

Numeričko istraživanje pojave interferencije kod katamarana

Tomljenović, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:736467>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-13**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ivan Tomljenović

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Nastia Degiuli, dipl. ing.
Dr. sc. Andrea Farkas, mag. ing. nav. arch.

Student:

Ivan Tomljenović

Zagreb, 2022.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu. Rad je izrađen u sklopu projekta IP-2020-02-8568 Hrvatske zaklade za znanost.

Zahvaljujem se mentorima prof. dr. sc. Nastii Degiuli, dipl. ing. i dr. sc. Andrei Farkasu, mag. ing. nav. arch. jer su mi prenijeli puno znanja tijekom izrade ovog rada i što su uvijek bili dostupni te spremni pomoći. Bez njihove pomoći ovaj rad ne bi bio moguć.

Ponajviše zahvaljujem svojim roditeljima, sestri Ani i obitelji koji su mi pružali moralnu i financijsku pomoć tokom cijelog studija.

Htio bih se još zahvaliti svim prijateljima, a napose onima sa smjera koji su mi studij učinili ugodnijim i zabavnijim.

Ivan Tomljenović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 22 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivan Tomljenović**

JMBAG: **0035215127**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Numeričko istraživanje pojave interferencije kod katamarana**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Numerical investigation into the interference phenomenon for a catamaran**

Opis zadatka:

Katamarani i ostali višetrupni brodovi imaju bolje radne značajke u pogledu brzine, otpora, upravljivosti i poprečnog stabiliteta u odnosu na jednotrupne brodove. Ukupni otpor katamarana razlikuje se od dvostrukog otpora jednotrupnog broda iste forme uslijed pojave interferencije. Ovisno o međusobnom položaju trupova katamarana i Froudeovom broju interferencija može biti povoljna ili nepovoljna.

U završnom radu potrebno je, uz pomoć programskog paketa za računalnu dinamiku fluida, numerički simulirati pokus otpora modela katamarana i modela jednotrupnog broda te ispitati pojavu interferencije. Pri tome treba koristiti model trodimenzijskog strujanja viskoznog fluida sa slobodnom površinom.

U radu je potrebno:

1. Dati pregled literature vezane za numeričke simulacije pokusa otpora katamarana.
2. Dati matematičku osnovu numeričkih metoda za simulaciju viskoznog strujanja sa slobodnom površinom.
3. Pripremiti proračunsku mrežu, početne i rubne uvjete potrebne za numeričku simulaciju viskoznog strujanja fluida.
4. Izvršiti numeričku simulaciju pokusa otpora modela katamarana i modela jednotrupnog broda koristeći programski paket za računalnu dinamiku fluida.
5. Usporediti numerički dobivene rezultate ukupnog otpora modela katamarana i modela jednotrupnog broda s eksperimentalnim rezultatima dostupnim u literaturi.

Rezultate proračuna prikazati odgovarajućim tablicama, dijagramima i slikama.

U radu koristiti programski paket STAR-CCM+ dostupan na FSB-u.

U radu je potrebno navesti literaturu i eventualno dobivenu pomoć tijekom izrade.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

30. 11. 2021.

1. rok: 24. 2. 2022.
2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.
3. rok: 22. 9. 2022.

1. rok: 28. 2. – 4. 3. 2022.
2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.
3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

Dr. sc. Andrea Farkas

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. Pregled literature	2
2. MATEMATIČKI MODEL.....	4
2.1. Otpor broda	4
2.2. Računalna dinamika fluida.....	5
2.3. Osnovne jednačbe dinamike fluida	6
2.3.1. Zakon očuvanja mase.....	6
2.3.2. Zakon očuvanja količine gibanja	6
2.3.3. Vremenski osrednjene Navier-Stokesove jednačbe.....	7
2.4. Modeli turbulencije	7
2.4.1. $k - \omega$ SST model trubulencije	8
2.5. Zidne funkcije	9
2.6. Bezdimenzijske značajke	10
2.7. Procjena nesigurnosti numeričke simulacije.....	11
2.8. Validacije rezultata	13
2.9. Faktor interferencije	13
3. PRIPREMA NUMERIČKIH SIMULACIJA	14
3.1. Priprema numeričke simulacije za jednotrupni brod	14
3.1.1. Glavne značajke katamarana.....	14
3.1.2. Proračunska domena	14
3.1.3. Rubni uvjeti.....	16
3.1.4. Diskretizacija proračunske domene	16
3.1.5. Granični sloj.....	17
3.1.6. Slobodna površina.....	19
3.1.7. Kelvinov kut.....	19
3.1.8. Generirane mreže	20
3.1.9. Fizikalni model numeričke simulacije	21
3.1.10. Zadavanje numeričkog rješavača (eng. <i>Solver</i>)	21

3.2.	Priprema numeričke simulacije pokusa otpora modela katamarana s razmakom $H/L = 0,167$	22
3.2.1.	Glavne značajke katamarana.....	22
3.2.2.	Diskretizacija proračunske domene	23
3.2.3.	Diskretizacija graničnog sloja.....	23
3.2.4.	Diskretizacija slobodne površine	24
3.2.5.	Kelvinov kut.....	24
3.2.6.	Generirane mreže	25
3.2.7.	Ostale postavke numeričke simulacije pokusa otpora modela katamarana s razmakom $H/L = 0,167$	25
3.3.	Priprema numeričke simulacije pokusa otpora modela katamarana s razmakom $H/L = 0,3$	26
3.3.1.	Postavke numeričke simulacije.....	26
4.	ANALIZA REZULTATA	27
4.1.	Analiza rezultata jednotrupnog broda	27
4.1.1.	Verifikacija numeričke simulacije	27
4.1.2.	Validacije rezultata	28
4.1.3.	Slike valova.....	29
4.1.4.	Položaj slobodne površine po modelu jednotrupnog broda.....	30
4.1.5.	Hidrodinamički tlak	31
4.1.6.	Tangencijalno naprezanje na trupu	32
4.2.	Analiza rezultata katamarana s razmakom $H/L = 0,167$	33
4.2.1.	Verifikacija numeričke simulacije	33
4.2.2.	Validacije rezultata	34
4.2.3.	Parametar y^+	34
4.2.4.	Slike valova	35
4.2.5.	Položaj slobodne površine po trupu katamarana	37
4.2.6.	Hidrodinamički tlak	38
4.2.7.	Tangencijalno naprezanje na trupu	39
4.2.8.	Faktor interferencije za katamaran s razmakom $H/L = 0,167$	39
4.3.	Analiza rezultata katamarana s razmakom $H/L = 0,3$	40
4.3.1.	Verifikacija numeričke simulacije	40
4.3.2.	Validacije rezultata	41

4.3.3.	Parametar y^+	41
4.3.4.	Slike valova	42
4.3.5.	Položaj slobodne površine po trupu katamarana	44
4.3.6.	Hidrodinamički tlak	45
4.3.7.	Tangencijalno naprezanje na trupu	46
4.3.8.	Faktor interferencije za katamaran s razmakom $H/L = 0,3$	46
4.4.	Usporedba rezultata katamarana s razmakom $H/L = 0,167$ i rezultata za jednotrupni brod.....	47
4.5.	Usporedba rezultata katamarana s razmakom $H/L = 0,3$ i rezultata za jednotrupni brod	48
4.6.	Usporedba otpora i faktora interferencije katamarana s razmacima $H/L = 0,167$ i $H/L = 0,3$	48
5.	ZAKLJUČAK.....	50

POPIS SLIKA

Slika 1. Tangencijalno naprezanje i normalna komponenta hidrodinamičkog tlaka [18].....	4
Slika 2. Koraci numeričke simulacije [19].....	5
Slika 3. Bezdimenzijski profil brzine u ovisnosti o udaljenosti od stijenke [21].....	9
Slika 4. Geometrija katamarana	14
Slika 5. Jednotrupni brod Delft 372	15
Slika 6. Dimenzije proračunske domene	15
Slika 7. Rubni uvjeti domene	16
Slika 8. Diskretizacija graničnog sloja uz model jednotrupnog broda Delft 372	18
Slika 9. Parametar y^+ po trupu broda	18
Slika 10. Diskretizacija slobodne površine	19
Slika 11. Fina mreža modela jednotrupnog broda Delft 372 pri $Fr = 0,75$	20
Slika 12. Fizikalni model viskoznog strujanja [26].....	21
Slika 13. Delft 372 katamaran s razmakom $H/L = 0,167$	23
Slika 14. Diskretizacija graničnog sloja katamarana s razmakom $H/L = 0,167$	24
Slika 15. Parametar y^+ na trupu katamarana s razmakom $H/L = 0,167$	24
Slika 16. Fina mreža katamarana s razmakom $H/L = 0,167$, pogled odozgo	25
Slika 17. Delft 372 katamaran s razmakom $H/L = 0,3$	26
Slika 18. Slika valova pri $Fr = 0,75$ dobivena finom mrežom	29
Slika 19. Slika valova pri $Fr = 0,3$ dobivena finom mrežom	30
Slika 20. Položaj slobodne površine po modelu jednotrupnog broda dobiven finom mrežom pri $Fr = 0,5$	31
Slika 21. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka po jednotrupnom brodu pri $Fr = 0,5$	31
Slika 22. Raspodjela tangencijalnog naprezanja po jednotrupnom brodu dobivena finom mrežom pri $Fr = 0,5$	32
Slika 23. Parametar y^+ dobiven primjenom fine mreže za katamaran s razmakom $H/L = 0,167$ pri $Fr = 0,5$	34
Slika 24. Slika valova primjenom fine mreže za katamaran s razmakom $H/L = 0,167$ pri $Fr =$ $0,3$	35
Slika 25. Interferencija valova kod katamarana s razmakom $H/L = 0,167$ pri $Fr = 0,75$	36
Slika 26. Interferencija valova kod katamarana s razmakom $H/L = 0,167$ pri $Fr = 0,5$	36
Slika 27. Interferencija valova kod katamarana s razmakom $H/L = 0,167$ pri $Fr = 0,3$	36

Slika 28. Slobodna površina po unutarnjem dijelu trupa katamarana s razmakom $H/L = 0,167$ pri $Fr = 0,5$	37
Slika 29. Slobodna površina po vanjskom dijelu trupa katamarana s razmakom $H/L = 0,167$ pri $Fr = 0,5$	38
Slika 30. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka po trupu katamarana s razmakom $H/L = 0,167$ pri $Fr = 0,5$	38
Slika 31. Raspodjela naprezanja na trupu katamarana s razmakom $H/L = 0,167$ pri $Fr = 0,5$	39
Slika 32. Raspodjela parametra y^+ po trupu katamarana s razmakom $H/L = 0,3$ pri $Fr = 0,5$	42
Slika 33. Slika valova katamarana s razmakom $H/L = 0,3$ pri $Fr = 0,3$	42
Slika 34. Interferencija valova kod katamarana s razmakom $H/L = 0,3$ pri $Fr = 0,75$	43
Slika 35. Interferencija valova kod katamarana s razmakom $H/L = 0,3$ pri $Fr = 0,5$	43
Slika 36. Interferencija valova kod katamarana s razmakom $H/L = 0,3$ pri $Fr = 0,3$	44
Slika 37. Slobodna površina po unutarnjem dijelu trupa katamarana s razmakom $H/L = 0,3$ pri $Fr = 0,5$	45
Slika 38. Slobodna površina po vanjskom dijelu trupa katamarana s razmakom $H/L = 0,3$ pri $Fr = 0,5$	45
Slika 39. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka po trupu katamarana s razmakom $H/L = 0,3$ pri $Fr = 0,5$	45
Slika 40. Raspodjela naprezanja na trupu katamarana s razmakom $H/L = 0,3$ pri $Fr = 0,5$...	46
Slika 41. Usporedni prikaz interferencije valova za dva razmaka trupova (lijevo – katamaran s užim razmakom između trupova) i (desno – katamaran sa širim razmakom između trupova)	49

POPIS TABLICA

Tablica 1. Glavne značajke modela jednotrupnog broda Delft 372	14
Tablica 2. Postavke diskretizacije graničnog sloja za model jednotrupnog broda Delft 372	17
Tablica 3. Broj ćelija za $Fr = 0,75$ i model jednotrupnog broda Delft 372	20
Tablica 4. Vremenski koraci za $Fr = 0,75$	22
Tablica 5. Postavke diskretizacije graničnog sloja katamarana s razmakom $H/L = 0,167$	23
Tablica 6. Broj ćelija i osnovna veličina ćelije za $Fr = 0,75$	25
Tablica 7. Broj ćelija i osnovna veličina ćelije za katamaran s razmakom $H/L = 0,3$	26
Tablica 8. Koeficijenti numeričke nesigurnosti mreže	27
Tablica 9. Koeficijenti numeričke nesigurnosti vremenskog koraka	27
Tablica 10. Numerička nesigurnost mreže i vremenskog koraka	27
Tablica 11. Rezultati jednotrupnog broda modela Delft 372	28
Tablica 12. Koeficijenti numeričke nesigurnosti mreže	33
Tablica 13. Koeficijenti numeričke nesigurnosti vremenskog koraka	33
Tablica 14. Numerička nesigurnost mreže i vremenskog koraka	33
Tablica 15. Usporedba rezultata simulacije s eksperimentom za katamaran s razmakom $H/L = 0,167$	34
Tablica 16. Faktor interferencije za katamaran s razmakom $H/L = 0,167$	39
Tablica 17. Koeficijenti numeričke nesigurnosti mreže	40
Tablica 18. Koeficijenti numeričke nesigurnosti vremenskog koraka	41
Tablica 19. Numerička nesigurnost mreže i vremenskog koraka	41
Tablica 20. Usporedba rezultata numeričke simulacije s eksperimentom za katamaran s razmakom $H/L = 0,3$	41
Tablica 21. Faktor interferencije za katamaran s razmakom $H/L = 0,3$	47
Tablica 22. Usporedba rezultata jednotrupnog broda i katamarana s razmakom $H/L = 0,167$	47
Tablica 23. Usporedba rezultata za model jednotrupnog broda i katamarana s razmakom $H/L = 0,3$	48
Tablica 24. Usporedba rezultata katamarana s razmacima $H/L = 0,167$ i $H/L = 0,3$	49

