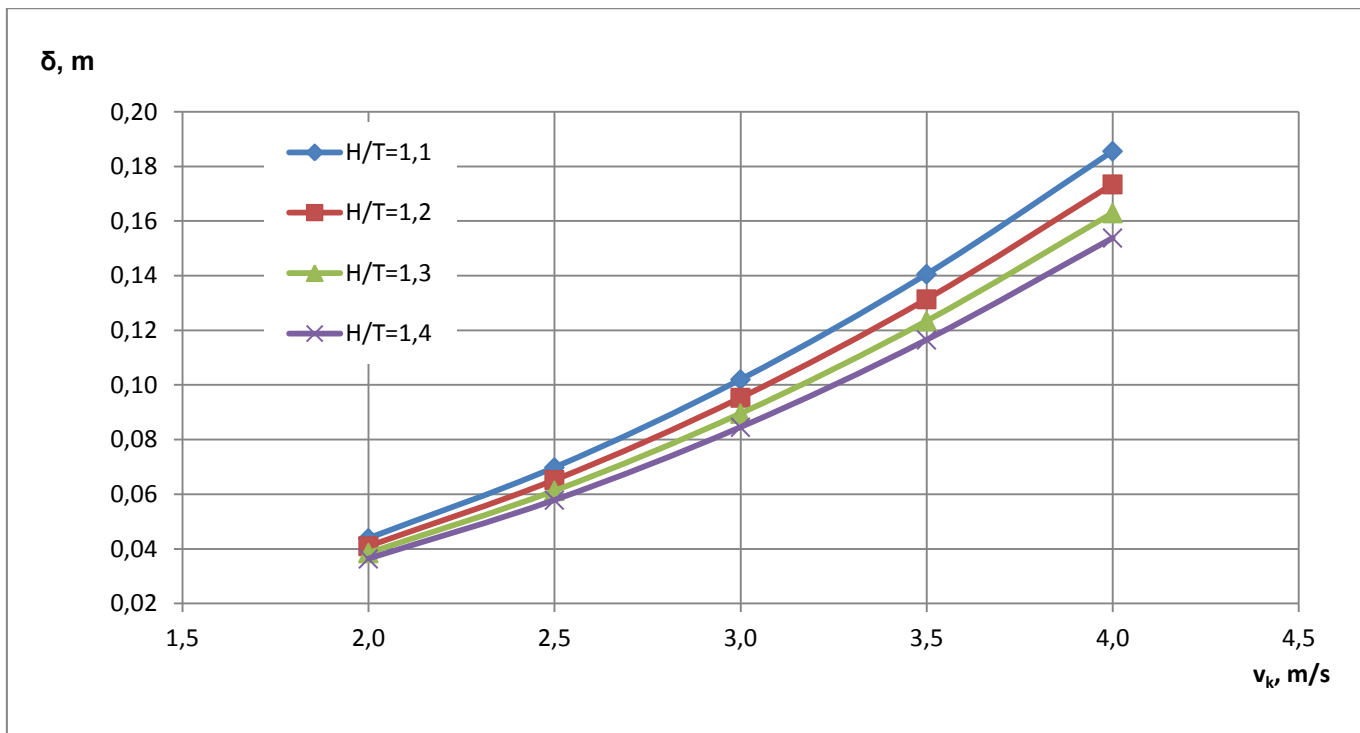
$$S = \frac{21,38 \cdot 9,69}{87,21 \cdot 11,5} = 0,21,$$

$$\delta_{max} = \frac{0,745 \cdot 0,21^{0,81} \cdot 2^{2,08}}{20} = 0,04 \text{ m}.$$

Visi skaičiavimai, esant skirtingiems duomenims, pateikti 10 lentelėje.

10 lentelė. Skaičiavimo rezultatai B. Barrass 2 metodu

Gylis H, m	Greitis v_k m/s	Kanalo plotis B, m	Santykinis kanalo dydis S	Nusėdimas δ, m
11,5	2,0	87,21	0,21	0,04
11,5	2,5	87,21	0,21	0,07
11,5	3,0	87,21	0,21	0,10
11,5	3,5	87,21	0,21	0,14
11,5	4,0	87,21	0,21	0,19
12,5	2,0	87,21	0,19	0,04
12,5	2,5	87,21	0,19	0,07
12,5	3,0	87,21	0,19	0,10
12,5	3,5	87,21	0,19	0,13
12,5	4,0	87,21	0,19	0,17
13,5	2,0	87,21	0,18	0,04
13,5	2,5	87,21	0,18	0,06
13,5	3,0	87,21	0,18	0,09
13,5	3,5	87,21	0,18	0,12
13,5	4,0	87,21	0,18	0,16
14,5	2,0	87,21	0,16	0,04
14,5	2,5	87,21	0,16	0,06
14,5	3,0	87,21	0,16	0,08
14,5	3,5	87,21	0,16	0,12
14,5	4,0	87,21	0,16	0,15



28 pav. Skaičiavimo rezultatai B. Barrass 2 metodu

Laivo nusėdimo skaičiavimas Eryuzlu ir Hausser metodu (EH)

Mokslininkų pateikta formulė tinka skaičiuoti laivo nusėdimą neapribotame kanale. Pagal 18 formulę atlikti skaičiavimai pagal mano laivo bei uosto duomenis.

1. Uosto gylis H 11,5 m, laivo greitis v_k 2 m/s. Frūdo skaičius randamas 17 formule:

$$F_{nh} = \frac{2}{\sqrt{9,81 \cdot 11,5}} = 0,188 ;$$

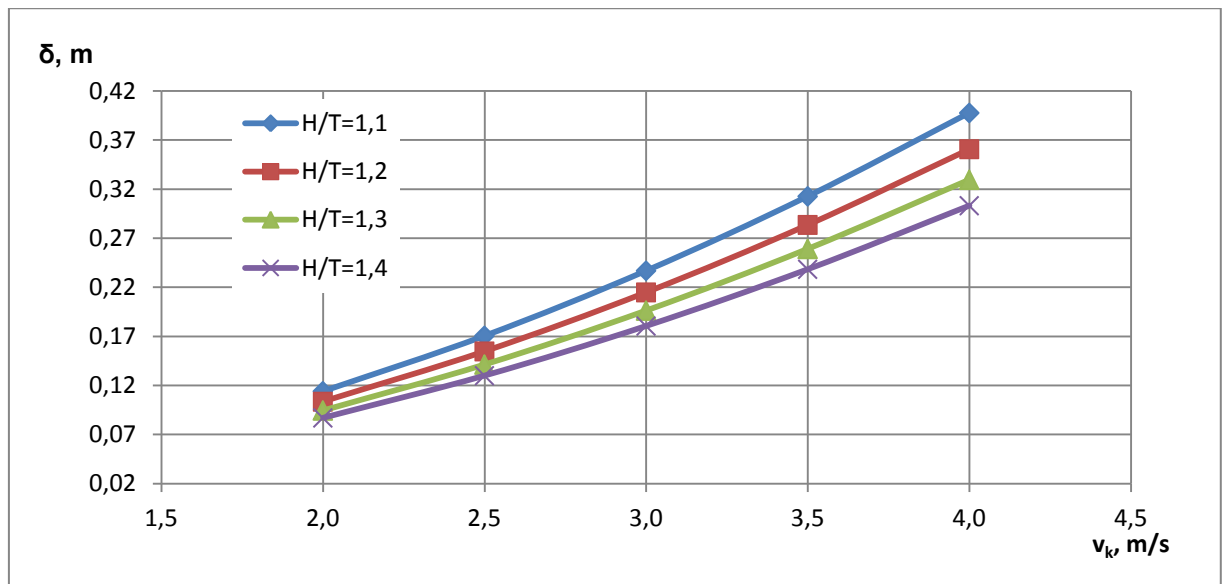
Tuomet laivo nusėdimas δ :

$$\delta = 0,113 \cdot 21,38 \left(\frac{1}{11,5/9,69} \right)^{0,27} 0,188^{1,8} = 0,11 \text{ m.}$$

Visi skaičiavimai atlikti esant skirtingiems greičiams bei gyliams, pateikti 11 lentelėje.