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
b	m	širina trupa
c	/	konstante za izračun vremenskog koraka
C_T	/	koeficijent ukupnog otpora
f_i	N	masena sila
g	m/s ²	gravitacijska konstanta
H	m	razmak trupova katamarana
I_f	/	faktor interferencije
$I_{f_0.167}$	/	faktor interferencije katamarana na razmaku $H/L = 0,167$
$I_{f_0.3}$	/	faktor interferencije katamarana na razmaku $H/L = 0,3$
k	J	kinetička energija turbulencije
KG	m	vertikalni položaj težišta mase
LCG	m	horizontalni položaj težišta mase
L_{WL}	m	duljina vodne linije
L_{OA}	m	duljina preko svega
L_{pp}	m	duljina između perpendikulara
p	N/m ²	tlak
p_i	/	red točnosti
P_E	W	efektivna snaga
p_d	N/m ²	hidrodinamički tlak
R_F	N	otpor trenja
R_P	N	otpor tlaka
R_t	N	ukupni otpor broda
R_i	/	omjer konvergencije
R_{t_k}	N	ukupni otpor katamarana
R_{t_m}	N	ukupni otpor jednotrupnog broda
S	m ²	oplakana površina
S_L	/	najmanja vrijednost numeričkog rješenja
S_M	m ²	materijalna površina
S_U	/	najveća vrijednost numeričkog rješenja
T	m	gaz
T	s	period definiran kao omjer duljine i brzine broda
$\overline{U_{SN}}$	/	ukupna numerička nesigurnost
$\overline{U_i}$	/	nesigurnost
$\overline{U_G}$	/	nesigurnost mreže
$\overline{U_T}$	/	nesigurnost vremenskog koraka
u^+	/	bezdimenzijska brzina
u	m/s	brzina

u_τ	m/s	brzina trenja
V_M	m ³	materijalni volumen
v	m/s	brzina broda
v_j	m/s	vektor brzine
x_j	/	koodrinatne osi
y^+	/	bezdimenzijska udaljenost od stijenke
y	m	udaljenost od stijenke u smjeru normale
ρ	kg/m ³	gustoća fluida
RD	%	relativno odstupanje
Δ	kg	istisnina
Δt	s	vremenski korak
τ	N/m ²	smično naprezanje
τ^o	/	trim broda
δ_{RE}^*	/	numerička pogreška
τ_w	N/m ²	smično naprezanje na stijenci
σ_i		tenzor površinskih sila
σ_k	m	uron jednotrupnog broda
σ_m	m	uron katamarana
ν	m ² /s	koeficijent kinematičke viskoznosti
ν_T	m ² /s	turbulentna viskoznost
ω	1/s	specifična brzina disipacije energije
ϵ	m ² /s ³	brzina disipacije energije
κ	/	von Karmanova konstanta
μ	Pa s	koeficijent dinamičke viskoznosti
μ_t	Pa s	koeficijent turbulentne viskoznosti
δ_{ij}	/	Kroneckerov simbol
α	/	kut
ε_i	/	razlike rezultata
Φ_i	/	fizikalna veličina
Φ_G	/	fizikalna veličina za finu mrežu

SAŽETAK

U ovom radu provedeno je numeričko određivanje ukupnog otpora, trima i urona modela jednotrupnog broda i katamarana Delft 372 primjenom računalne dinamike fluida (eng. *Computational Fluid Dynamics* - CFD) s ciljem istraživanja utjecaja pojave interferencije na ukupni otpor katamarana. Numeričke simulacije provedene su primjenom komercijalnog programskog paketa STAR-CCM+. Matematički model temeljen je na Reynoldsovim osrednjenim Navier - Stokesovim jednadžbama (eng. *Reynolds Averaged Navier - Stokes* - RANS) uz primjenu $k - \omega$ SST (eng. *Shear Stress Transport*) modela turbulencije. Za potrebe provedbe numeričkih simulacija, primijenjen je model nestacionarnog, trodimenzijskog, viskoznog strujanja, dok je za praćenje i lociranje slobodne površine primijenjena metoda udjela fluida u volumenu (eng. *Volume of fluid* - VOF). Numeričko istraživanje provedeno je za tri vrijednosti Froudeovih brojeva: 0,3; 0,5; 0,75 te za dva razmaka između trupova katamarana, što je omogućilo ispitivanje utjecaja razmaka između trupova i Froudeovog broja na pojavu interferencije. Provedena je verifikacija dobivenih numeričkih rezultata te je izračunata nesigurnost mreže i vremenskog koraka pri određivanju otpora modela jednotrupnog broda i katamarana Delft 372. Nadalje, provedena je i validacija rezultata usporedbom dobivenih numeričkih rezultata s eksperimentalnim rezultatima dostupnim u literaturi. Pokazano je da je ukupni otpor katamarana veći od dvostruke vrijednosti otpora jednotrupnog broda, što ukazuje na pojavu nepovoljne interferencije pri ispitanim Froudeovim brojevima i razmacima između trupova. Konačno, pokazano je kako se računalna dinamika fluida može primijeniti kao koristan alat u istraživanju pojave interferencije.

Ključne riječi:

katamaran, interferencija, računalna dinamika fluida, ukupni otpor, Reynoldsove osrednjene Navier-Stokesove jednadžbe, $k-\omega$ STT model turbulencije

SUMMARY

In this study numerical assessment of the total resistance, trim, and sinkage of monohull and Delft 372 catamaran model is performed using Computational Fluid Dynamics (CFD), to investigate the impact of interference phenomenon on the total resistance of a catamaran. Numerical simulations are carried out using the commercial software package STAR-CCM+. The mathematical model is based on Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) equations and $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport) turbulence model. Unsteady three-dimensional viscous flow is numerically simulated, and the Volume of Fluid (VOF) method is utilised for tracking and locating free surface. Numerical investigations are carried out at three Froude number values: 0.3, 0.5, and 0.75 and for two demihull separations, which enabled the investigation of the impact of demihull separation and Froude number on the interference phenomenon. The verification study is performed and grid and temporal uncertainties for the prediction of the total resistance of monohull and catamaran Delft 372 model are calculated. Thereafter, the validation study is carried out by comparison of the numerically obtained results with the experimental ones available in the literature. It has been shown that the total resistance of the catamaran is higher than the double total resistance of the monohull, which demonstrates the occurrence of the detrimental interference at investigated Froude numbers and demihull separations. Finally, it has been demonstrated that Computational Fluid Dynamics can be used as a valuable tool in the investigation of interference occurrence.

Key words:

catamaran, interference, Computational Fluid Dynamics, total resistance, Reynolds Averaged Navier-Stokes equations, $k-\omega$ SST turbulence model

1. UVOD

Katamarani potječu s područja Indonezije gdje ih je domorodačko stanovništvo koristilo za ribolov i transport između otoka. Ideju gradnje takvih brodova na zapad prenijeli su engleski moreplovci krajem 17. stoljeća. Trebalo je gotovo dvije stotine godina da gradnja takvog trupa postane uobičajena u brodogradnji zapadnog svijeta te se krajem 19. stoljeća u Americi počinju graditi katamarani.

Katamarani su zanimljivi zbog boljih performansi u pogledu brzine, upravljivosti i stabiliteta u usporedbi s izvedbama jednotrupnih brodova. Uglavnom se koriste za prijevoz putnika. Postoji nekoliko metoda koje se mogu koristiti za ispitivanje hidrodinamičkih značajki brodova, odnosno katamarana. To su empirijsko-statističke, eksperimentalne te numeričke metode. Empirijsko-statističke metode su najjednostavnije i najbrže metode za korištenje. Temelje se na statistički obrađenim podacima izmjerenima u naravi. Vrlo je praktično u ranoj fazi projektiranja brzo izračunati vrijednost ukupnog otpora novog projekta, ali se takve metode ne koriste u kasnijim fazama projektiranja zbog svoje ograničene točnosti. Eksperimentalne metode temelje se na određivanju ukupnog otpora geometrijski sličnog modela te naknadnom ekstrapolacijom dobivenih rezultata. Takva ispitivanja vrlo su skupa i zahtijevaju dug vremenski period za njihovu provedbu. Razvojem računala, to jest računalne dinamike fluida, otvorio se put rješavanju diferencijalnih jednadžbi numeričkim putem. Tako je računalna dinamika fluida (eng. *Computational Fluid Dynamics* - CFD) u posljednje vrijeme postala vrlo važna metoda određivanja hidrodinamičkih značajki brodova zbog svoje preciznosti, brzine i cijene. Za provođenje numeričke simulacije potrebno je poznavanje problema brodske hidrodinamike, poznavanje rada u odabranom programskom paketu za računalnu dinamiku fluida te posjedovanje računalnih resursa, koji omogućavaju provođenje ovako složenih problema u razumnom vremenu. Važno je naglasiti kako se eksperimentalne i numeričke metode međusobno nadopunjuju te kombinacija njihove primjene danas predstavlja uobičajenu praksu u području brodske hidrodinamike.

U ovome završnom radu provedeno je numeričko određivanje ukupnog otpora, trima i urona modela jednotrupnog broda i katamarana Delft 372 primjenom računalne dinamike fluida unutar programskog paketa STAR-CCM+. Numerička ispitivanja provedena su pri tri Froudeova broja za model jednotrupnog broda Delft 372 i dva modela katamarana Delft 372. Istražen je utjecaj Froudeovog broja te razmaka između trupova na pojavu interferencije katamarana. Numeričke simulacije pri $Fr = 0,75$ provedene su primjenom tri gustoće mreže te

s tri različita vremenska koraka, kako bi se proveo postupak verifikacije dobivenih numeričkih rezultata. Također je provedena validacija dobivenih numeričkih rezultata usporedbom s eksperimentalnim rezultatima dostupnim u literaturi. Konačno, provedena je detaljna analiza strujanja oko modela jednotrupnog broda te modela katamarana.

1.1. Pregled literature

Sukladno navedenim prednostima katamarana provedena su brojna teorijska, eksperimentalna i numerička ispitivanja hidrodinamičkih značajki katamarana [1]. Razmak između trupova katamarana utječe na interferenciju valova te posljedično utječe na hidrodinamičke značajke katamarana. Stoga je određivanje razmaka između trupova jedno od ključnih koraka u ranoj fazi projektiranja katamarana [2]. Valovi kod višetrupnih brodova međusobno interferiraju te mogu uzrokovati poželjne ili nepoželjne posljedice [3]. Sustav valova u prostoru između dva trupa katamarana je složen i utječe na hidrodinamička svojstva katamarana. Kut između poprečnih i razilaznih valova iza katamarana uži je od Kelvinovog kuta [4]. Također, ukupni otpor katamarana nije jednak dvostrukom ukupnom otporu jednotrupnog broda iste forme zbog pojave interferencije koja utječe na ukupni otpor katamarana [5]. Interferencija se općenito dijeli na viskoznu i valnu interferenciju. Asimetrično strujanje oko jednog trupa katamarana glavni je uzrok viskoznog otpora, jer mijenja izgled graničnog sloja i formiranje vrtloga. Valna interefrencija prouzrokovana je sustavom valova u prostoru između trupova katamarana [6]. Interferencija je izraženija pri manjem razmaku između trupova te srednjim vrijednostima Froudeovog broja [7]. Broglia et al. [7] zaključuju kako je pri manjim Froudeovim brojevima amplituda valova mala te ne utječe značajno na ukupni otpor katamarana, dok pri višim Froudeovim brojevima interferencija valova događa se izvan prostora između trupova katamarana te stoga manje utječe na ukupni otpor katamarana. Autori su dokazali i povezanost interferencije s posrtanjem i poniranjem modela katamarana. Numeričko ispitivanje modela katamarana S-60 pokazalo je da se povećanjem Froudeovog broja i razmaka između trupova, valovi u prostoru između trupova katamarana pomiču prema krmi katamarana [8]. Razvojem računala i numeričkih metoda povećala se točnost i efikasnost računalne dinamike fluida. Shodno tome kombinacija računalne dinamike fluida i modelskih ispitivanja u bazenu predstavlja optimalnu kombinaciju za određivanje hidrodinamički značajki broda [9]. Reynoldsove osrednjene Navier-Stokesove jednačbe (engl. *Reynolds Averaged Navier-Stokes equations* - RANSE) najprikladnije su za proračun ukupnog otpora katamarana pri plovidbi srednjom brzinom [10]. U svrhu istraživanja utjecaja razmaka između trupova na interferenciju

provedene su numeričke simulacije te eksperimentalna ispitivanja u [11]. Dobiveni rezultati su potvrdili da je pri manjem razmaku između trupova interferencija značajnija te da je koeficijent ukupnog otpora veći. Najveći koeficijent ukupnog otpora dobiven je kod najužeg razmaka između trupova i pri visokim Froudeovim brojevima. Važno je naglasiti kako je pojava interferencije izraženija kod simetričnih nego kod asimetričnih trupova [12]. Nestacionarne Reynoldsove osrednjene Navier-Stokesove jednačbe primijenjene su za numeričko određivanje ukupnog otpora, kuta trima i urona katamarana te je pokazano kako točnost dobivenih rezultata ovisi o kvaliteti geometrijske mreže [13]. Numeričko određivanje nominalnog sustrujanja broda za rasuti teret provedeno je primjenom Reynoldsovih osrednjenih Navier-Stokesovih jednačbi uz primjenu različitih modela turbulencije [14]. Od ispitanih modela turbulencije, najtočniji rezultati su dobiveni uz primjenu *Reynolds Stress Model* turbulencije, što je potvrđeno usporedbom dobivenih numeričkih i eksperimentalnih rezultata. Hidrodinamičke značajke broda su većinom ispitane za glatku površinu trupa i brodskog vijka. Analiza utjecaja pojave obraštaja na značajke slobodne vožnje brodskog vijka provedena je u [15]. Obraštanje trupa biofilmom može značajno utjecati na hidrodinamičke značajke broda te se ne smije zanemariti budući da uzrokuje značajno povećanje snage predane vijku za održavanje iste brzine plovidbe [16].

2. MATEMATIČKI MODEL

2.1. Otpor broda

Prilikom gibanja broda pri konstantnoj brzini javlja se sila koja djeluje suprotno smjeru gibanja broda i naziva se ukupni otpor broda R_T . Ukupni otpor broda moguće je prikazati u bezdimenzijskom obliku pomoću koeficijenta ukupnog otpora C_T [17]:

$$C_T = \frac{\text{sila otpora}}{\text{inercijske sile}} = \frac{R_t}{\frac{1}{2}\rho v^2 S} \quad (1)$$

gdje je C_T koeficijent ukupnog otpora, R_t ukupni otpor, ρ gustoća fluida, v brzina broda, a S je oplakana površina trupa.

Snagu otpora ili efektivnu snagu moguće je odrediti kako slijedi:

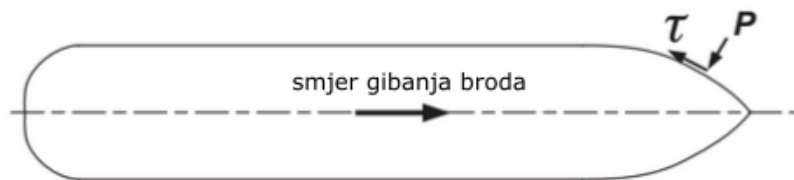
$$P_E = R_t v \quad (2)$$

gdje je P_E efektivna snaga broda .

Ukupni otpor moguće je podijeliti na otpor tlaka i otpor trenja te uz poznavanje hidrodinamičkih tlakova u smjeru normale i tangencijalnih naprezanja u svakoj točki oplakane površine ukupni otpor može se izračunati prema izrazu:

$$R_t = \int_S \tau \sin(\alpha) dS + \int_S p \cos(\alpha) dS \quad (3)$$

S desne strane jednadžbe (3) prvi integral predstavlja otpor trenja, a drugi otpor tlaka. Slikom 1. prikazano je tangencijalno naprezanje i normalna komponenta hidrodinamičkog tlaka.



Slika 1. Tangencijalno naprezanje i normalna komponenta hidrodinamičkog tlaka [18]

Stoga je očita podjela ukupnog otpora na otpor trenja i otpor tlaka :

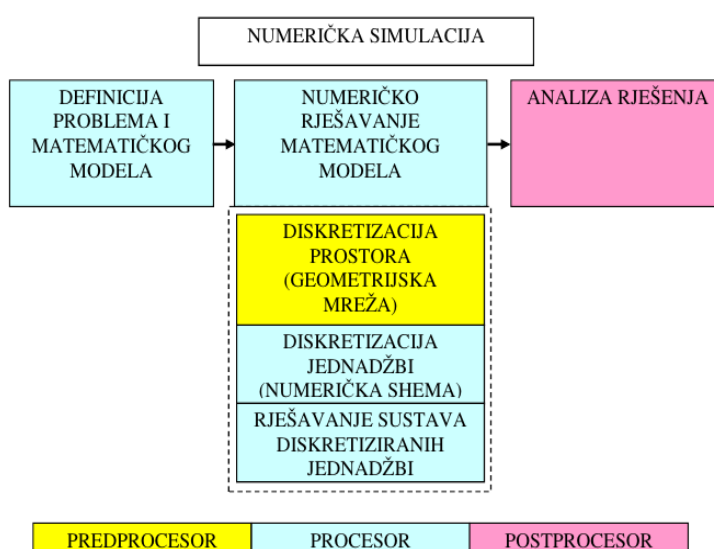
$$R_t = R_F + R_P \quad (4)$$

2.2. Računalna dinamika fluida

Ponašanje fluida moguće je opisati nelinearnim parcijalnim diferencijalnim jednačbama koje se nazivaju Navier-Stokesove jednačbe. Ove jednačbe u problemima brodske hidrodinamike nije moguće riješiti analitičkim putem kako uključuju opis turbulentnog strujanja. Stoga u posljednje vrijeme razvojem računala i računalne dinamike fluida, numeričko rješavanje tih jednačbi ima sve veću ulogu u mehanici fluida. Na slici 2. prikazani su koraci svake numeričke simulacije, a njihov opis je dan u nastavku. Prvi korak je definicija problema i postavljanje matematičkog modela. Budući da su se u ovom radu provodile numeričke simulacije u komercijalnom programskom paketu, koji ima implementirano nekoliko matematičkih modela, potrebno je u sučelju odabrati onaj koji najviše odgovara zadanom problemu. Nakon odabira matematičkog modela potrebno je numerički riješiti matematički model.

Rješavanje matematičkog modela može se podijeliti na nekoliko koraka. Prvo je potrebno diskretizirati prostor, odnosno generirati mrežu za analizirani slučaj. Na generiranoj mreži potrebno je, uz zadane rubne uvjete, diskretizirati diferencijalne jednačbe. U ovom radu diskretizacija jednačbi provedena je metodom konačnih volumena, koja linearizira diferencijalne jednačbe. Kako su razmatrane pojave nestacionarne, provodi se i vremenska diskretizacija implicitnom metodom. Nakon diskretizacije jednačbi sustav linearnih diferencijalnih jednačbi rješava se željenim rješavačem.

Nakon provedene simulacije treba provesti analizu, u kojoj se prvo provjerava jesu li dobivena polja i rezultati fizikalni. Nakon što se utvrdi fizikalnost rješenja, rezultate je korisno usporediti s eksperimentom, odnosno validirati dobivene rezultate.



Slika 2. Koraci numeričke simulacije [19]

2.3. Osnovne jednačbe dinamike fluida

Strujanje oko trupa broda se modelira kao nestacionarno, viskozno i nestlačivo. Takav problem opisuju se Navier-Stokesovim jednačbama, koje su prikazane u [17].

2.3.1. Zakon očuvanja mase

Zakon očuvanja mase glasi: brzina promjene mase materijalnog volumena jednaka je nuli, ako unutar volumena nema izvora niti ponora fizikalne veličine. Njegov oblik glasi:

$$\frac{D}{Dt} \int_{V_M} \rho dV = 0 \quad (5)$$

gdje ρ predstavlja gustoću fluida, a V_M označava materijalni volumen.

Prelaskom s materijalnog na kontrolni volumen za nestlačivo strujanje dobiva se konačni oblik zakona očuvanja mase za nestlačivo strujanje:

$$\frac{\partial v_j}{\partial x_j} = 0 \quad (6)$$

gdje v_j predstavlja vektor brzine, a x_j koordinatne osi.

2.3.2. Zakon očuvanja količine gibanja

Zakon očuvanja količine gibanja glasi: brzina promjene količine gibanja jednaka je sumi vanjskih masenih i površinskih sila, što se može zapisati kako slijedi:

$$\frac{D}{Dt} \int_{V_M} \rho v_i dV = \int_{V_M} \rho f_i dV + \int_{S_M} \sigma_i dS \quad (7)$$

gdje je f_i masena sila, v_i vektor brzine, σ_i tenzor površinskih sila, a S_M je materijalna površina.

Prelaskom s materijalnog na kontrolni volumen te primjenom Newtonovog zakona viskoznosti slijedi konačni oblik ovog zakona:

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (8)$$

gdje p predstavlja tlak, a ν koeficijent kinematičke viskoznosti.

2.3.3. Vremenski osrednjene Navier-Stokesove jednadžbe

Navier-Stokesove jednadžbe vremenski se osrednjuju, jer je njihovo direktno rješavanje vrlo proračunski zahtjevno. Budući da u području inženjerske primjene Navier-Stokesovih jednadžbi, inženjere uglavnom zanimaju integralne veličine određenih fizikalnih veličina, moguće je primijeniti Reynoldsovo vremensko osrednjavanje te na taj način znatno skratiti vrijeme proračuna. Vremenski osrednjene Navier-Stokesove jednadžbe nazivaju se još i Reynoldsove osrednjene Navier-Stokesove jednadžbe te imaju sljedeći oblik:

$$\frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (9)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{v}_j \bar{v}_i) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho v_i' v_j'} \right] \quad (10)$$

U jednadžbi (10) μ označava koeficijent dinamičke viskoznosti. Pojavljuje se novi član $\overline{\rho v_i' v_j'}$ koji predstavlja pulsirajuće strujanje. Taj član se naziva tenzor Reynoldsovih naprezanja i sadrži šest nepoznanica s obzirom da je simetričan. On unosi nove nepoznanice, zbog čega sustav jednadžbi (9) i (10) predstavlja nezatvoreni sustav, odnosno dobiveno rješenje neće biti jednoznačno.

2.4. Modeli turbulencije

Problem većeg broja nepoznanica nego jednadžbi rješava se primjenom određenog modela turbulencije, odnosno usklađivanjem broja jednadžbi s brojem nepoznanica. Modeli turbulencije se dijele na modele prvog, drugog, i trećeg reda. Najjednostavniji su modeli turbulencije prvog reda koji modeliraju tenzor Reynoldsovih naprezanja prema hipotezi Boussinesqa:

$$-\overline{\rho v_i' v_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \bar{k} \delta_{ij} \quad (11)$$

gdje je μ_t koeficijent turbulentne viskoznosti, a k predstavlja kinetičku energiju turbulencije. Boussinesq je svojom hipotezom šest nepoznatih komponenti Reynoldsovih naprezanja zamijenio jednim nepoznatim poljem koeficijenta turbulentne viskoznosti [17].

2.4.1. k - ω SST model turbulencije

U ovom radu za opis viskoznog i nestlačivog strujanja primijenjen je k - ω SST (eng. *Shear Stress Transport*) model turbulencije. Uobičajeno, standardni k - ω model koristi se za numeričke simulacije pri niskim vrijednostima Reynoldsova broja (Re), dok se k - ω SST može primijeniti i u numeričkim simulacijama pri visokim vrijednostima Re . k - ω SST model turbulencije predstavlja kombinaciju k - ω i k - ε modela turbulencije, gdje se k - ω koristi za unutarnji dio graničnog sloja, a u slobodnoj struji fluida primjenjuje se k - ε model turbulencije. Time se izbjegava osjetljivost k - ω modela na turbulentna svojstva u slobodnoj struji fluida. Model se sastoji od sljedećih jednadžbi [20]:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_k v_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (12)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_\omega v_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 + F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (13)$$

gdje je k kinetička energija turbulencije, a ω specifična brzina disipacije energije.

Navedene jednadžbe predstavljaju transportne jednadžbe kinetičke energije turbulencije i specifičnu brzinu disipacije energije za k - ω SST model turbulencije. Nepoznati koeficijenti računaju se prema sljedećim izrazima:

$$P_k = \min \left(\tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, 10 \beta^* k \omega \right) \quad (14)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2 \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right) \quad (15)$$

$$F_1 = \tanh \left[\left[\min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 v}{y^2 \omega} \right), \frac{4 \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right]^4 \right] \quad (16)$$

$$S = \sqrt{2 W_{ij} W_{ij}} \quad (17)$$

$$W_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (18)$$

Vrijednosti poznatih koeficijenata iznose kako slijedi: $\alpha_1 = \frac{5}{9}$, $\alpha_2 = 0,44$, $\beta_1 = \frac{3}{40}$, $\beta_2 = 0,0828$, $\beta^* = 0,09$, $\sigma_{k1} = 0,85$, $\sigma_{k2} = 1$, $\sigma_{\omega 1} = 0,5$, $\sigma_{\omega 2} = 0,856$.

Turbulentna viskoznost modelira se izrazom:

$$v_T = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, S F_2)} \quad (19)$$

gdje je odnos brzine disipacije energije (ε) i njene specifične veličine (ω) dan izrazom:

$$\omega = \sqrt{\frac{\varepsilon}{l}} C_\mu^{-\frac{3}{8}} \quad (20)$$

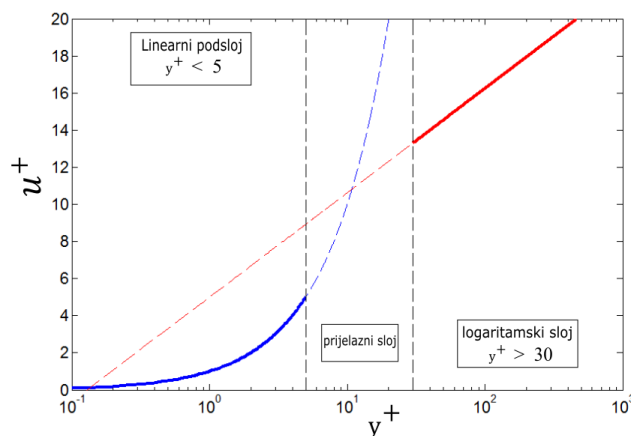
gdje je ε brzina disipacije kinetičke energije turbulencije, ω je specifična brzina disipacije kinetičke energije turbulencije, l karakteristična duljina, a C_μ konstanta iznosa 0,09.

Funkcija miješanja F_2 definirana je izrazom:

$$F_2 = \tanh \left[\left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right] \quad (21)$$

2.5. Zidne funkcije

Kako se za opisivanje strujanja u graničnom sloju koristi model turbulencije, potrebno je odrediti područje njegove primjene. Naime uz samu stijenku fluid je u laminarnom režimu strujanja te je turbulentna viskoznost mala. Na slici 3. prikazana je ovisnost bezdimenzijske brzine o bezdimenzijskoj udaljenosti od stijenke.



Slika 3. Bezdimenzijski profil brzine u ovisnosti o udaljenosti od stijenke [21]

Slika 3. prikazuje podjelu slojeva od stijenke do područja izvan graničnog sloja te se razlikuju linerani, prijelazni i logaritamski podsloj.

Brzina u logaritamskom sloju definirana je logaritamskim zakonom [17]:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + C^+ \quad (22)$$

pri čemu su bezdimenzijska udaljenost od stijenke y^+ i bezdimenzijska brzina u^+ definirane izrazima:

$$y^+ = \frac{y u_\tau}{\nu} \quad (23)$$

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} \quad (24)$$

uz:

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (25)$$

gdje je κ eksperimentalno dobivena von Karmanova konstanta, C^+ je konstanta integracije, y je udaljenost od stijenke u smjeru normale, u_τ je brzina trenja, u je brzina paralelna sa stijenkom, dok τ_w predstavlja tangencijalno naprezanje na stijenci.

Jednadžba (22) vrijedi u inercijskom podsloju dok u linearnom podsloju poprima linearnu karakteristiku:

$$u^+ = y^+ \quad (26)$$

Prijelazni sloj ima karakteristike inercijskog i lineranog podsloja te nije dobro opisan niti jednom od jednadžbi (22) i (26). Stoga se prva ćelija mreže na stijenci postavlja na bezdimenzijsku udaljenost y^+ veću od 30 ili manju od 5 gdje su profili brzina dobro opisani navedenim jednadžbama.

Ostaje još definirati rubne uvjete u graničnom sloju, odnosno postaviti iznosi transportnih značajki turbulencije. Ti rubni uvjeti zadaju se uz pomoć zidnih funkcija (eng. *wall functions*).

2.6. Bezdimenzijske značajke

U opisu strujanja oko trupa broda uobičajeno se primjenjuju dva bezdimenzijska broja. Reynoldsov broj predstavlja omjer inercijskih i viskoznih sila te se računa prema izrazu:

$$Re = \frac{v L_{WL}}{\nu} \quad (27)$$

gdje je L_{WL} duljina vodne linije broda.

Kod visokih vrijednosti Reynoldsovog broja, strujanje prelazi u turbulentni režim.

Froudeov broj predstavlja omjer inercijske i gravitacijske sile te se može izračunati kako slijedi:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g L_{WL}}} \quad (28)$$

gdje je g gravitacijska konstanta.

2.7. Procjena nesigurnosti numeričke simulacije

Za provedbu verifikacije potrebna su minimalno tri rješenja, a u ovome radu procjena numeričke nesigurnosti provedena je za vrijednost ukupnog otpora. Procjenom nesigurnosti određuje se nesigurnost proračuna pojedine integralne veličine. U ovom radu numerička nesigurnost procijenjena je primjenom metode koja se oslanja na Richardsonovu ekstrapolaciju [22]. U nastavku dani su izrazi za procjenu nesigurnosti mreže i vremenskog koraka, koji zajedno tvore ukupnu numeričku nesigurnost simulacije.

Međusobne razlike izračunatih rezultata definirane su izrazima:

$$\varepsilon_{i,21} = \Phi_{i,2} - \Phi_{i,1} \quad (29)$$

$$\varepsilon_{i,32} = \Phi_{i,3} - \Phi_{i,2} \quad (30)$$

gdje $\Phi_{i,1}$ predstavlja rezultat dobiven primjenom fine mreže, $\Phi_{i,2}$ srednje mreže i $\Phi_{i,3}$ grube mreže.

Veličina R_i se naziva omjer konvergencije te se računa kako slijedi:

$$R_i = \frac{\varepsilon_{i,21}}{\varepsilon_{i,32}} \quad (31)$$

Vrijednost R_i diktira daljnji tijek proračuna, odnosno služi za određivanje tipa konvergencije.

Ako se vrijednost R_i nalazi u granicama $-1 < R_i < 0$ dobivena je oscilatorna konvergencija.

Nesigurnost za slučaj oscilatorne konvergencije računa se prema izrazu [23]:

$$U_i = \frac{S_U - S_L}{2} \quad (32)$$

gdje S_U predstavlja najveću, a S_L najmanju vrijednost dobivenog numeričkog rješenja.

Nadalje, ako se vrijednost R_i nalazi u granicama $0 < R_i < 1$ dobivena je monotona konvergencija. Kod monotone konvergencije nesigurnost se računa prema izrazu [14]:

$$U_i = 1,25 |\delta_{RE}^*| \quad (33)$$

gdje je δ_{RE}^* :

$$\delta_{RE}^* = \frac{\varepsilon_{i,21}}{r_i^{p_1} - 1} \quad (34)$$

a p_i :

$$p_i = \frac{\ln\left(\frac{\varepsilon_{i,32}}{\varepsilon_{i,21}}\right)}{\ln(r_i)} \quad (35)$$

Preostaje još slučaj kada je $|R_i| > 1$, odnosno slučaj divergencije. Tada se nesigurnost računa prema:

$$U_i = |S_U - S_L| \quad (36)$$

Za određivanje numeričke nesigurnosti simulacije najprije je potrebno odrediti nesigurnost mreže i vremenskog koraka prema izrazu:

$$\overline{U_{G,T}} = \frac{U_i}{\Phi_{G,T,1}} \cdot 100\% \quad (37)$$

pri čemu indeksi G i T označavaju mrežu i vremenski korak, jer je jednadžbu moguće primijeniti za oba slučaja.