11 lentelė. Skaičiavimo rezultatai Eryuzlu ir Hausser metodu

Gylis H, m	Greitis v_k , m/s	Frūdo skaičius F_{nh}	Nusėdimas δ , m
11,5	2,0	0,188	0,11
11,5	2,5	0,235	0,17
11,5	3,0	0,282	0,24
11,5	3,5	0,330	0,31
11,5	4,0	0,377	0,40
12,5	2,0	0,181	0,10
12,5	2,5	0,226	0,15
12,5	3,0	0,271	0,21
12,5	3,5	0,316	0,28
12,5	4,0	0,361	0,36
13,5	2,0	0,174	0,09
13,5	2,5	0,217	0,14
13,5	3,0	0,261	0,20
13,5	3,5	0,304	0,26
13,5	4,0	0,348	0,33
14,5	2,0	0,168	0,09
14,5	2,5	0,210	0,13
14,5	3,0	0,252	0,18
14,5	3,5	0,293	0,24
14,5	4,0	0,335	0,30



29 pav. Skaičiavimo rezultatai Eryuzlu ir Hausser metodu

Laivo nusėdimo skaičiavimas Eryuzlu metodu (E)

Eryuzlu formulė skirta skaičiuoti sausakrūvio laivo, turinčio priekinę bulbą, nusėdimą. Mano skaičiuojamas laivas atitinka reikalavimus, todėl skaičiavimus atlieku 19 formule. Kadangi skaičiuojamas laivas plaukia plačiu Klaipėdos uostu, kur kanalo plotis daugiau nei 9,61 kartų didesnis už laivo plotį, priimu $K_b=1$.

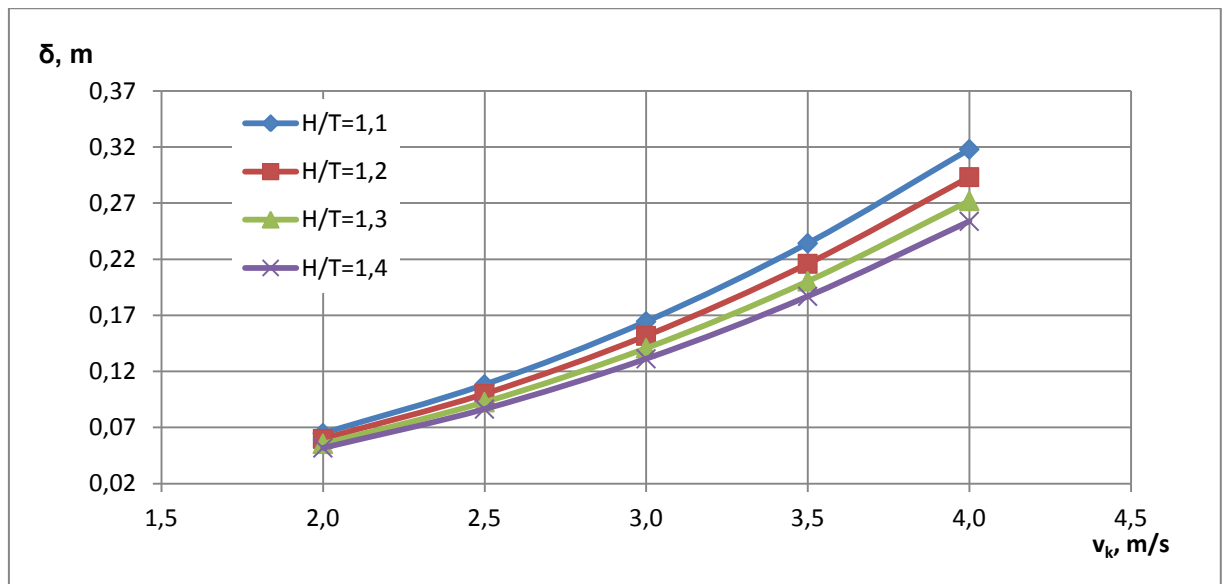
1. Uosto gylis H 11,5 m, laivo greitis v_k 2 m/s. Laivo nusėdimas randamas 19 formule:

$$\delta = 0,298 \frac{11,5^2}{9,69} \left(\frac{2}{\sqrt{9,81 \cdot 9,69}} \right)^{2,289} \left(\frac{11,5}{9,69} \right)^{-2,972} \cdot 1 = 0,07 \text{ m.}$$

Visi skaičiavimai atlikti esant skirtingiems greičiams bei gyliams, pateikti 12 lentelėje.

12 lentelė. Skaiciavimo rezultatai Eryuzlu metodu

Gylis H, m	Greitis v_k , m/s	Nusėdimas δ , m
11,5	2,0	0,07
11,5	2,5	0,11
11,5	3,0	0,16
11,5	3,5	0,23
11,5	4,0	0,32
12,5	2,0	0,06
12,5	2,5	0,10
12,5	3,0	0,15
12,5	3,5	0,22
12,5	4,0	0,29
13,5	2,0	0,06
13,5	2,5	0,09
13,5	3,0	0,14
13,5	3,5	0,20
13,5	4,0	0,27
14,5	2,0	0,05
14,5	2,5	0,09
14,5	3,0	0,13
14,5	3,5	0,19
14,5	4,0	0,25



30 pav. Skaičiavimo rezultatai Eryuzlu metodu

Laivo nusėdimo skaičiavimai Hooft metodu (H)

Mokslininko papildyta formulė tinka skaičiuoti laivo nusėdima neapribotame kanale. Todėl mano atliekamam skaičiavimams ji tinka. Formulėje kintamieji yra laivo vandentalpa, ilgis bei Frūdo skaičius.

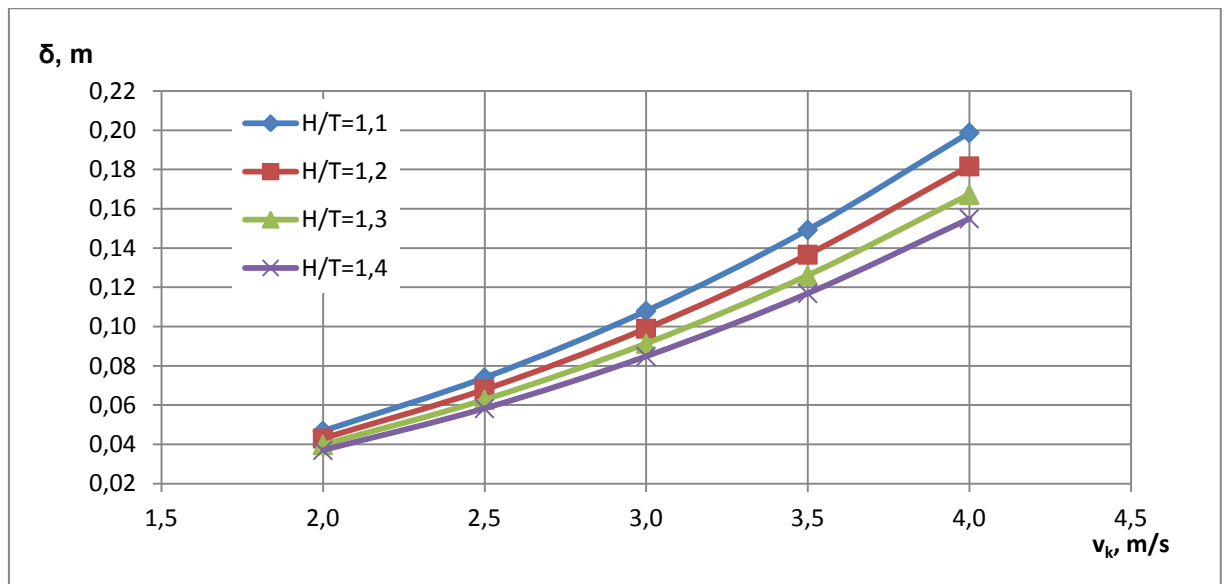
1. Uosto gylis H 11,5 m, laivo greitis v_k 2 m/s. Laivo nusėdimas randamas 21 formule:

$$\delta = 1,96 \frac{22637}{184,87^2} \cdot \frac{0,188^2}{\sqrt{1 - 0,188^2}} = 0,05 \text{ m.}$$

Visi skaičiavimai atlikti esant skirtingiems greičiams bei gyliams, pateikti 13 lentelėje.

13 lentelė. Skaičiavimo rezultatai Hooft metodu

Gylis H, m	Greitis v_k , m/s	Frūdo skaičius F_{nh}	Nusėdimas δ , m
11,5	2,0	0,188	0,05
11,5	2,5	0,235	0,07
11,5	3,0	0,282	0,11
11,5	3,5	0,330	0,15
11,5	4,0	0,377	0,20
12,5	2,0	0,181	0,04
12,5	2,5	0,226	0,07
12,5	3,0	0,271	0,10
12,5	3,5	0,316	0,14
12,5	4,0	0,361	0,18
13,5	2,0	0,174	0,04
13,5	2,5	0,217	0,06
13,5	3,0	0,261	0,09
13,5	3,5	0,304	0,13
13,5	4,0	0,348	0,17
14,5	2,0	0,168	0,04
14,5	2,5	0,210	0,06
14,5	3,0	0,252	0,08
14,5	3,5	0,293	0,12
14,5	4,0	0,335	0,16



31 pav. Skaičiavimo rezultatai Hoofit metodu

Laivo nusėdimo skaičiavimai Japonų metodu (J)

Nusėdimą sėkliame vandenyje taip pat galima apskaičiuoti japonų pasiūlyta formule, kuri įvertina laivo parametrus (grimzlę, ilgį, plotį, pilnumo koeficientą), uosto parametrus (gylis) bei laivo greitį.

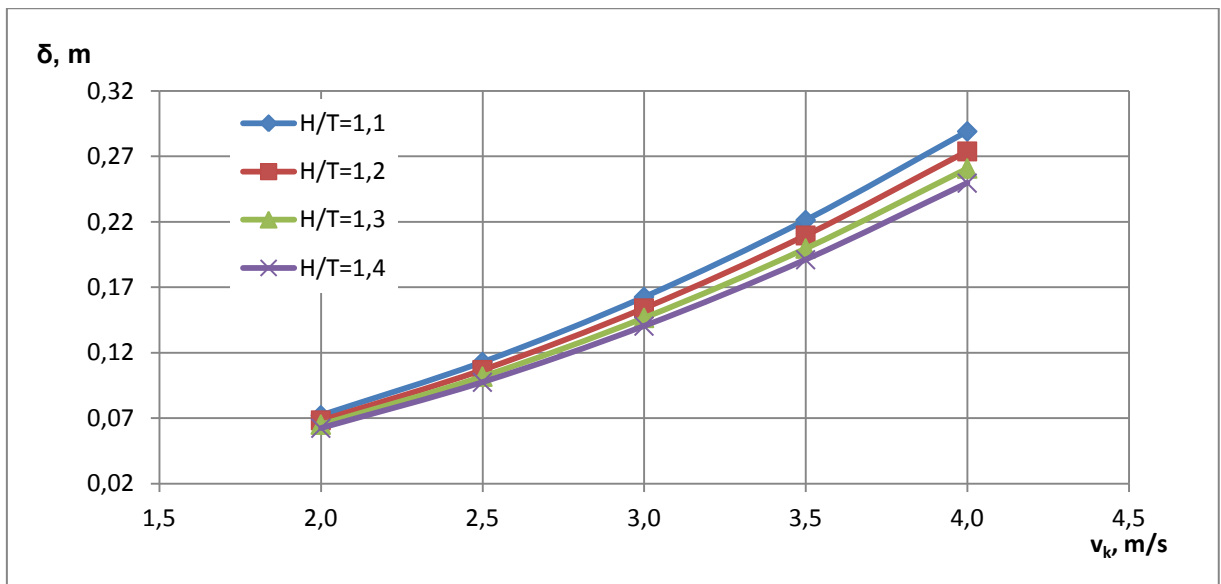
1. Uosto gylis H 11,5 m, laivo greitis v_k 2 m/s. Laivo nusėdimas randamas 24 formule:

$$\delta = \left(\left(0,7 + 1,5 \frac{1}{\frac{11,5}{9,69}} \right) \left(\frac{0,745}{\frac{184,87}{21,38}} \right) + 15 \frac{1}{\frac{11,5}{9,69}} \left(\frac{0,745}{\frac{184,87}{21,38}} \right)^3 \right) \frac{2^2}{9,81} = 0,07 \text{ m.}$$

Visi skaičiavimai atlikti esant skirtingiems greičiams bei gyliams, pateikti 14lentelėje.

14 lentelė. Skaičiavimo rezultatai japonų metodu

Gylis H, m	Greitis v_k , m/s	Nusėdimas δ , m
11,5	2,0	0,07
11,5	2,5	0,11
11,5	3,0	0,16
11,5	3,5	0,22
11,5	4,0	0,29
12,5	2,0	0,07
12,5	2,5	0,11
12,5	3,0	0,15
12,5	3,5	0,21
12,5	4,0	0,27
13,5	2,0	0,07
13,5	2,5	0,10
13,5	3,0	0,15
13,5	3,5	0,20
13,5	4,0	0,26
14,5	2,0	0,06
14,5	2,5	0,10
14,5	3,0	0,14
14,5	3,5	0,19
14,5	4,0	0,25



32 pav. Skaičiavimo rezultatai japonų metodu

Laivo nusėdimo skaičiavimai Millward metodu (M)

Mokslininko pasiūlyta formulė apibrėžia nusėdimo reiškinio priklausomybę nuo laivo parametrų (ilgis, plotis), tačiau gylis ir greitis apibrėžiamas tik per Frūdo skaičių, o laivo grimzlė visai nėra vertinama. Mano skaičiavimai atlikti Millward metodu pateikti žemiau.