Konačno, ukupnu numeričku nesigurnost moguće je odrediti prema:

$$\overline{U_{SN}} = \sqrt{\overline{U_G^2} + \overline{U_T^2}} \quad (38)$$

2.8. Validacija rezultata

Validacija rezultata provodi se usporedbom numerički dobivenih i eksperimentalnih rezultata. U ovom radu provedena je usporedba numeričkih rezultata s eksperimentalnim rezultatima dostupnim u literaturi [24]. Relativno odstupanje rezultata određeno je prema izrazu:

$$RD = \frac{\Phi_{RDF} - \Phi_{EXP}}{\Phi_{EXP}} \cdot 100\% \quad (39)$$

gdje RD predstavlja relativno odstupanje u postotcima, Φ_{RDF} je rezultat dobiven numeričkom simulacijom, a Φ_{EXP} je eksperimentalni rezultat.

2.9. Faktor interferencije

Pojava interferencije u ovom radu analizirana je putem faktora interferencije. Faktor interferencije određuje se usporedbom otpora katamarana i dvostruke vrijednosti otpora jednotrupnog broda iste forme prema sljedećoj formuli:

$$I_f = \frac{R_{t_k} - 2R_{t_m}}{2R_{t_m}} \quad (40)$$

gdje R_{t_k} označava ukupni otpor katamarana, a R_{t_m} ukupni otpor jednotrupnog broda (eng. *monohull*) iste forme.

3. PRIPREMA NUMERIČKIH SIMULACIJA

3.1. Priprema numeričke simulacije za jednotrupni brod

Numerička simulacija viskoznog strujanja oko modela jednotrupnog broda Delft 372 je provedena u komercijalnom programskom paketu STAR-CCM+. Važno je naglasiti kako su eksperimentalni rezultati, kao i forma modela prikazani u literaturi [24].

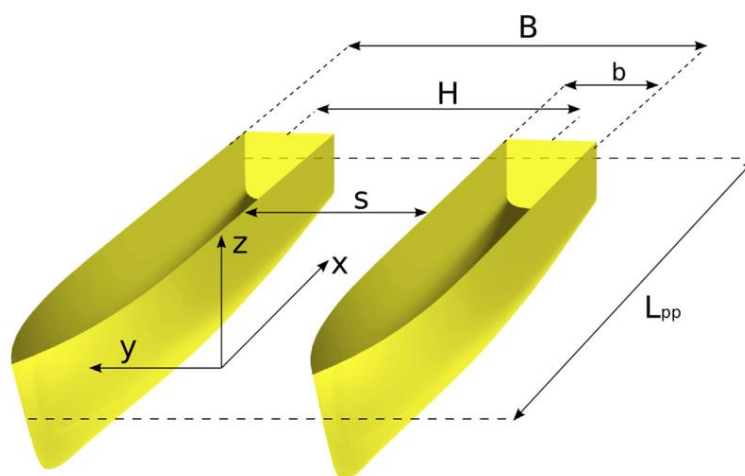
3.1.1. Glavne značajke katamarana

Podaci o geometriji broda preuzeti su iz eksperimenta [24] te su prikazani u tablici 1.

Tablica 1. Glavne značajke modela jednotrupnog broda Delft 372

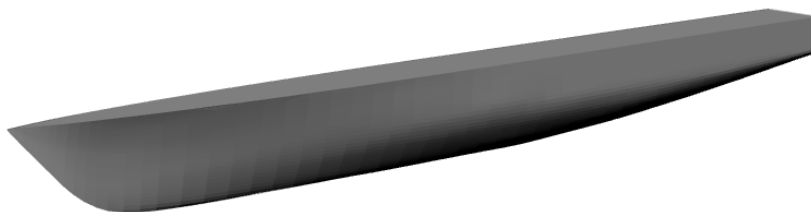
Podatak	Simbol	Vrijednost	Mjerna jedinica
Duljina preko svega	L_{OA}	3,11	m
Duljina između perpendikulara	L_{pp}	3	m
Širina trupa	b	0,24	m
Gaz	T	0,15	m
Istisnina	Δ	43,535	kg
Vertikalni položaj težišta mase	KG	0,34	m
Uzdužni položaj težišta mase	LCG	1,41	m

Na slici 4. prikazana je geometrija katamarana Delft 372 zajedno s osnovnim značajkama ovog modela.



Slika 4. Geometrija katamarana

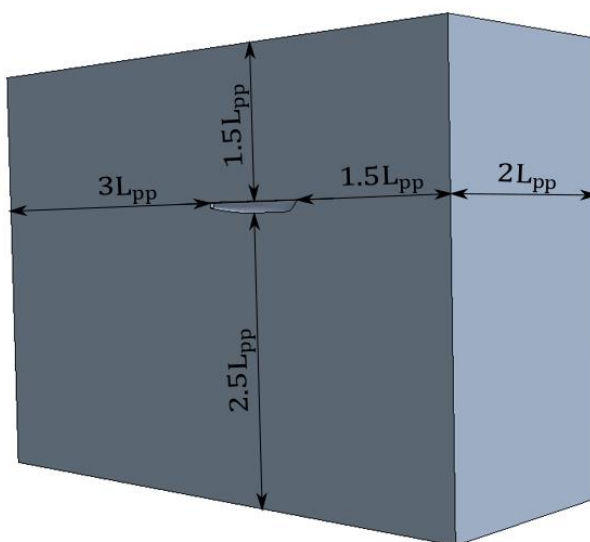
U sklopu numeričkih simulacija modela jednotrupnog broda Delft 372 ispitan je samo jedan trup katamarana, kao što će to biti objašnjeno u nastavku. Ispitani 3D model prikazan na slici 5.



Slika 5. Jednotrupni brod Delft 372

3.1.2. Proračunska domena

Za dobivanje adekvatnih rezultata potrebno je zadati dovoljnu veličinu domene za provođenje numeričkih simulacija. U slučaju premale domene može doći do neželjene refleksije valova na rubovima domene te je stoga granice domene potrebno dovoljno udaljiti od modela broda [25]. Granice proračunske domene su zadane odgovarajućim udaljenostima od modela broda kao što je to prikazano na slici 6.

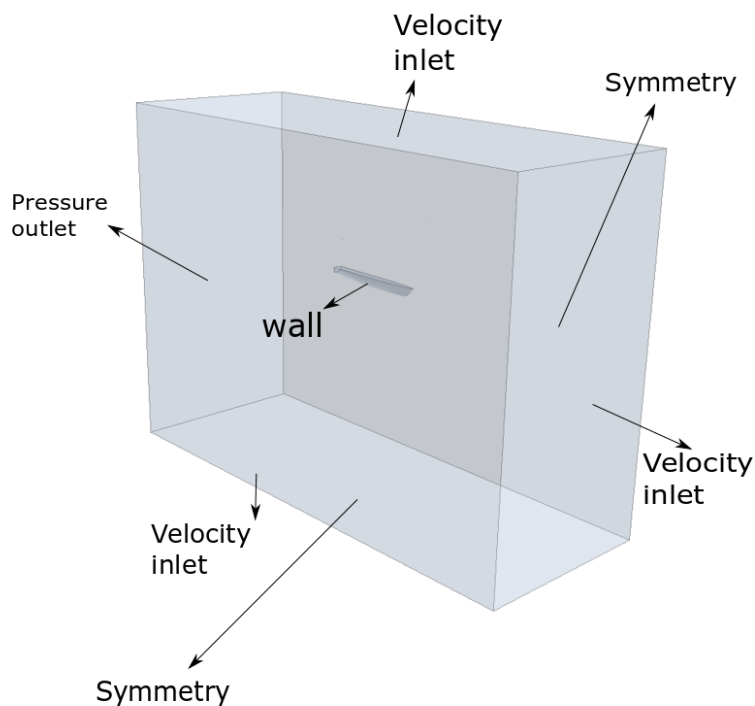


Slika 6. Dimenzije proračunske domene

Nakon što je proračunska domena generirana potrebno je zadati rubne uvjete na granicama domene.

3.1.3. Rubni uvjeti

Unutar proračunske domene prikazane slikom 6. nalazi se polovica modela jednotrupnog broda Delft 372. Ravnina simetrije dijeli model broda na dva simetrična dijela od kojih je jedan izvan, a drugi unutar domene. Razlog tome je što se strujanje oko trupa broda smatra simetričnim, budući je i sama forma broda simetrična. Na simetralnoj ravnini zadaje se rubni uvjet simetrije, a ostali rubni uvjeti prikazani su na slici 7..



Slika 7. Rubni uvjeti domene

Važno je naglasiti kako su numeričke simulacije provedene na način da model broda miruje, a fluid nastrujava na njega. Kako nema protoka kroz trup broda na samom modelu broda zadan je rubni uvjet zida (eng. *wall*). Na ulaznoj, donjoj i gornjoj granici zadan je Dirichletov rubni uvjet, odnosno zadana je brzina strujanja. Na izlaznoj granici definiran je von Neumannov rubni uvjet, odnosno zadano je da je gradijent tlaka jednak nuli.

3.1.4. Diskretizacija proračunske domene

Proračunska domena podijeljena je na manje volumene u kojima su potom diskretizirane jednačbe koje opisuju viskozno, nestacionarno strujanje. Dakle, provedena je prostorna i vremenska diskretizacija proračunske domene. Proces prostorne diskretizacije proračunske

domene proveden je alatom za automatsku izradu mreže u STAR-CCM+ (eng. *Automated Mesh*). Unutar samog alata mogu se odabrati različiti parametri koji će utjecati na izgled generirane mreže, a te postavke su odabrane prema uputama STAR-CCM+ *tutoriala* za simulaciju pokusa otpora kontejnerskog broda [26].

Generirana mreža mora imati dodatna profinjenja u područjima u kojima je moguće očekivati velike gradijente fizikalnih veličina. Tako posebnu pažnju treba posvetiti:

- graničnom sloju,
- slobodnoj površini i
- Kelvinovom kutu.

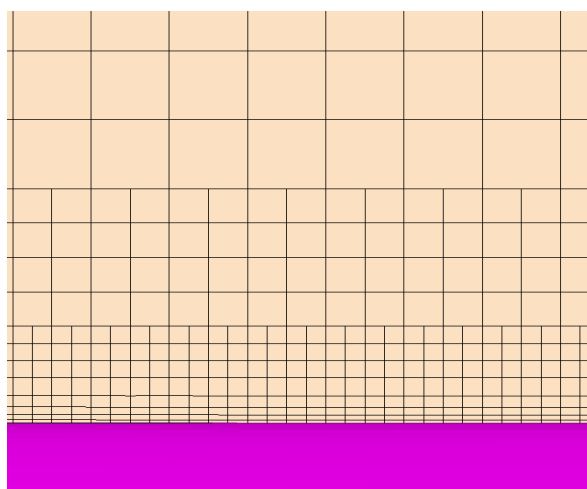
3.1.5. Granični sloj

Strujanjem uz trup broda formira se granični sloj u kojem su prisutni veliki gradijenti brzine i tlaka te to područje zahtijeva finiju diskretizaciju. Uobičajeno se u području graničnog sloja primjenjuju prizmatične ćelije koje su u smjeru normale u odnosu na stijenku. U tablici 2. prikazane su postavke za diskretizaciju graničnog sloja.

Tablica 2. Postavke diskretizacije graničnog sloja za model jednotrupnog broda Delft 372

Opcija	Vrijednost	Mjerna jedinica
Debljina graničnog sloja	0,005	m
Broj ćelija u graničnom sloju	4	/
Faktor povećanja ćelija	1,5	/

U sklopu diskretizacije graničnog sloja treba voditi računa i o osnovnoj mreži, odnosno o veličini ćelija u preostalom dijelu mreže. Naime, želi se postići fini prijelaz od prve ćelije na trupu broda do ćelija izvan graničnog sloja kako bi se izbjegla neželjena numerička difuzija rješenja zbog loše generirane mreže.

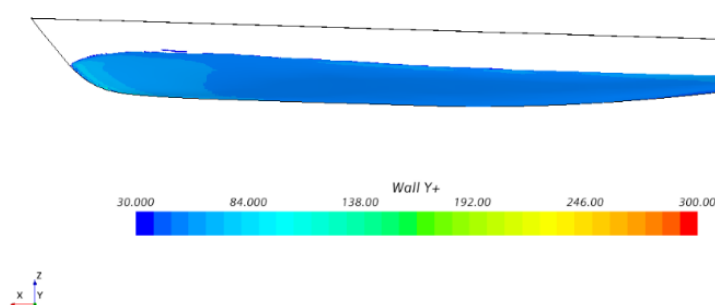


Slika 8. Diskretizacija graničnog sloja uz model jednotrupnog broda Delft 372

Na slici 8. dan je prikaz provedene diskretizacije graničnog sloja, a ljubičastom bojom prikazan je model jednotrupnog broda Delft 372.

Odabran model turbulencije može funkcionirati u linearnom i inercijskom podsloju, ali se zbog broja generiranih ćelija uobičajeno postavlja u inercijski podsloj. Provjera udaljenosti prve ćelije od trupa provedena je prikazom y^+ značajke po trupu broda, slika 9.

Prema slici 3. parametar y^+ treba biti u granicama $30 < y^+ < 300$, kako bi se prva ćelija nalazila u logaritamskom području te kako bi bilo opravdano primijeniti zidne funkcije.



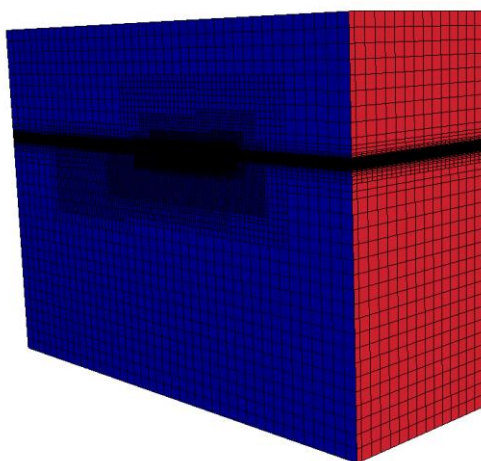
Slika 9. Parametar y^+ po trupu broda

Na temelju slike 9. moguće je uočiti kako je vrijednost parametra y^+ unutar zahtijevanih granica te kako je opravdano primijeniti zidne funkcije.

3.1.6. Slobodna površina

Prilikom plovidbe broda na slobodnoj površini stvaraju se valovi. Kako bi se pravilno zabilježila ta složena pojava potrebno je dodatno profiniti proračunsku domenu u području slobodne površine.