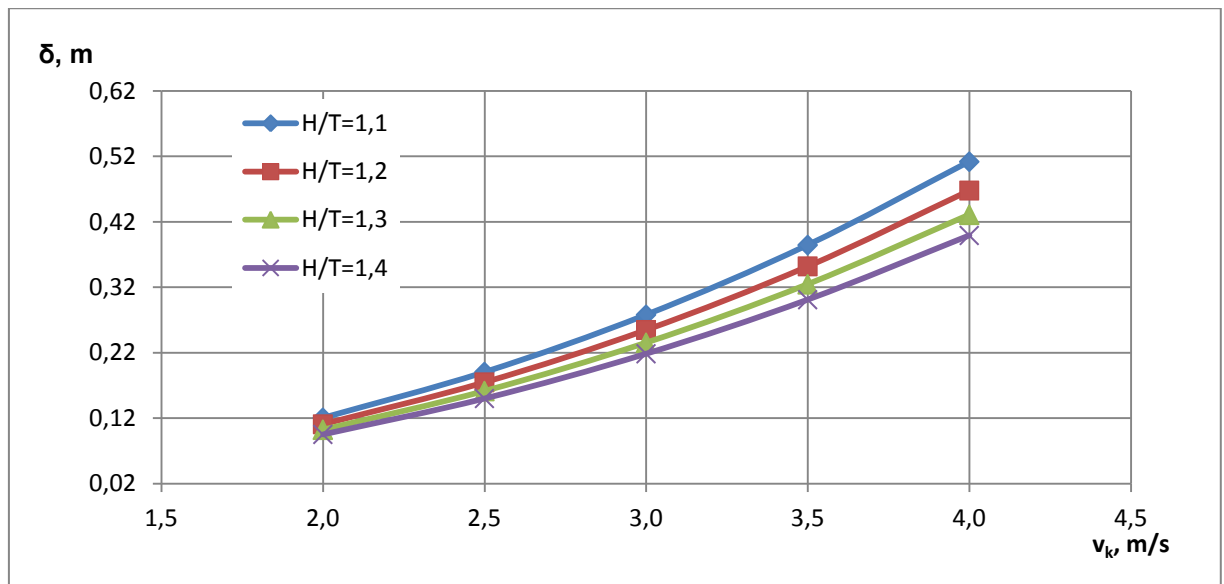
1. Uosto gylis H 11,5 m, laivo greitis v_k 2 m/s. Laivo nusėdimas randamas 26 formule:

$$\delta = 0,01 \cdot 184,87 \cdot \left(15 \cdot 0,745 \cdot \frac{1}{184,87/9,69} - 0,6 \right) \frac{0,188^2}{\sqrt{1 - 0,188^2}} = 0,12 \text{ m.}$$

Visi skaičiavimai atlikti esant skirtingiems greičiams bei gyliams, pateikti 15 lentelėje.

15 lentelė. Skaičiavimo rezultatai Millward metodu

Gylis H, m	Greitis v_k , m/s	Frūdo skaičius F_{nh}	Nusėdimas δ , m
11,5	2,0	0,188	0,12
11,5	2,5	0,235	0,19
11,5	3,0	0,282	0,28
11,5	3,5	0,330	0,38
11,5	4,0	0,377	0,51
12,5	2,0	0,181	0,11
12,5	2,5	0,226	0,18
12,5	3,0	0,271	0,26
12,5	3,5	0,316	0,35
12,5	4,0	0,361	0,47
13,5	2,0	0,174	0,10
13,5	2,5	0,217	0,16
13,5	3,0	0,261	0,24
13,5	3,5	0,304	0,32
13,5	4,0	0,348	0,43
14,5	2,0	0,168	0,10
14,5	2,5	0,210	0,15
14,5	3,0	0,252	0,22
14,5	3,5	0,293	0,30
14,5	4,0	0,335	0,40



33 pav. Skaičiavimo rezultatai Millward metodu

Laivo nusėdimo skaičiavimai Norrbin metodu (N)

Mokslininko pasiūlyta formulė tinka skaičiuoti laivo nusėdimą kai Frūdo skaičius yra mažesnis nei 0,4. Mano atveju, skaičiavimus galėsiu atlikti su visais skirtingais parametrais.

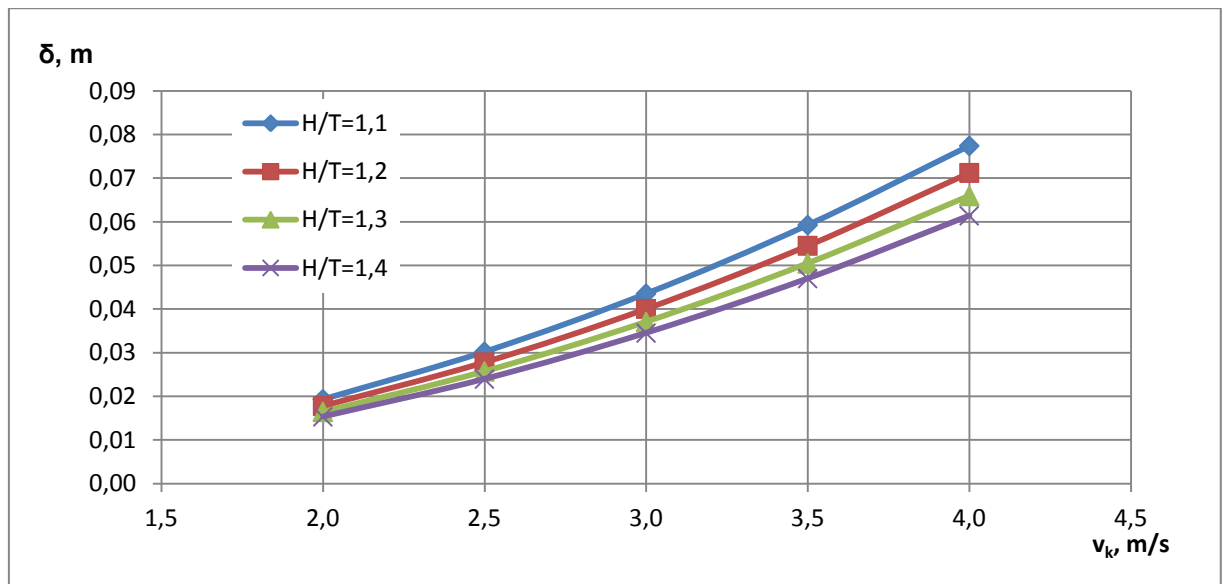
1. Uosto gylis H 11,5 m, laivo greitis v_k 2 m/s. Laivo nusėdimas randamas 27 formule:

$$\delta = \frac{0,745}{15} \left(\frac{1}{184,87/21,38} \right) \left(\frac{1}{11,5/9,69} \right)^2 = 0,02 \text{ m.}$$

Visi skaičiavimai atlikti esant skirtingiems greičiams bei gyliams, pateikti 16 lentelėje.

16 lentelė. Skaiciavimo rezultatai Norrbina metodu

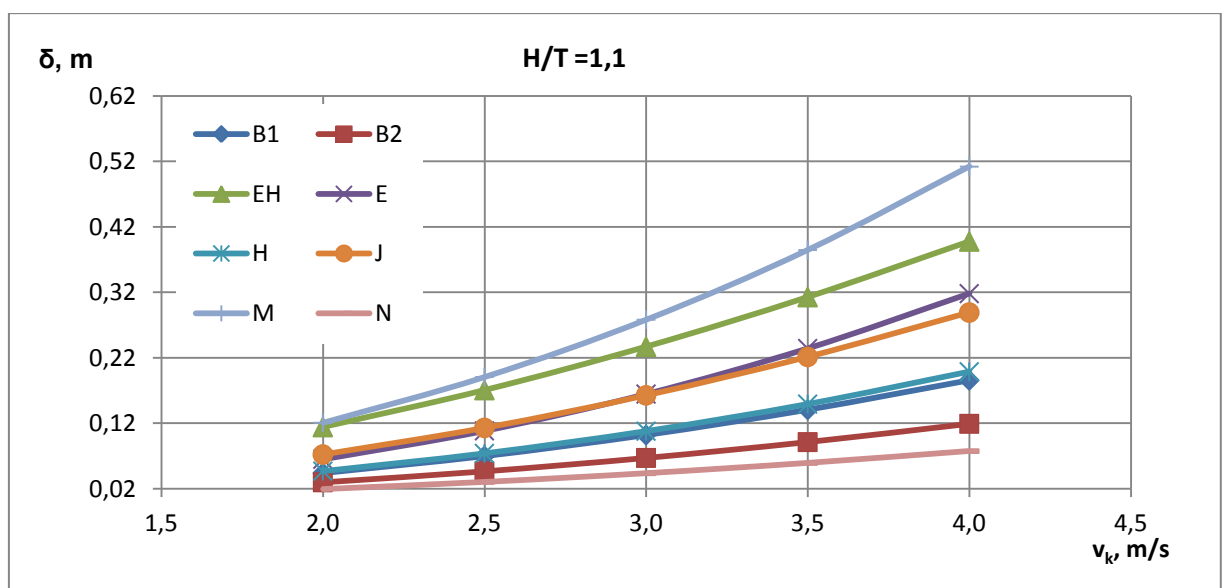
Gylis H, m	Greitis v_k , m/s	Frūdo skaičius F_{nh}	Nusėdimas δ , m
11,5	2,0	0,188	0,02
11,5	2,5	0,235	0,03
11,5	3,0	0,282	0,04
11,5	3,5	0,330	0,06
11,5	4,0	0,377	0,08
12,5	2,0	0,181	0,02
12,5	2,5	0,226	0,03
12,5	3,0	0,271	0,04
12,5	3,5	0,316	0,05
12,5	4,0	0,361	0,07
13,5	2,0	0,174	0,02
13,5	2,5	0,217	0,03
13,5	3,0	0,261	0,04
13,5	3,5	0,304	0,05
13,5	4,0	0,348	0,07
14,5	2,0	0,168	0,02
14,5	2,5	0,210	0,02
14,5	3,0	0,252	0,03
14,5	3,5	0,293	0,05
14,5	4,0	0,335	0,06

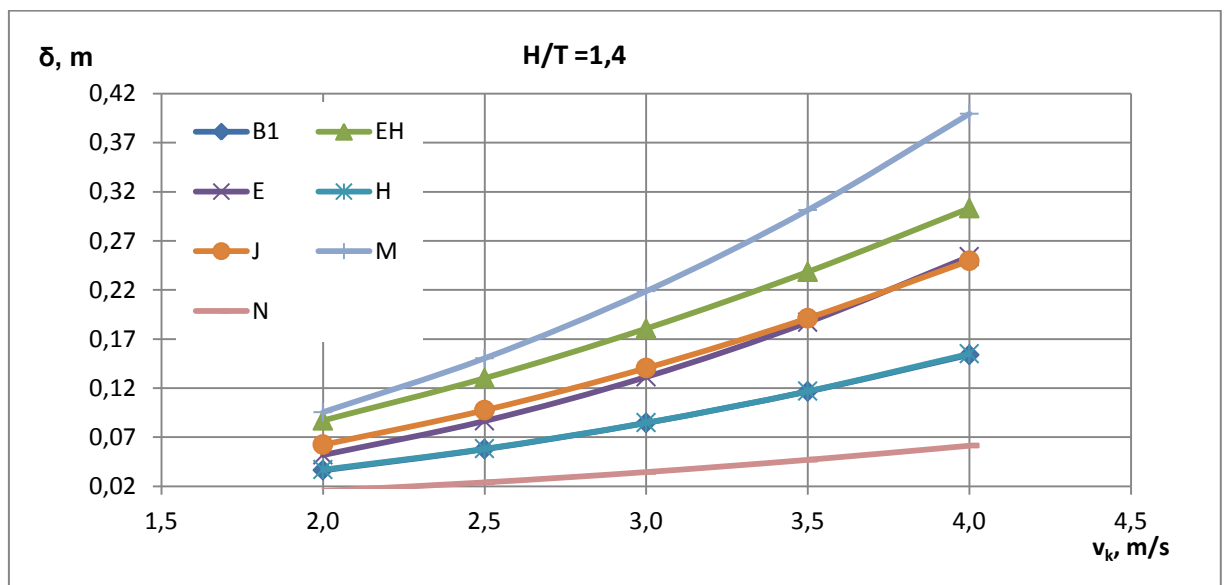
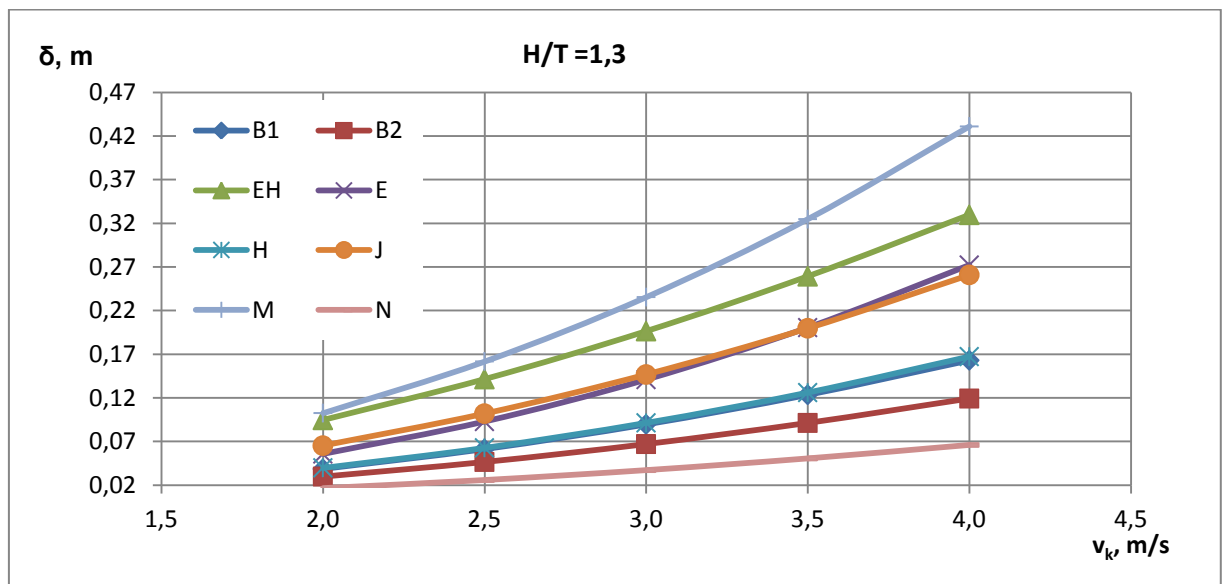
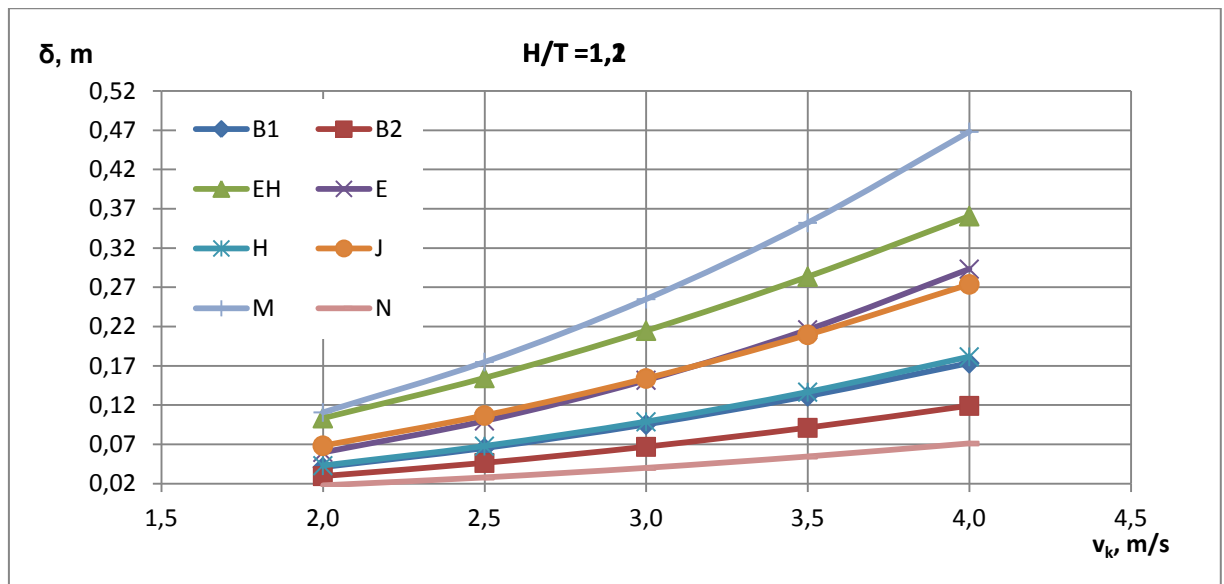