Približna vrijednost maksimalne visine valova očitana je iz eksperimentalnih podataka [24] te je generiran pravokutnik duž cijele x - y ravnine i u smjeru osi z obuhvaća predviđenu visinu valova. Potom se zadaje željeni postotak profinjenja osnovne ćelije kako bi se osiguralo 20 ćelija po valnoj visini prema preporukama International Towing Tank Conference (ITTC) [25]. Na slici 10. prikazana je diskretizirana proračunska domena na kojoj je moguće uočiti profinjenje slobodne površine. Uz navedeno profinjenje dodana su još dva veća pravokutnika za dodatnu diskretizaciju slobodne površine, kako bi se osigurao postepeni prijelaz iz finije diskretizacije prema grubljoj.



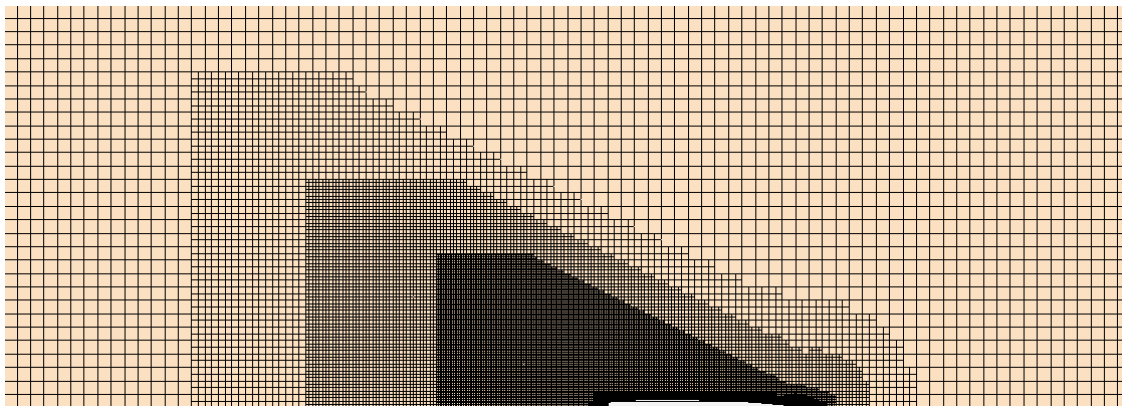
Slika 10. Diskretizacija slobodne površine

Na slici 10. također se može uočiti finija mreža oko trupa broda. Razlog tomu je dodatno profinjenje mreže unutar tog područja proračunske domene zbog velikih gradijenata fizikalnih veličina. Pomoću dodatnih volumenskih profinjenja na krmi i pramcu, kao i u blizini samog trupa, napravljeno je dodatno profinjenje ovog područja.

3.1.7. Kelvinov kut

Kelvinov kut opisuje kut koji zatvara pravac širenja poprečnih i razilaznih valova iza broda sa njegovom uzdužnom osi. U dubokoj vodi Kelvinov kut ne ovisi o formi broda i brzini te iznosi

19°28'. Kako bi se vjerodostojno opisao sustav valova iza broda, potrebno je profiniti područje koje taj kut zatvara. Ovo je napravljeno primjenom tri pravokutnika različite veličine zakrenutih za iznos Kelvinovog kuta.



Slika 11. Fina mreža modela jednotrupnog broda Delft 372 pri $Fr = 0,75$

Na slici 11. moguće je uočiti profinjenje u ravni slobodne površine, odnosno profinjenje za dobivanje realne slike sustava valova iza broda.

3.1.8. Generirane mreže

Za najveću brzinu, odnosno $Fr = 0,75$, generirane su tri mreže različitih gustoća: gruba, srednja i fina mreža.

Tablica 3. Broj ćelija za $Fr = 0,75$ i model jednotrupnog broda Delft 372

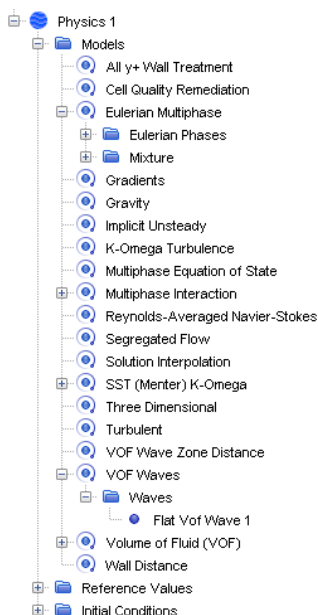
Mreža	Broj ćelija	Osnovna veličina ćelije
Gruba	884 713	0,05 m
Srednja	1 822 220	0,035 m
Fina	2 142 973	0,025 m

U tablici 3. prikazan je broj ćelija generiranih mreža, kao i osnovne veličine ćelija za pojedinu mrežu. Naime sva profinjenja zadana su u odnosu na osnovnu veličinu ćelije te se srednja i fina mreža generirala na način da se jedino promijenila osnovna veličina ćelije i to s približnim odnosom $\sqrt{2}$.

Za numeričku simulaciju pri $Fr = 0,5$ generirana je fina mreža s 2 054 829 ćelija, dok fina mreža pri $Fr = 0,3$ ima 2 008 648 ćelija.

3.1.9. Fizikalni model numeričke simulacije

Fizikalni model postavljen u programskom paketu STAR-CCM+ prikazan je na slici 12.



Slika 12. Fizikalni model viskoznog strujanja [26]

Zadana su svojstva zraka i vode te je odabran višefazni model (eng. *Euler Multithphase*) kojim se definiraju dva različita fluida. Praćenje i lociranje slobodne površine provedeno je metodom udjela fluida u volumenu (eng. *Volume of fluid* - VOF).

Unutar numeričkih simulacija modela jednotrupnog broda Delft 372, modelu su dozvoljena dva stupnja slobode, to jest poniranje i posrtanje. Proračun ovih veličina, kao i interakcija fluida i tijela, provedena je modelom „*Dynamic Fluid Body Interaction*“.

3.1.10. Zadavanje numeričkog rješavača (eng. *Solver*)

Odabran je implicitni rješavač (eng. *Implicit Unsteady*) unutar kojeg je postavljen vremenski korak prema sljedećoj relaciji:

$$\Delta t = \frac{T}{c} \quad (41)$$

gdje je $T = \frac{L_{pp}}{v}$, odnosno period definiran kao omjer duljine i brzine broda. Koeficijent c poprima različite vrijednosti ovisno o vremenskom koraku koji se koristi. Tako koeficijent c za grubi, srednji i fini vremenski korak redom iznosi 50, 100 i 200.

Maksimalan broj iteracija po vremenskom koraku postavljen je na 5 iteracija, a ukupno vrijeme trajanja proračuna na 165 sekundi.

U početku numeričke simulacije model broda je fiksiran te je nakon jedne sekunde modelu broda omogućeno slobodno gibanje s dopuštenim stupnjevima slobode gibanja.

Za kriterij konvergencije postavljena je apsolutna vrijednost razlike posljednja dva rezultata ukupnog otpora broda te ona ne smije biti veća od 0,02 N. Kada se postigne zadani kriterij u posljednjih 10 iteracija, proračun se prekida.

Tablica 4. Vremenski koraci za $Fr = 0,75$

Vremenski korak	Δt , s
Grubi	0,015
Srednji	0,0074
Fini	0,004

Vremenski korak u numeričkim simulacijama pri $Fr = 0,5$ iznosi 0,0055 s, dok pri $Fr = 0,3$ iznosi 0,0092 s.

3.2. Priprema numeričke simulacije pokusa otpora modela katamarana s razmakom $H/L = 0,167$

Na slici 4. prikazane su glavne značajke modela katamarana Delft 372. Tako veličina H predstavlja međusobnu udaljenost između dva trupa katamarana. U ovom potpoglavlju dan je prikaz pripreme numeričkih simulacija pokusa otpora za model katamarana s međusobnim razmakom između trupova $H = 0,501$ m.

3.2.1. Glavne značajke katamarana

Glavne značajke pojedinih trupova katamarana zadane su u Tablici 1. Istisnina katamarana dvostruko je veća od istisnine modela jednotrupnog broda Delft 372 te ona iznosi $\Delta = 87,07$ kg.



Slika 13. Delft 372 katamaran s razmakom $H/L = 0,167$

Na slici 13. prikazan je 3D model ispitanog katamarana. Važno je naglasiti kako su u sklopu ovog rada provedene numeričke simulacije za dva razmaka između trupova te da razmak između trupova $H = 0,501$ m predstavlja uži razmak.

3.2.2. Diskretizacija proračunske domene

Proračunska domena za numeričke simulacije modela jednotrupnog broda Delft 372 prolazi simetralnom ravninom broda i dijeli ga na dva simetrična dijela. Na toj granici zadan je rubni uvjet simetrije. Sličan pristup primjenjuje se kod proračunske domene za numeričke simulacije viskoznog strujanja oko katamarana, gdje se granica te rubni uvjet simetrije postavlja točno na polovici međusobne udaljenosti trupova katamarana. Proračunska domena je dalje diskretizirana prema postupku opisanom u potpoglavlju 3.1.4. uz navedene iznimke u nastavku.

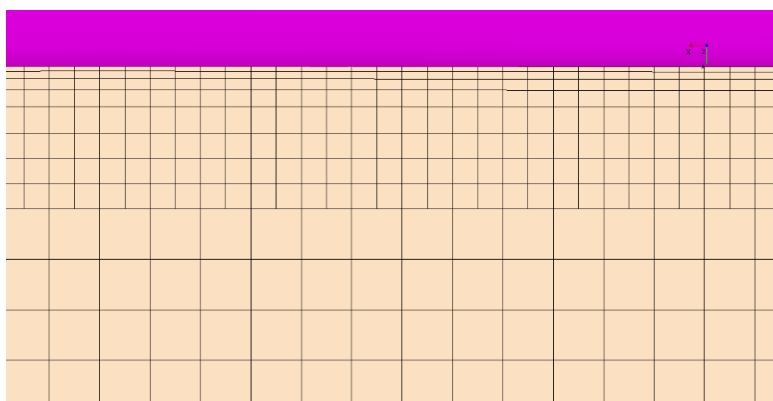
3.2.3. Diskretizacija graničnog sloja

Diskretizacija graničnog sloja provedena je prema parametrima prikazanim u tablici 5.

Tablica 5. Postavke diskretizacije graničnog sloja katamarana s razmakom $H/L = 0,167$

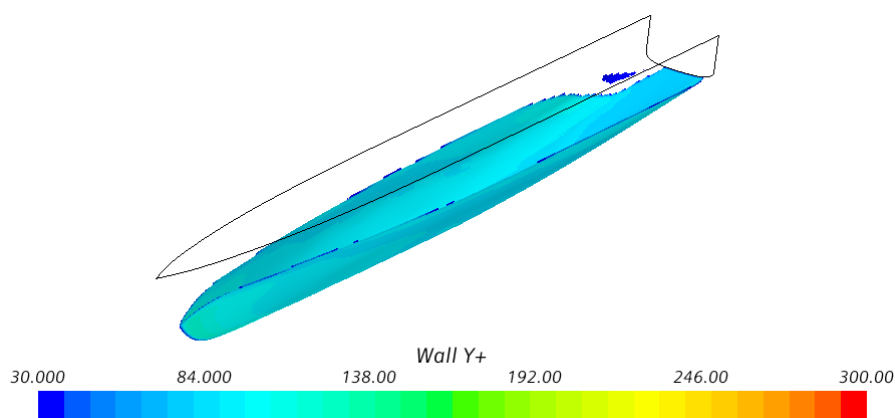
Opcija	Vrijednost	Mjerna jedinica
Debljina graničnog sloja	0,005	m
Broj ćelija u graničnom sloju	4	/
Faktor povećanja ćelija	1,5	/

Dobivena diskretizacija u području graničnog sloja prikazana je na slici 14., gdje je ljubičastom bojom prikazan trup katamarana.



Slika 14. Diskretizacija graničnog sloja katamarana s razmakom $H/L = 0,167$

Bitno je ostvariti postepen prijelaz od prve ćelije na trupu do ćelija izvan sloja prizama te postaviti prvu ćeliju unutar granica bezdimenzijske udaljenosti od stijenke $30 < y^+ < 300$, a što je, kao što se može uočiti na slici 15., zadovoljeno.



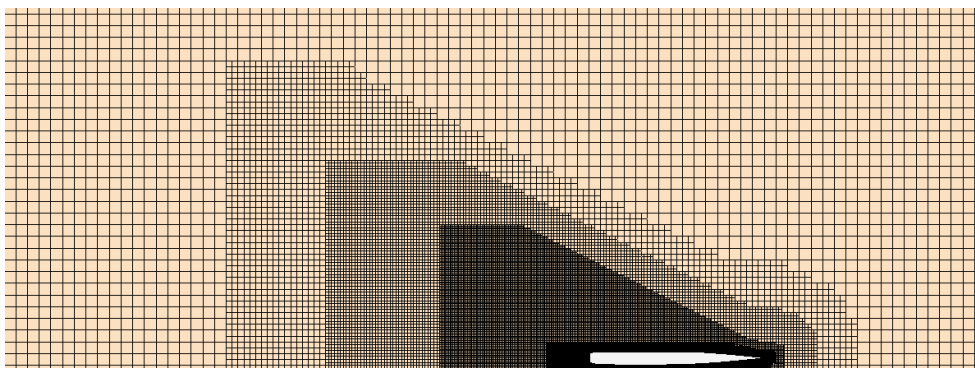
Slika 15. Parametar y^+ na trupu katamarana s razmakom $H/L = 0,167$

3.2.4. Diskretizacija slobodne površine

Slobodna površina diskretizirana je prema pravilima određenim u potpoglavlju 3.1.6. uz proširenje pravokutnika za profinjenje slobodne površine na području između trupova katamarana.

3.2.5. Kelvinov kut

Diskretizacija Kelvinovog kuta i područja između trupova katamarana vidljiva je na slici 16.



Slika 16. Fina mreža katamarana s razmakom $H/L = 0,167$, pogled odozgo

Na slici 16. prikazana je generirana mreža. Moguće je uočiti profinjenje za postizanje fizikalne slike valova, kao i profinjenje između trupova katamarana. Ovo profinjenje je posebno važno, kako bi se dobili točniji rezultati u području gdje je pojava interferencija najizraženija. Ravnina simetrije postavljena je na polovici međusobnog razmaka između trupova.

3.2.6. Generirane mreže

Za $Fr = 0,75$ generirane su tri mreže različite gustoće, dok je fina mreža iz tablice 6. korištena i za numeričke simulacije pri preostala dva Froudeova broja. U tablici 6. dan je broj ćelija svake pojedine mreže, kao i osnovna veličina ćelije.

Tablica 6. Broj ćelija i osnovna veličina ćelije za $Fr = 0,75$

Mreža	Broj ćelija	Osnovna veličina ćelije
Gruba	824 092	0,05 m
Srednja	1 690 234	0,035 m
Fina	2 322 168	0,025 m

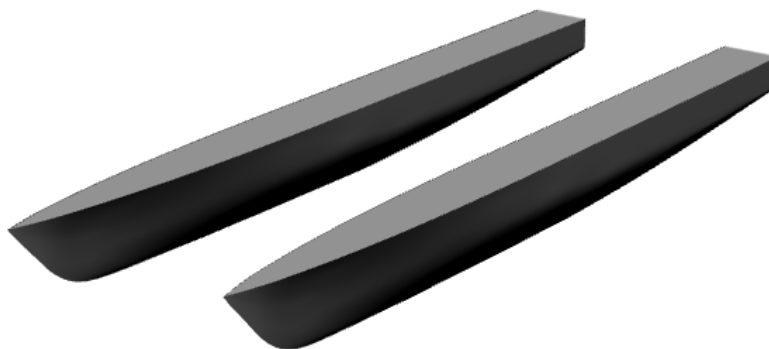
3.2.7. Ostale postavke numeričke simulacije pokusa otpora modela katamarana s razmakom $H/L = 0,167$

Numeričke simulacije viskoznog strujanja oko modela katamarana pripremljene su na isti način kao i numeričke simulacije viskoznog strujanja oko modela jednorupnog broda te su zahtijevale korekcije prikazane u prethodnim potpoglavljima. Tako su geometrija i rubni uvjeti domene, fizikalni model i numerički rješavač isti kao što je prikazano u potpoglavlju 3.1.

3.3. Priprema numeričke simulacije pokusa otpora modela katamarana s razmakom $H/L = 0,3$

U ovom potpoglavlju prikazana je priprema numeričkih simulacija viskoznog strujanja oko modela katamarana s većim međusobnim razmakom između trupova koji iznosi $H = 0,9$ m.

3.3.1. Postavke numeričke simulacije



Slika 17. Delft 372 katamaran s razmakom $H/L = 0,3$

Na slici 17. prikazan je 3D model ispitanog katamarana s većim razmakom između trupova.

Kako je jedina razlika između katamarana u prijašnjem potpoglavlju i katamarana analiziranog u ovom potpoglavlju međusobni razmak trupova, same postavke numeričke simulacije jednake su za oba slučaja.

Ravnina simetrije postavljena je na polovici međusobnog razmaka između trupova te je proračunska domena proširena, a time i diskretizacija slobodne površine kako bi se obuhvatilo cijelo područje između trupova.

Za $Fr = 0,75$ generirane su tri mreže različite gustoće dok je fina mreža iz tablice 7. primijenjena i za numeričke simulacije pri preostala dva Froudeova broja.

Tablica 7. Broj ćelija i osnovna veličina ćelije za katamaran s razmakom $H/L = 0,3$

Kvaliteta mreže	Broj ćelija	Osnovna veličina ćelije
Gruba	892 165	0,05 m
Srednja	1 867 476	0,035 m
Fina	2 611 108	0,025 m

4. ANALIZA REZULTATA

4.1. Analiza rezultata jednotrupnog broda

U ovom poglavlju prikazani su rezultati viskoznog strujanja oko modela jednotrupnog broda Delft 372. Prikazani su dobiveni rezultati ukupnog otpora, trima i vrijednosti urona broda primjenom različitih gustoća mreže i vremenskih koraka te je procijenjena numerička nesigurnost u određivanju ukupnog otpora modela broda. Također je provedena i validacija.

4.1.1. Verifikacija numeričkih simulacija

U ovom potpoglavlju prikazani su rezultati dobiveni numeričkim simulacijama oko modela jednotrupnog broda Delft 372. Pri $Fr = 0,75$ provedene su numeričke simulacije primjenom različitih gustoća mreže u svrhu verifikacije generirane mreže. Pri $Fr = 0,75$ i uz primjenu fine mreže ispitana su još dva vremenska koraka, grubi i srednji vremenski korak u svrhu verifikacije vremenskog koraka. Proračun verifikacije proveden je radi proračuna numeričke nesigurnosti, kao i određivanja prihvatljive gustoće mreže i veličine vremenskog koraka. U tablicama 8. i 9. prikazane su vrijednosti potrebne za izračun numeričke nesigurnosti. Prvo su izračunate numeričke nesigurnosti za finu mrežu i vremenski korak pri $Fr = 0,75$, a potom je izračunata nesigurnost numeričke simulacije, koja ne premašuje iznos od 1,5%, što predstavlja zadovoljavajući rezultat.

Tablica 8. Koeficijenti numeričke nesigurnosti mreže

Φ_1, N	Φ_2, N	Φ_3, N	ε_{21}, N	ε_{32}, N	R_i	U_i
36,912	37,242	36,474	0,330	-0,766	-0,431	0,383

Tablica 9. Koeficijenti numeričke nesigurnosti vremenskog koraka

Φ_1, N	Φ_2, N	Φ_3, N	ε_{21}, N	ε_{32}, N	R_i	U_i
36,912	36,728	38,431	-0,184	1,703	-0,106	0,852

Tablica 10. Numerička nesigurnost mreže i vremenskog koraka

	$U_G, \%$	$U_T, \%$	$U_{SN}, \%$
Ukupni otpor	0,519	1,151	1,263

4.1.2. Validacija rezultata

U ovom potpoglavlju dani su rezultati provedene validacije rezultata. U tablici 11. prikazani su rezultati dobiveni numeričkim simulacijama i eksperimentom, gdje R_T predstavlja ukupni otpor, τ^o je kut trima izražen u stupnjevima, a σ označava iznos urona u metrima. Indeks RDF odnosi na numeričke rezultate, a EXP označava rezultate dobivene eksperimentom.

Tablica 11. Rezultati jednotrupnog broda modela Delft 372

Fr	Mreža	R_{t_RDF} , N	R_{t_EXP} , N	τ^o_{RDF} , °	τ^o_{EXP} , °	σ_{RDF} , m	σ_{EXP} , m
0,3	Fina	5,582	6,26	-0,18	-0,10	-0,0035	-0,0010
0,5	Fina	19,956	22	-1,15	-1,05	-0,0083	-0,0031
0,75	Fina	36,912	41	-1,75	-1,60	-0,0010	-0,0019

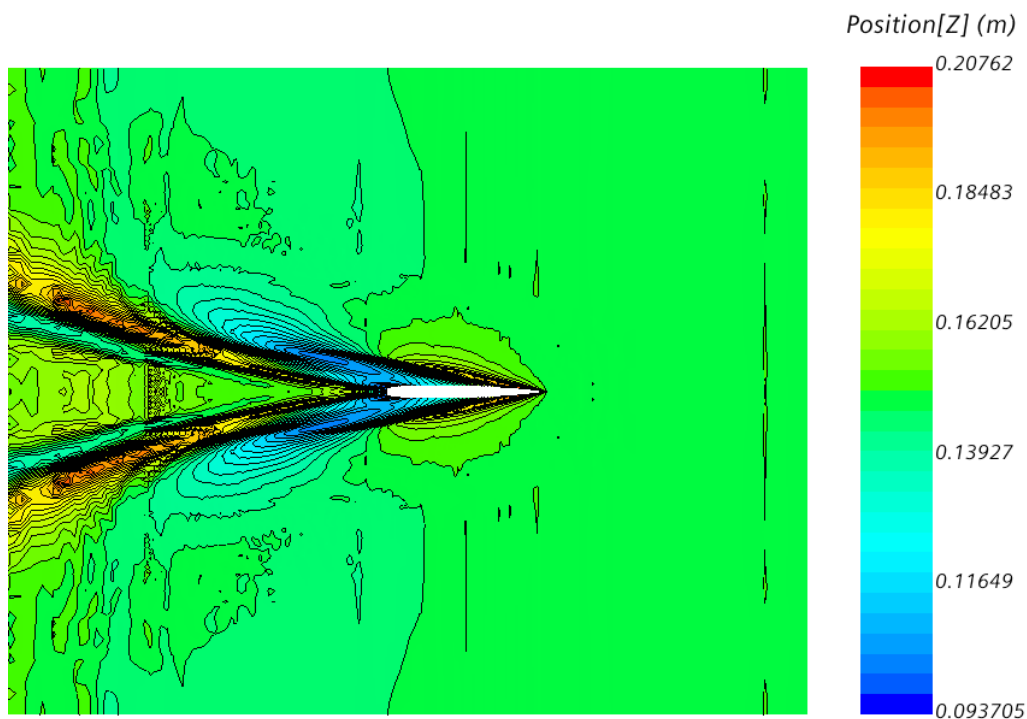
Najveće dobiveno relativno odstupanje RD ukupnog otpora iznosi -10,8% te je dobiveno pri najnižoj vrijednosti Fr . Dobiveno relativno odstupanje bilo je i očekivano iz dva razloga. Prvi razlog vezan je uz primjenu nepomične geometrijske mreže, odnosno mreže koja nije u mogućnosti pratiti dinamički kut trima modela broda. Smatra se da bi se primjenom preklapajuće mreže (eng. *overset mesh*) ostvarili točniji rezultati, što može predstavljati smjer daljnjih istraživanja. Drugi važan razlog dobivenog relativnog odstupanja vezan je uz veličinu modela, odnosno uz provedena eksperimentalna ispitivanja. Naime, kod malih modela mjerna nesigurnost je znatno veća te se stoga dobiveno relativno odstupanje svakako može pripisati dijelom i mjernoj nesigurnosti. Slično je uočeno i u [8], gdje su autori primjenom RDF-a također dobili slična relativna odstupanja te isti trend, odnosno niže vrijednosti ukupnog otpora u usporedbi s eksperimentom.

Dobivene vrijednosti kuta trima pokazuju zadovoljavajuće slaganje s eksperimentom. Može se uočiti kako su se primjenom RDF-a dobili nešto veći iznosi kuta trima, odnosno dobivena je nešto veća zatega u usporedbi s eksperimentalnim rezultatima. U daljnjim istraživanjima trebalo bi ispitati primjenu preklapajuće mreže te usporediti dobivene rezultate kuta trima s rezultatima dobivenim u ovom radu. Naime, važno je naglasiti kako se veća zatega može povezati s nižim vrijednostima otpora, zbog smanjenog iznosa oplakane površine. Stoga, točnijom procjenom kuta trima dobila bi se i točnija procjena ukupnog otpora modela jednotrupnog broda Delft 372. Uron broda prema eksperimentalnim i numeričkim rezultatima poprima male vrijednosti, koje je u eksperimentu vrlo teško izmjeriti. Premda su vrijednosti

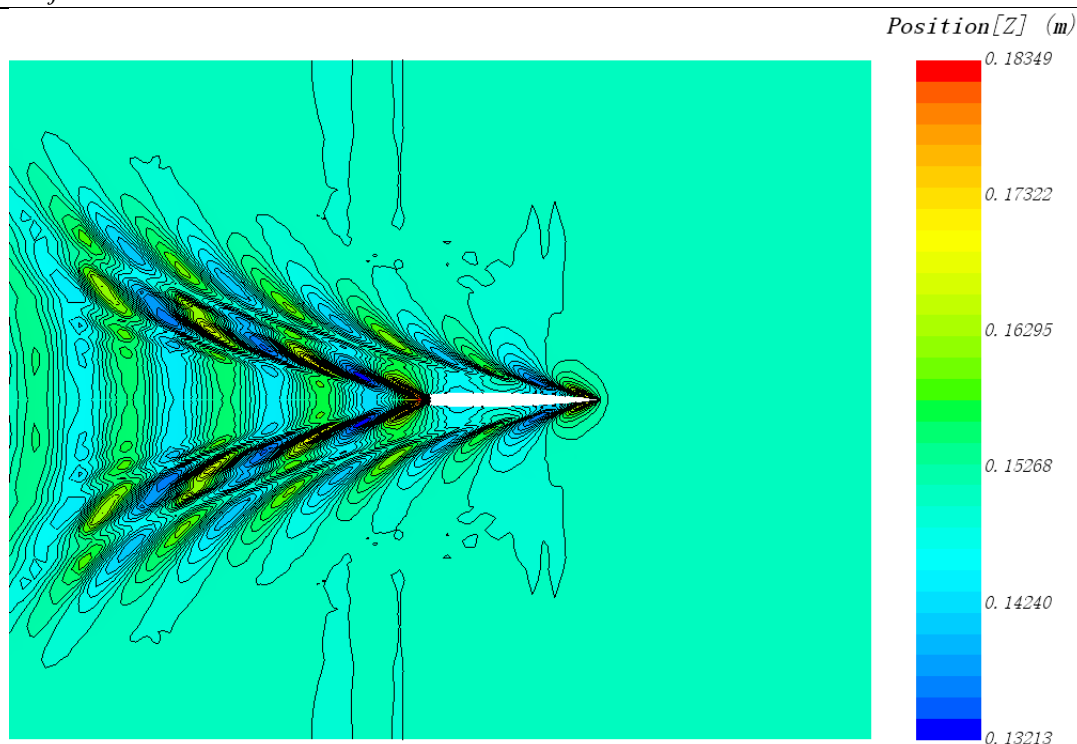
relativnih odstupanja relativno velika dobiveni rezultati su prihvatljivi s obzirom da su vrijednosti urona male te iznose svega nekoliko milimetara.

4.1.3. Slike valova

Slike valova pri najvećoj i najmanjoj brzini za koje su provedene numeričke simulacije prikazane su na slikama 18. i 19..



Slika 18. Slika valova pri $Fr = 0,75$ dobivena finom mrežom



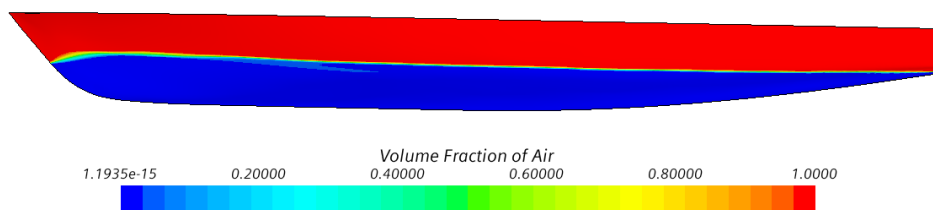
Slika 19. Slika valova pri $Fr = 0,3$ dobivena finom mrežom

Pregledom slika valova pri različitim brzinama broda jasno je vidljivo da se fizikalniji prikaz dobio za najmanju brzinu, to jest za $Fr = 0,3$. Ovo se može pripisati utjecaju trima. Naime, pri većim brzinama brod ima i veće posrtanje, pri čemu mu se pramac izdiže iznad vode, odnosno dobiva dinamički trim. U tom slučaju bilo bi poželjno da ovaj kut trima prati i diskretizirana mreža, odnosno da generirana profinjnjenja posebno u području slobodne površine prate stvaran položaj slobodne površine. Ovo je moguće postići primjenom preklapajuće mreže, koja bi bila vezana uz usko područje oko modela broda te bi se gibala zajedno s njim. Takav model diskretizacije nije se primijenio u ovome radu te predstavlja smjer u kojem bi se svakako trebala provoditi daljnja istraživanja.

4.1.4. Položaj slobodne površine po modelu jednotrupnog broda

Položaj slobodne površine po modelu jednotrupnog broda dobiven primjenom fine mreže pri $Fr = 0,5$ prikazan je na slici 20. Važno je naglasiti kako je položaj slobodne površine po jednotrupnom brodu simetričan, budući da je primijenjen rubni uvjet simetrije. Simetričan položaj slobodne površine, odnosno isti položaj slobodne površine s lijeve i desne strane

jednotrupnog broda je očekivan, što nije dobiveno za slučaj katamarana, kao što će biti prikazano u nastavku.



Slika 20. Položaj slobodne površine po modelu jednotrupnog broda dobiven finom mrežom pri $Fr = 0,5$

Crvenom bojom predstavljene su ćelije u kojima je zastupljenost faze zraka 100%, dok su tamno plavom bojom predstavljene ćelije koje imaju potpunu zastupljenost faze vode. Na slici 20. raspoznaje se i prijelazni dio slobodne površine, koji sadrži obje faze. Taj sloj fizikalno predstavlja raspršene kapljice vode i pjenu koja se javlja na brijegovima i dolovima valova.