34 pav. Skaičiavimo rezultatai Norrbin metodu

7.2. Klasikinių laivo nusėdimo vertinimo metodikų palyginimas

Mokslininkų siūlomi skaičiavimai labai skirtingi. Taip pat skirtingi ir rezultatai. Akivaizdu, kad šios mokslininkų pateiktos formulės nėra tikslios ir norint sužinoti tikrąjį laivo nusėdimą vien formulėmis vadovautis neužtenka. Mokslininkai prie išvestų formulių pateikia tam tikras sąlygas, kaip pavyzdys, kad tinka tik tais atvejais, kai laivas laivapriekyje turi bulbą, tačiau imant bendrąją prasme rezultatai vis tiek mažo tikslumo. Žemiau pateikiu grafikus, kuriuose palyginami skirtingų skaičiavimų rezultatai.





35 pav. Klasikinių skaičiavimo rezultatų palyginimas

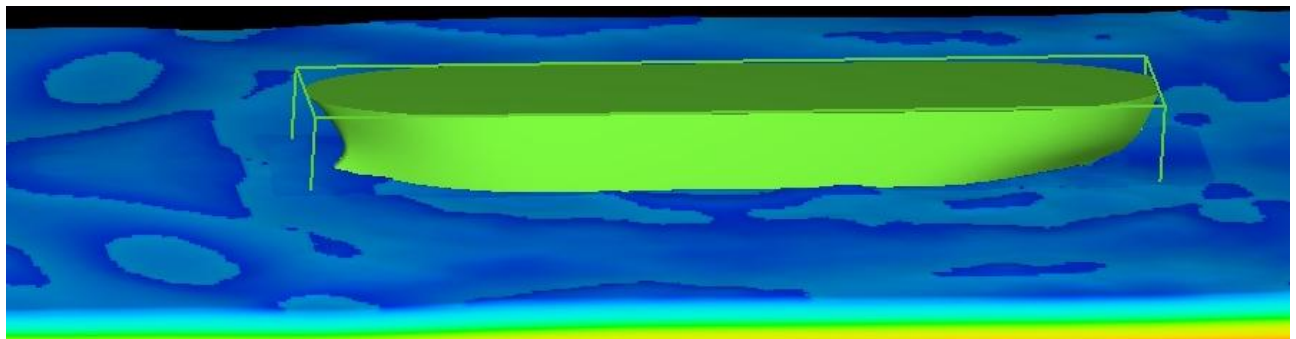
7.3. Laivo nusėdimo skaičiavimas Flow 3D programa

Flow 3D programą, skirtą skaičiuoti skysčių dinamiką, pasirinkau dėl plataus pritaikymo spektro. Programa suteikia galimybę importuoti Free ship programa brėžtą mano laivo korpusą. Nustatau atitinkamo dydžio aptekancio vandens kiekį, kad skaičiavimai būtų pakankamai tikslūs, išskiriu du skirtingus tinklelius: pirmasis tinklelis (280 x 120 x 30 m) su stambesniu tinkleliu, antrasis (170 x 26 x 24 m) šiek tiek smulkesniu. Kadangi darbo tikslas yra nustatyti laivo nusėdimą, ant laivo korpuso uždedu tris taškus, pagal kuriuos matysiu laivo judėjimą vertikale kryptimi. Nustatęs likusius parametrus pradedu skaičiavimą, o programa laiko momentu pateikia kintančias nustatytų taškų koordinates skirtingo laiko momentais. Rezultatus vizualiai galima stebėti 3D vizualizacija (36 pav), tačiau daryti išvadas galima atsižvelgus į tikslas reikšmes. 16 lentelėje pateikiu trijų taškų maksimalų nusėdimą esant skirtingiems parametrams.

Pagal gautus rezultatus matome, kad laivo nusėdimas labai įvairus esant skirtingiems parametrams. Tačiau akivaizdu, kad jį skaičiuoti būtina. Tarkime laivui plaukiant 11,5 metrų gylyje 3,0 ; 3,5; 4,0 m/s greičiu, nusėdimas toks didelis, kad laivas korpusu liečia dugną. Taigi net esant 1,82 m gyliui, pagal atliktus skaičiavimus nėra saugu plaukti maksimaliu leistinu greičiu Klaipėdos uoste. Laivas taip pat lietė dugną plaukdamas 12,5 m gylyje 3,5 ir 4,0 m/s greičiais. Maksimalus laivo nusėdimas pagal atliktus skaičiavimus siekė net 2,82 m.

Skaičiavimai taip pat atskleidžia, kad nusėdimas skaičiuotam laivui labiausiai pasireiškia į laivagalį. Daugeliu atvejų laivapriekis netik liko toje pačioje padėtyje, tačiau ženkliai pakilo vertikaliai aukštin. Maksimalus laivapriekio pakilimas pradinės padėties atžvilgiu 2,09 m. Laivapriekis daugiausia kilo į viršų esant mažesniems greičiams bei mažesniai H/T santykiui.