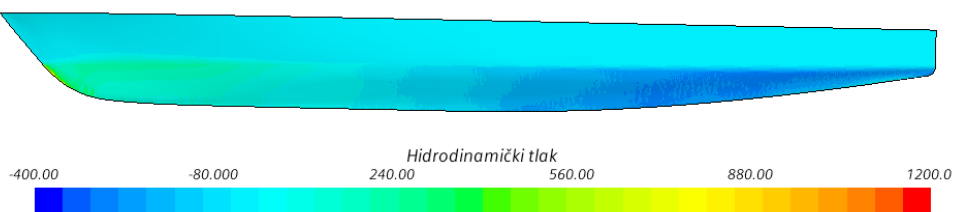
4.1.5. Hidrodinamički tlak

Važna značajka u brodskoj hidrodinamici je raspodjela hidrodinamičkog tlaka po trupu broda. Oduzimanjem ukupnog tlaka od hidrostatskog tlaka dobiva se hidrodinamički tlak prema jednadžbi:

$$p_d = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (42)$$

gdje p_d predstavlja hidrodinamički tlak.

Slika 21. prikazuje raspodjelu hidrodinamičkog tlaka po trupu modela pri $Fr = 0,5$ dobivenog primjenom fine mreže.



Slika 21. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka po jednotrupnom brodu pri $Fr = 0,5$

Pregledom slike 21. jasno je vidljiva razlika u vrijednosti hidrodinamičkog tlaka na pramcu i krmi te se može uočiti područje najvećeg tlaka na pramcu. Daljnjim strujanjem fluida hidrodinamički tlak pada prema krmi, gdje je dobiven podtlak. Kako je unutar numeričkih simulacija modelu dopušteno posrtanje, uslijed dobivene raspodjele hidrodinamičkog tlaka u području pretlaka model će izranjati, dok će u području podtlaka model uranjati. Stoga je dobivena zatega, odnosno veći gaz na krmi u odnosu na gaz na pramcu, što je i bilo za očekivati.

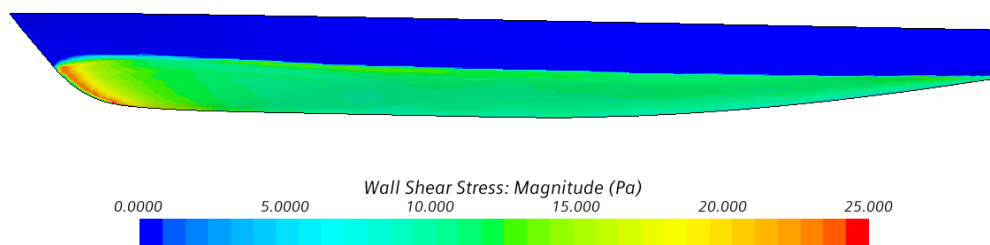
4.1.6. Tangencijalno naprezanje na trupu

Tangencijalno naprezanje uzrokovano djelovanjem fluida opisao je Newton zakonom viskoznosti, koji u pojednostavljenoj formi ima oblik:

$$\tau_w = \mu \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad (43)$$

gdje τ_w predstavlja tangencijalno naprezanje na stijenci.

Analizom jednadžbe (43) jasno je kako tangencijalno naprezanje ovisi o viskoznosti fluida te gradijentu brzine na stijenci. Gradijent brzine na stijenci bit će veći pri većim Froudeovim brojevima te će shodno tomu i tangencijalno naprezanje biti veće.



Slika 22. Raspodjela tangencijalnog napreznja po jednotrupnom brodu dobivena finom mrežom pri $Fr = 0,5$

Nastrujavanjem fluida na pramac počinje se formirati granični sloj koji zbog svoje male debljine ima veliki gradijent brzine. Shodno tome, na slici 22. moguće je uočiti najveće naprezanje baš na tom dijelu trupa. Postepeno se od pramca prema krmi formira konačna debljina graničnog sloja te se tangencijalno naprezanje ujednačava. Može se uočiti linija slobodne površine te je plavom bojom označeno područje interakcije zraka s trupom, koji zbog svoje male viskoznosti ne stvara značajno tangencijalno naprezanje.

4.2. Analiza rezultata katamarana s razmakom $H/L = 0,167$

U ovom potpoglavlju prikazani su rezultati viskoznog strujanja oko trupa katamarana modela Delft 372. Prikazani su dobiveni rezultati ukupnog otpora, trima i urona broda pri različitim gustoćama mreže i vremenskim koracima te je procijenjena numerička nesigurnost u određivanju ukupnog otpora modela katamarana pri najvećem iznosu Froudeovog broja. Provedena je i usporedba s eksperimentalnim rezultatima, kao i s rezultatima numeričke simulacije modela jednotrupnog broda.

Rezultati su radi preglednosti prikazani na jednom trupu katamarana.

4.2.1. Verifikacija numeričke simulacije

U tablicama 12. i 13. prikazane su vrijednosti potrebne za proračun numeričke nesigurnosti simulacije. Prvo su izračunate numeričke nesigurnosti za mrežu i vremenski korak pri $Fr = 0,75$, a potom je dobivena nesigurnost numeričke simulacije koja iznosi 3,5%, što predstavlja zadovoljavajući rezultat. Dobiven veći iznos nesigurnosti numeričke simulacije viskoznog strujanja oko katamarana u odnosu na simulaciju viskoznog strujanja oko jednotrupnog broda je očekivan, s obzirom da je strujanje oko katamarana znatno složenije u odnosu na strujanje oko jednotrupnog broda.

Tablica 12. Koeficijenti numeričke nesigurnosti mreže

Φ_1, N	Φ_2, N	Φ_3, N	ε_{21}, N	ε_{32}, N	R_i	U_i
80,808	80,081	78,982	-0,727	-1,099	0,664	1,800

Tablica 13. Koeficijenti numeričke nesigurnosti vremenskog koraka

Φ_1, N	Φ_2, N	Φ_3, N	ε_{21}, N	ε_{32}, N	R_i	U_i
80,808	78,728	78,622	-2,079	-0,106	18,909	2,186

Tablica 14. Numerička nesigurnost mreže i vremenskog koraka

	$U_G, \%$	$U_T, \%$	$U_{SN}, \%$
Ukupni otpor	2,228	2,710	3,508

4.2.2. Validacija rezultata

U tablici 15. su prikazani rezultati dobiveni numeričkom simulacijom i eksperimentom.

Tablica 15. Usporedba rezultata simulacije s eksperimentom za katamaran s razmakom $H/L = 0,167$

Fr	Mreža	R_{t_RDF} , N	R_{t_EXP} , N	τ^o_{RDF} , °	τ^o_{EXP} , °	σ_{RDF} , m	σ_{EXP} , m
0,3	Fina	12,390	12,5	-0,20	-0,10	-0,0048	-0,0018
0,5	Fina	53,344	57	-2,24	-2,02	-0,0120	-0,0045
0,75	Fina	80,808	87	-2,14	-1,99	-0,0083	-0,0020

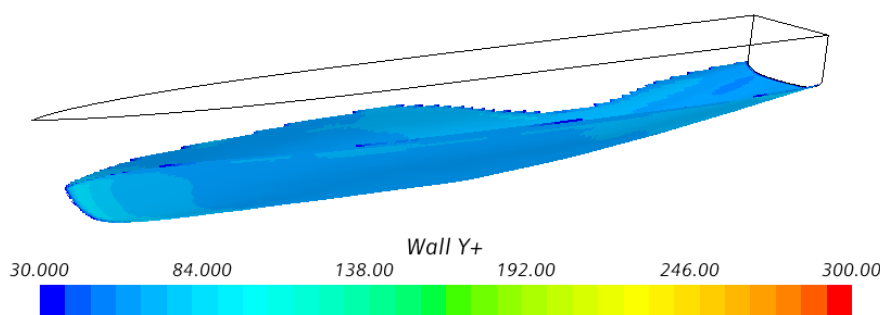
Pregledom dobivenih numeričkih rezultata, moguće je uočiti kako je ponovno dobiven manji ukupni otpor numeričkom simulacijom nego eksperimentom. Najveće dobiveno relativno odstupanje otpora broda iznosi -9,6% što je zadovoljavajući rezultat prema činjenicama iznesenim u potpoglavlju 4.1.2.

Dobivene vrijednosti kuta trima su nešto veće od onih dobivenih eksperimentom te se zbog toga mogu objasniti i nešto niže dobivene vrijednosti ukupnog otpora numeričkim simulacijama u odnosu na eksperiment.

Vrijednosti urona uglavnom se kreću između 1 i 10 mm te budući je riječ o malim iznosima, koje je vrlo teško eksperimentalno mjeriti, može se zaključiti kako su dobiveni zadovoljavajući rezultati.

4.2.3. Parametar y^+

Na slici 23. prikazana je raspodjela parametra y^+ dobivena primjenom fine mreže pri $Fr = 0,5$.

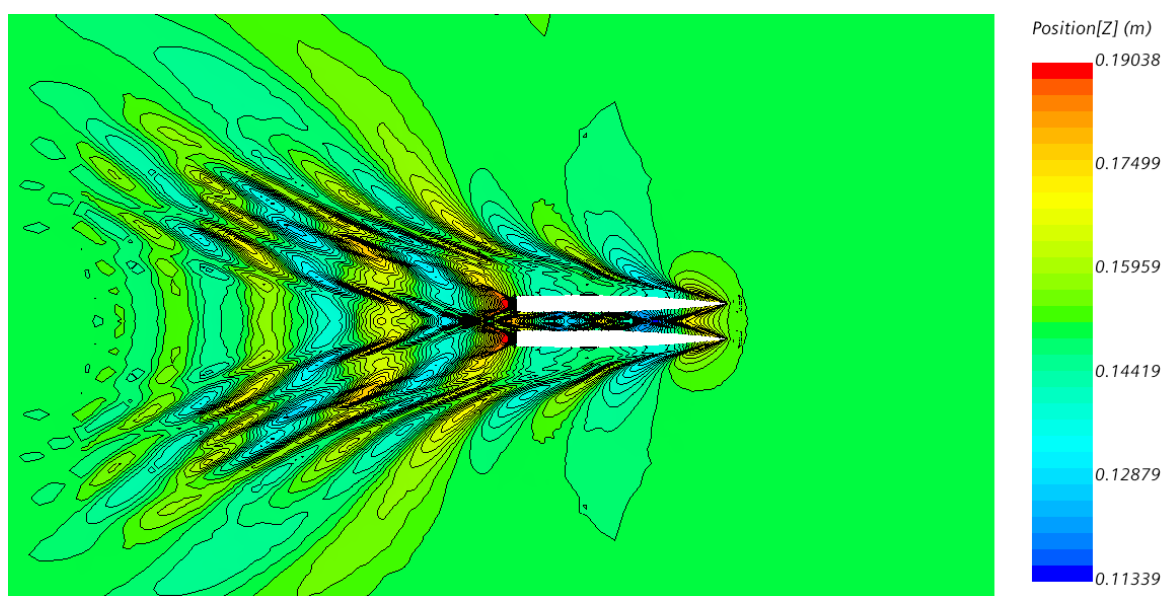


Slika 23. Parametar y^+ dobiven primjenom fine mreže za katamaran s razmakom $H/L = 0,167$ pri $Fr = 0,5$

Slika 23. potvrđuje dobru diskretizaciju graničnog sloja te opravdanost primjene zidnih funkcija unutar numeričke simulacije. Uočava se razlika u odnosu na već analizirano strujanje oko modela jednotrupnog broda (Slika 9.), jer distribucija parametra y^+ nije simetrična, odnosno s lijeve i desne strane trupa je dobivena različita raspodjela. Ovo se može pripisati različitom strujanju između trupova katamarana i strujanju na vanjskom dijelu trupa.

4.2.4. Slike valova

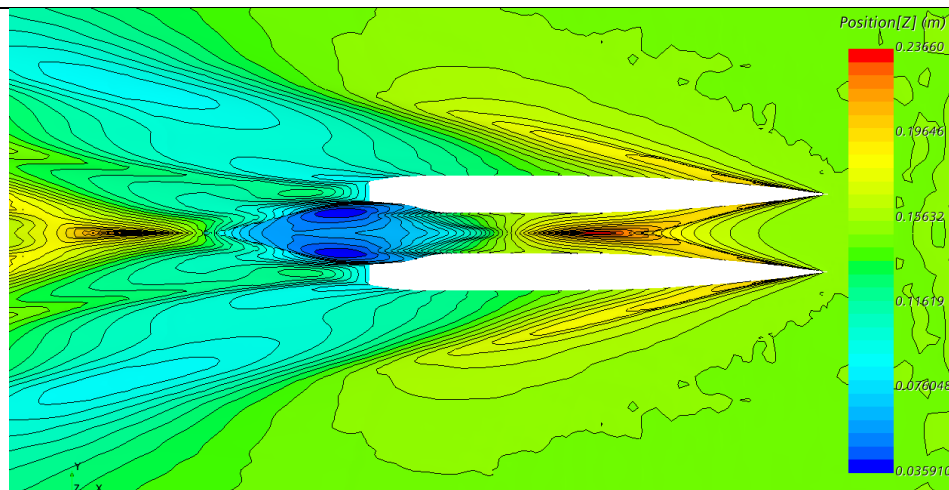
Na slici 24. prikazana je dobivena slika valova za najmanju ispitanu brzinu katamarana pri užem međusobnom razmaku između trupova.



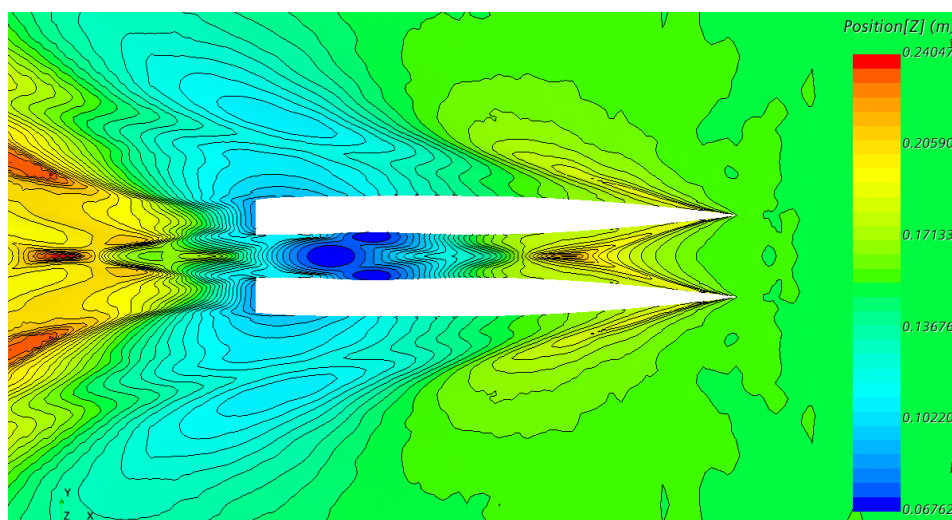
Slika 24. Slika valova primjenom fine mreže za katamaran s razmakom $H/L = 0,167$ pri $Fr = 0,3$

Ponovno je dobivena najrealnija slika valova na slobodnoj površini pri najmanjem Froudeovom broju zbog prethodno navedenih razloga. Slika valova katamarana jasno prikazuje pojavu interferencije između valnih sustava pojedinih trupova katamarana. Važno je naglasiti kako uslijed ove interferencije može doći do smanjenja valnih visina (povoljna interferencija) ili do povećanja (nepovoljna interferencija).