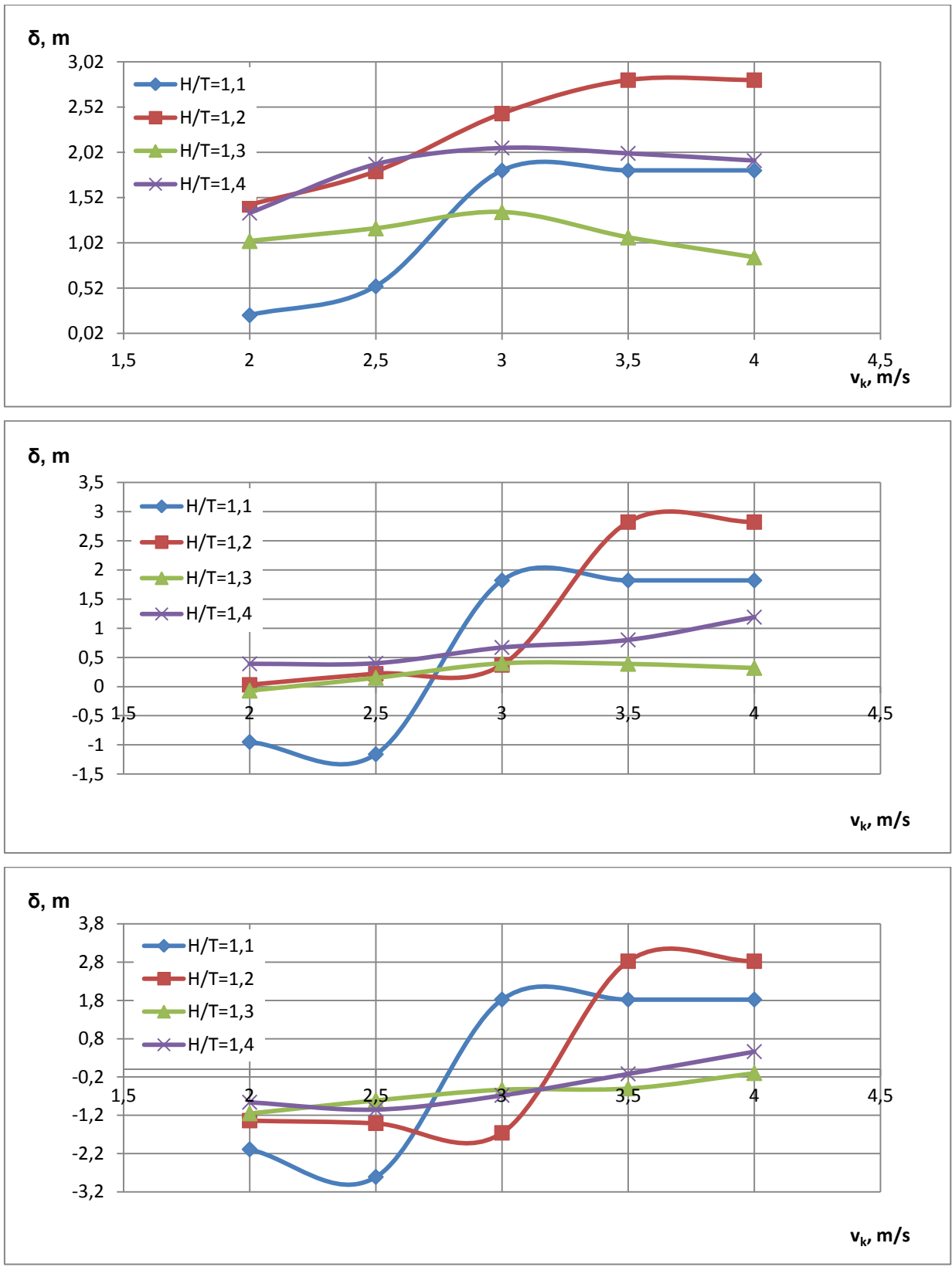
Gautus rezultatus pateikiu 37 paveiksle. Rezultatai nėra tokie tikslūs ir nuoseklūs kaip empirinėmis formulėmis. Tam įtakos turi labai daug veiksnių, aptartų anksčiau. Pagrindė, laivo povandeninės dalies forma, laivapriekis bei laivagalis, laivo diferentas.



36 pav. Laivo nusėdimo grafinė vizualizacija

17 lentelė. Skaičiavimo rezultatai Flow 3D programa

Gylis H, m	Greitis v_k, m/s	Nusėdimas laivapriekyje, m	Nusėdimas midelyje, m	Nusėdimas laivagalyje, m
11,5	2,0	-2.09	-0.95	0.22
11,5	2,5	-2.81	-1.16	0.54
11,5	3,0	1.82	1.82	1.82
11,5	3,5	1.82	1.82	1.82
11,5	4,0	1.82	1.82	1.82
12,5	2,0	-1.34	0.03	1.44
12,5	2,5	-1.41	0.22	1.81
12,5	3,0	-1.66	0.37	2.45
12,5	3,5	2.82	2.82	2.82
12,5	4,0	2.82	2.82	2.82
13,5	2,0	-1.15	-0.07	1.04
13,5	2,5	-0.81	0.15	1.18
13,5	3,0	-0.53	0.4	1.36
13,5	3,5	-0.5	0.39	1.08
13,5	4,0	-0.1	0.32	0.86
14,5	2,0	-0.86	0.39	1.35
14,5	2,5	-1.05	0.4	1.89
14,5	3,0	-0.68	0.67	2.07
14,5	3,5	-0.12	0.8	2.01
14,5	4,0	0.46	1.19	1.93



37 pav. Skaiciavimo rezultatai Flow 3D programa

ATLIKTŲ TYRIMŲ REZULTATŲ ANALIZĖ

Atlikus tyrimus tapo aišku, kad laivo nusėdimo problema yra sudėtingas tačiau labai reikšmingas laivybai reiškinys. Sudėtingas todėl, kad yra labai daug faktorių, lemiančių nusėdimo dydį. Apžvelgus mokslininkų atliktus laivo nusėdimo tyrimus tapo aišku, kad svarbu atsižvelgti į laivo greitį, kanalo gylį bei plotį, laivo ilgį, greitį, formą ir panašiai. Atlikus skaičiavimus fluidų dinamikos programa paaiškėjo, kad nusėdimas priklauso nuo kur kas daugiau faktorių. Jeigu laivo nusėdimas skaičiuojant empirinėmis formulėmis siekė nuo 0,08 m iki 0,51 m (skaičiavimus atliekant skirtingomis mokslininkų formulėmis) esant 1,82 m klirensui ir 4 m/s laivo greičiui, tomis pačiomis sąlygomis rezultatai fluidų dinamikos programa parodė, kad laivas pasiekė 1,82 m nusėdimą ir trenkėsi korpusu į dugną. Akivaizdu, kad empirinėmis formulėmis neįmanoma įvertinti visų faktorių, kurie lemia laivo nusėdimą jam plaukiant sekliu vandenyje.

Visi skaičiavimai atskleidė tą patį dėsningumą: laivo nusėdimas didesnis esant mažesniai klirensui. Taip pat nusėdimas didėja didėjant laivo greičiui. Empirinėmis formulėmis gauti rezultatai atskleidžia, kad tarp laivo nusėdimo ir laivo greičio yra tiesinė ar eksponentinė priklausomybė. Tarp uosto gylio bei laivo nusėdimo – dažniausiai tiesinė priklausomybė. Flow 3D programa gauti rezultatai pateikia šiek tiek kitokias išvadas. Kadangi nusėdimas yra kelis kartus didesnis nei empirinėmis formulėmis, grafikai ne visai atskleidžia realią situaciją. Nusėdimas taip pat yra didžiausias esant mažiausiam klirensui, tačiau tuomet laivas atsitrenkia į dugną ir daugiau nebegali nusėsti. Taip pat laivo nusėdimas auga didėjant laivo greičiui ne tiesiškai ar eksponentiškai, kadangi veikia papildomi faktoriai, tokie kaip bangavimas, diferento atsiradimas, slėgio tarp laivo bei dugno susidarymas.

Atlikus skaičiavimus fluidų dinamikos programa taip pat pastebėtas dar vienas reiškinys, laivapriekio pakilimas vertikalioje aukštyje laivui plaukiant sekliame vandenyje. Reikšmė didžiausia esant mažiausiam klirensui (didžiausiam laivagalio nusėdimui). Laivapriekis pakilo tais atvejais, kuomet laivo greitis mažesnis kaip 3,5 m/s visais uosto gyliais. Tam įtakos turėjo stipriai nusileidęs laivagalis, bangavimo pasipriešinimas ir panašūs veiksniai.

Visais skaičiuotais atvejais Flow 3D programa nusėdimas pasireiškė į laivagalį. Empirinėmis formulėmis skaičiuojant laivo nusėdimą, mokslininkai mažai pateikia būdų nustatyti laivo nusėdimo tipą. Skaičiavimo reikšmės taip pat skiriasi kelis kartus. Akivaizdu, kad empirinės klasikinės formulės nėra tikslios ir nesuteikia galimybės pilnai ištirti laivo nusėdimą. Todėl tikslinga yra atlikti skaičiavimus fluidų dinamikos programomis ir gautus rezultatus naudoti kaip esminius.

IŠVADOS

Mokslinio tiriamojo darbo tikslas, ištirti laivo nusėdimą Klaipėdos uoste, darbe pasiektas nustatytais uždaviniais. Pirmoje darbo dalyje aprašiau visus laivo nusėdimo tipus, atsiradimo priežastis, kodėl tai yra taip aktualu. Taip pat išanalizavau atliktus skirtingų mokslininkų laivo nusėdimo skaičiavimus. Siekdamas atskleisti tuo pačiu ir skirtingus būdus, laivo nusėdimui skaičiuoti, remiausi trimis pagrindiniais straipsniais, kuriuose aprašomas laivo nusėdimo nustatymas tyrimų baseine, realiems laivams atliktus matavimus bei fluidų dinamikos programa atliktus skaičiavimus. Taip pat aprašiau metodikas laivo nusėdimo skaičiavimui pagal skirtingus mokslininkus. Daug skirtingų metodų, naudojami skirtingi kintamieji formulėse įrodo, kad klasikinėmis formulėmis atlikti laivo nusėdimo skaičiavimai nėra visiškai tikslūs. Siekiant tikslesnių rezultatų būtina atlikti skaičiavimus fluidų dinamikos programomis.

Moksliniame tiriamajame darbe atlikau laivo nusėdimo skaičiavimą Klaipėdos uoste esant skirtingiems greičiams bei uosto gyliams. Rezultatai, atlikti empirinėmis formulėmis, siekė maksimaliai 0,51 m nusėdimą. Didžiausias nusėdimas pasireiškė prie mažiausio gylio esant didžiausiam greičiui. Kadangi rezultatai apskaičiuoti pagal tam tikras tendencijas, rezultatai nuosekliai išsidėstę, be didelių nukrypimų. Tačiau skirtingų formulių gausa, gautų rezultatų skirtumai verčia abejoti formulių tikslumu. Esant didžiausiam nusėdimui 0,51 m skaičiuojant Millward metodu, Norrbin metodu gauname vos 0,08 m.

Flow 3D programa atlikti skaičiavimai atskleidžia visai kitokią laivo elgseną. Maksimalus laivo nusėdimas siekia 2,82 m. Tačiau maksimalus nusėdimas gautas esant 12,5 m gyliui uoste. Pirmuoju atveju, kuomet gylis uoste buvo nustatytas 11,5 m, laivas jau esant 3,0 m/s atsitrenkė į dugną. Todėl galime teigti, kad kuo mažesnė atsarga tarp laivo dugno ir uosto dugno, tuo patiriamas nusėdimas didesnis.

Tačiau, pagal Flow 3D skysčio dinamikos programa atliktus skaičiavimus, laivo nusėdimas nėra toks nuoseklus kaip empirinėmis formulėmis. Dėl laivo korpuso formos, povandeninės dalies formos laivo elgseną plaukimo metu tiksliai nustatyti empirinėmis formulėmis yra neįmanoma. Skaičiavimai skysčių dinamikos programa pateikė skirtingas laivo padėties vertikalioje skalėje reikšmes.

Taip pat atliekant skaičiavimus Flow 3D programa pastebėjau dar vieną laivo elgseną – laivapriekio kilimą vertikaliai aukštyn. Šis reiškinys pasireiškė esant mažesniems greičiams prie visų klirenso atvejų. Kuo laivo greitis mažesnis – tuo laivapriekio pakilimas didesnis.

Atlikęs laivo nusėdimo tyrimą Klaipėdos uoste turiu pripažinti, kad nusėdimo reiškinys yra labai aktualus. Priežastys mažinti klireną yra svarios – daugiau pakrautas laivas generuoja didesnes

pajamas uostui. Tačiau atlikti skaičiavimai atskleidžia, kad šiuo metu taikomas klirensas (1,5 m) negali būti mažinamas nepriėmus papildomų sąlygų: patikslinti uosto gylių žemėlapi bei apsaugoti dugną nuo sąnašų, esant nedideliame klirensui mažinti laivo greitį iki minimalaus, atlikti laivo nusėdimo skaičiavimus fluidų dinamikos programomis.

Laivo nusėdimo dydžio nustatymas yra sudėtingas procesas, tačiau dėl saugios laivininkystės, galimybės pervežti didesnę krovinių bei uosto galimybių padidinimo verta jį tirti. Atlikus tam tikrą aibę kompiuterinių laivo nusėdimo skaičiavimų atsiranda tam tikra laivybos praktika. Skaičiavimus atlikus skirtingais būdais, skirtingo tipų, matmenų bei korpuso formos laivams, tikėtina, kad bus pastebėti tam tikri dėsningumai, kuriais galima bus remtis nustatant laivo nusėdimą, taip supaprastinant sudėtingą procesą.

LITERATŪRA

1. Barrass C. B. 2009. *Ship Squat and Interaction*. Glazgas: Bell and Bain.
2. Barrass C. B. 2006. *Ship Stability for Masters and Mates*. Glazgas: Bell and Bain.
3. Churin M.Yu. 2013. The method of dynamic squat's determination of sea-and-river-going ship. Modern problems of science and education [interaktyvus], Nr. 13, ISSN 2070-7428 [žiūrėta 2016m. gegužės 2 d.]. Prieiga per Internetą <<http://www.science-education.ru/en/article/view?id=10228>>
4. Eloot K., Verwilligen J. ir kt. 2008. An overview of squat measurements for container ships in restricted water.
5. Holtrop J., Mennen G.G.J. An approximate power prediction method [interaktyvus], žiūrėta 2016m. gegužės 20 d. Prieiga per Internetą <http://esrdc.mit.edu/library/ESRDC_library/Holtrop-Approximate-1982.pdf>
6. Jachowski J., 2008. *Assessment of ship squat in shallow water using CFD*.
7. Klaipėda Harbour Seabed Mapped, [interaktyvus], žiūrėta 2016m gegužės 26d. Prieiga per Internetą < <http://www.hydro-international.com/content/news/klaipeda-harbour-seabed-mapped?output=pdf>>
8. Lyakhovitsky, Anatoly. Shallow water and supercritical ships / Anatoly Lyakhovitsky ; [translated and edited by Alfred Tunik]. Fair Lawn : Backbone, 2007. 277 p.
9. Matutis V., 2010. Sumažinus atsargą po kyliu, Klaipėdoje padaugėtų laivų? [interaktyvus], žiūrėta 2016m. gegužės 26d. Prieiga per Internetą <<http://www.jura24.lt/lt/naujienos/uostas/sumazinus-atsarga-po-kyliu-klaipedoje-padaugetu-laivu-276110>>
10. Molland, Anthony F. Ship resistance and propulsion : practical estimation of ship propulsive power / Anthony F. Molland, Stephen R. Turnock, Dominic A. Hudson. Cambridge : Cambridge University Press, 2013.
11. Morse B., Michaud S., Tauschereau A., Santerre R., 2004. *Ship squat in shallow and confined channels – The Canadian experience*.
12. Shipping and Navigation history [interaktyvus], žiūrėta 2016m. gegužės 26 d. Prieiga per Internetą < <http://www.eskema.eu/DownloadFile.aspx?tableName=tblSubjectArticles&field=PDF%20Filename&idField=subjectArticleID&id=113>>
13. Ship disasters [interaktyvus], žiūrėta 2016m gegužės 26d. Prieiga per Internetą < <http://www.ship-disasters.com/passenger-ship-disasters/herald-of-free-enterprise/>>
14. Spruogis B., 2012 Skysčių mechanika. Hidraulinių ir pneumatinių sistemų elementai ir pavaros. Vilnius: Technika.

15. Tate K., 2012. Sinking the unsinkable Ship [interaktyvus], žiūrėta 2016m. gegužės 26d. Prieiga per Internetą <<http://www.livescience.com/19611-titanic-sinking-anniversary.html>>
16. Uosto parametrai [interaktyvus], žiūrėta 2016m. gegužės 26d. Prieiga per Internetą <<http://www.portofklaipeda.lt/>>