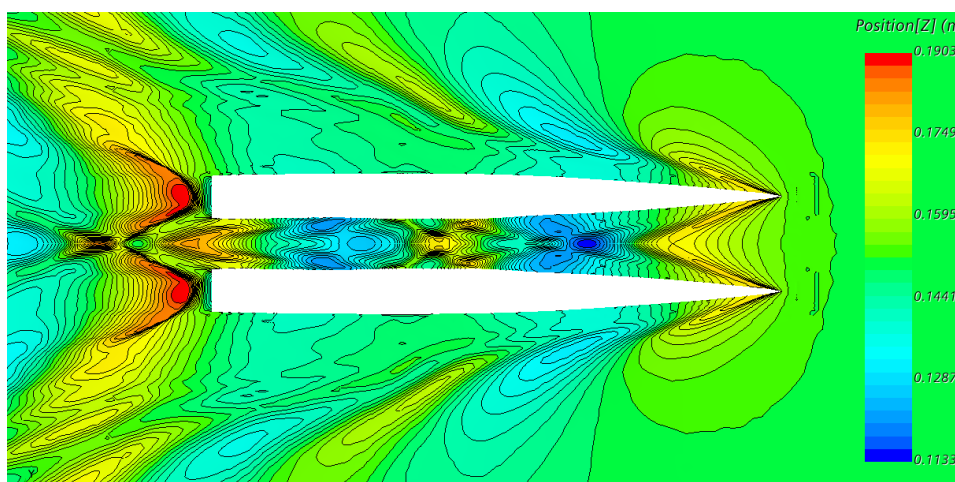
Detaljniji prikaz interferencije valova na finoj mreži pri različitim brzinama dan je na slikama 25. – 27..



Slika 25. Interferencija valova kod katamarana s razmakom $H/L = 0,167$ pri $Fr = 0,75$



Slika 26. Interferencija valova kod katamarana s razmakom $H/L = 0,167$ pri $Fr = 0,5$



Slika 27. Interferencija valova kod katamarana s razmakom $H/L = 0,167$ pri $Fr = 0,3$

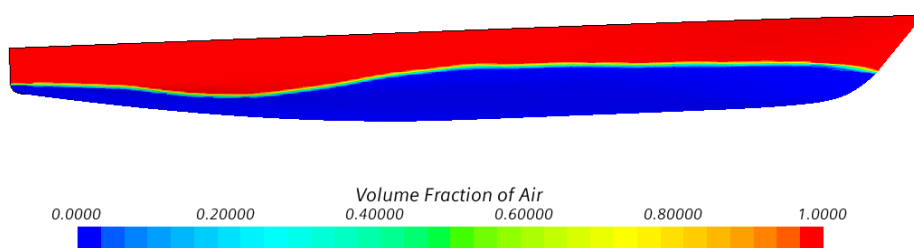
Na slici 27. dan je prikaz interferencije valova pri najmanjem ispitanom Froudeovom broju. U prostoru između trupova formirani su valni brjegovi i dolovi. Uslijed formiranja valnih brjegova i dolova, izgled slobodne površine na unutarnjem dijelu između trupova katamarana bit će različit od izgleda slobodne površine na vanjskom dijelu trupova katamarana. Zbog toga, oplakana površina jednog trupa katamarana bit će različitog iznosa od oplakane površine jednotrupnog broda iste forme pri istoj brzini.

Slika 26. prikazuje interferenciju pri $Fr = 0,5$ te je moguće uočiti formirani valni brjieg i dol u prostoru između trupova. Formirani val utjeCAT će na iznos ukupnog otpora katamarana, uslijed različite oplakane površine, kao i uslijed promjene brzine strujanja u dijelu između trupova. Uslijed nepovoljne interferencije očekuje se povećanje faktora interferencije.

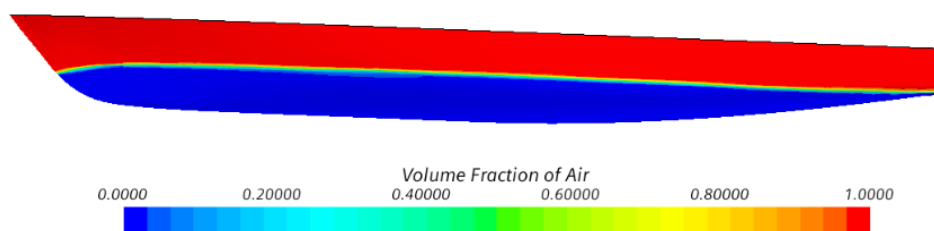
Pri najvećoj ispitanjoj brzini dobivena interferencija prikazana slikom 25. slična je kao i interferencija prikazana slikom 26. Razlika je u tome što se valni dol pri $Fr = 0,75$ nalazi gotovo izvan područja između trupova te više ne utječe, u tolikoj mjeri, na ukupni otpor katamarana. Zbog velike brzine strujanja očekuje se najveći ukupni otpor katamarana pri ovoj brzini, ali i manja vrijednost faktora interferencije u odnosu na $Fr = 0,5$.

4.2.5. Položaj slobodne površine po trupu katamarana

Prikazom interferencije valova u prostoru između trupova katamarana i prikazom raspodjele parametra y^+ jasno je da slobodna površina nema isti položaj s unutarnje i vanjske strane trupa. U nastavku je prikazana slobodna površina pri $Fr = 0,5$ s obje strane trupa kako bi se prikazao utjecaj interferencije na izgled slobodne površine.



Slika 28. Slobodna površina po unutarnjem dijelu trupa katamarana s razmakom $H/L = 0,167$ pri $Fr = 0,5$

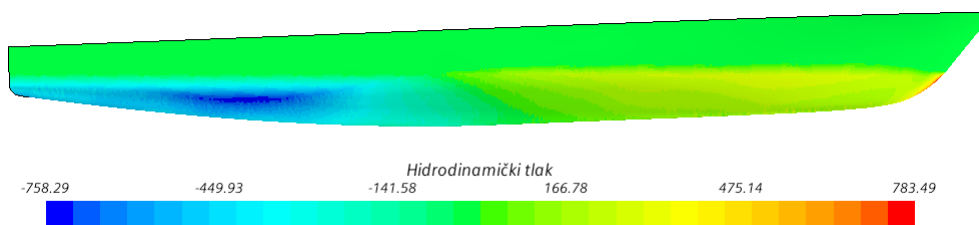


Slika 29. Slobodna površina po vanjskom dijelu trupa katamarana s razmakom $H/L = 0,167$ pri $Fr = 0,5$

Usporedbom slika 28. i 26. moguće je uočiti kako valni dol odgovara položaju slobodne površine na krmu katamarana. Nadalje usporedbom slika 28. i 20. vidljivo je da su položaji slobodnih površina gotovo identični, što ukazuje da će se povećanje otpora uslijed nepovoljne interferencije valova dogoditi na unutarnjem dijelu između trupova katamarana, dok se vanjsko strujanje neće bitnije promijeniti.

4.2.6. Hidrodinamički tlak

Raspodjela hidrodinamičkog tlaka po unutarnjem dijelu trupa katamarana prikazana je na slici 30.

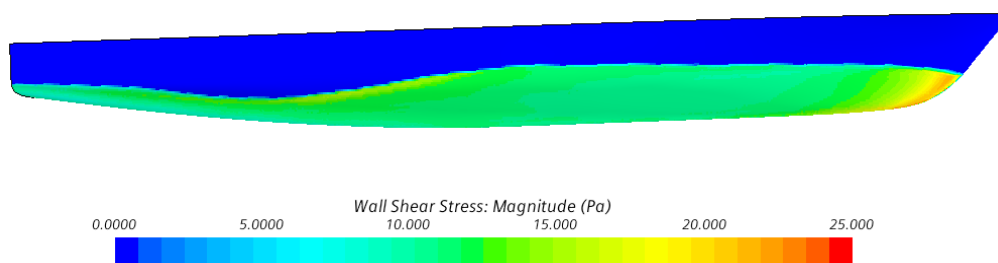


Slika 30. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka po trupu katamarana s razmakom $H/L = 0,167$ pri $Fr = 0,5$

Uočava se pad tlaka od pramca prema krmu što će uzrokovati zategu katamarana. Pregledom raspodjele hidrodinamičkog tlaka odozdo, moguće je uočiti da polje hidrodinamičkog tlaka nije u potpunosti simetrično s obzirom na simetralu trupa, što se može pripisati pojavi interferencije. Usporedbom slika 30. i 28. uočava se kako dol vala odgovara položaju niskog područja tlaka. Područje niskog tlaka uzrokovat će veće tangencijalno naprezanje što će u konačnici povećati ukupni otpor.

4.2.7. Tangencijalno naprezanje na trupu

Na slici 31. prikazuje se raspodjela tangencijalnog naprezanja na unutarnjem dijelu trupa katamarana.



Slika 31. Raspodjela naprezanja na trupu katamarana s razmakom $H/L = 0,167$ pri $Fr = 0,5$

Kao što je spomenuto u prethodnom potpoglavlju može se uočiti povećanje naprezanja na stijenci u području valnog dola, odnosno područja niskog tlaka (Slika 31.), što je posljedica interferencije. Povećanje tangencijalnog naprezanja dovodi do povećanja ukupnog otpora i faktora interferencije što je prikazano u nastavku.

4.2.8. Faktor interferencije za katamaran s razmakom $H/L = 0,167$

Spomenute razlike u ukupnim otporima katamarana moguće je analizirati pomoću faktora interferencije, koji se računa prema jednadžbi (40). Ukoliko je iznos faktora interferencije manji od nula, riječ je o povoljnoj interferenciji, a u slučaju da je faktor interferencije veći od nula, riječ je o nepovoljnoj interferenciji.

Tablica 16. Faktor interferencije za katamaran s razmakom $H/L = 0,167$

Fr	I_f
0,3	0,108
0,5	0,337
0,75	0,095

Kao što je već komentirano, pri $Fr = 0,5$ dobiven je najveći iznos faktora interferencije, što znači da je pri ovom Froudeovom broju interferencija najnepovoljnija. Pri ovom Froudeovom broju, ukupni otpor katamarana je za 34% veći u odnosu na dvostruku vrijednost ukupnog otpora jednotrupnog broda iste forme. Ovo se može pripisati nepovoljnoj interferenciji valova

prikazanoj na slici 26., gdje je moguće uočiti valni brijeg i dol između trupova katamarana koji uzrokuju značajno povećanje ukupnog otpora katamarana.

Na slici 25. prikazana je interferencija valova pri $Fr = 0,75$ te se na njoj može uočiti sličan valni brijeg i dol kao i kod $Fr = 0,5$. Razlika je u tome što je u ovome slučaju valni dol gotovo izvan područja između trupova te stoga više nema toliki utjecaj na ukupni otpor katamarana. Zbog toga katamaran pri najvećoj ispitanoj brzini ima povoljniju interferenciju valova u odnosu na onu pri $Fr = 0,5$, a time i manji faktor interferencije.

4.3. Analiza rezultata katamarana s razmakom $H/L = 0,3$

U ovom potpoglavlju prikazani su rezultati viskoznog strujanja oko trupa katamarana modela Delft 372. Prikazani su dobiveni rezultati ukupnog otpora, trima i urona broda pri različitim gustoćama mreže i vremenskim koracima te je procijenjena numerička nesigurnost u određivanju ukupnog otpora modela katamarana pri najvećem iznosu Froudeovog broja. Provedena je i usporedba s eksperimentalnim rezultatima, kao i s rezultatima numeričke simulacije za model jednotrupnog broda.

4.3.1. Verifikacija numeričke simulacije

U tablicama 17. i 18. prikazane su vrijednosti potrebne za proračun numeričke nesigurnosti simulacije. Prvo su izračunate numeričke nesigurnosti za mrežu i vremenski korak pri $Fr = 0,75$, a potom je dobivena nesigurnost numeričke simulacije koja ne prelazi 1%, što je zadovoljavajući rezultat. Važno je naglasiti kako je u slučaju katamarana s užim razmakom između trupova dobivena veća vrijednost numeričke nesigurnosti simulacije, što je bilo očekivano kako je pojava interferencije znatno izraženija kod katamarana s užim razmakom između trupova te je time i strujanje oko katamarana s užim razmakom između trupova složenije.

Tablica 17. Koeficijenti numeričke nesigurnosti mreže

Φ_1, N	Φ_2, N	Φ_3, N	ε_{21}, N	ε_{32}, N	R_i	U_i
74,537	74,256	75,046	-0,011	0,790	-0,014	0,395

Tablica 18. Koeficijenti numeričke nesigurnosti vremenskog koraka

Φ_1, N	Φ_2, N	Φ_3, N	ε_{21}, N	ε_{32}, N	R_i	U_i
74,537	74,453	72,870	-0,084	-1,583	0,057	0,007

Tablica 19. Numerička nesigurnost mreže i vremenskog koraka

	$U_G, \%$	$U_T, \%$	$U_{SN}, \%$
Numerička nesigurnost	0,529	0,009	0,529

4.3.2. Validacija rezultata

U tablici 20. prikazani su rezultati dobiveni numeričkim simulacijama i eksperimentom.

Tablica 20. Usporedba rezultata numeričke simulacije s eksperimentom za katamaran s razmakom $H/L = 0,3$

Fr	Mreža	R_{t_RDF}, N	R_{t_EXP}, N	$\tau^o_{RDF}, ^\circ$	$\tau^o_{EXP}, ^\circ$	σ_{RDF}, m	σ_{EXP}, m
0,3	Fina	12,160	12,5	-0,23	-0,19	-0,0038	-0,0011
0,5	Fina	46,142	50	-1,68	-1,55	-0,0081	-0,0037
0,75	Fina	74,537	82	-1,80	-1,60	-0,0097	-0,0004

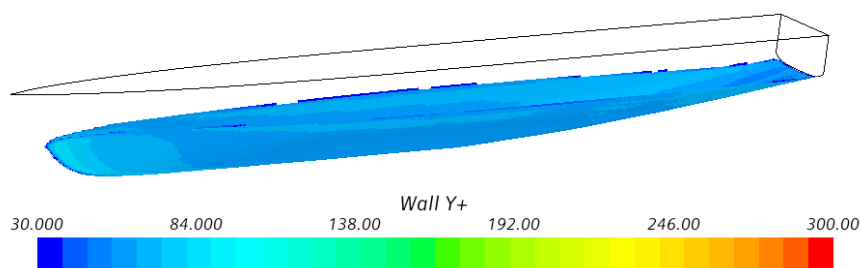
Prema tablici 20. moguće je uočiti kako su ponovno dobiveni manji iznosi ukupnog otpora katamarana numeričkom simulacijom u usporedbi s eksperimentom. Najveće relativno odstupanje ukupnog otpora katamarana iznosi -10,13%, što je zadovoljavajuće prema iznesenom u potpoglavlju 4.1.2.

Dobivene vrijednosti kuta trima, ponovno su malo većeg iznosa nego one iz eksperimenta te je zbog toga dobiven nešto niži ukupni otpor katamarana numeričkom simulacijom.

Vrijednosti urona uglavnom se kreću između 1 i 10 mm, što je dobiveno i kod katamarana s užim razmakom između trupova.

4.3.3. Parametar y^+

Provjera udaljenosti prve ćelije od zida provedena je prikazom parametra y^+ po trupu katamarana. Na slici 32. prikazana je raspodjela parametra y^+ pri $Fr = 0,5$.

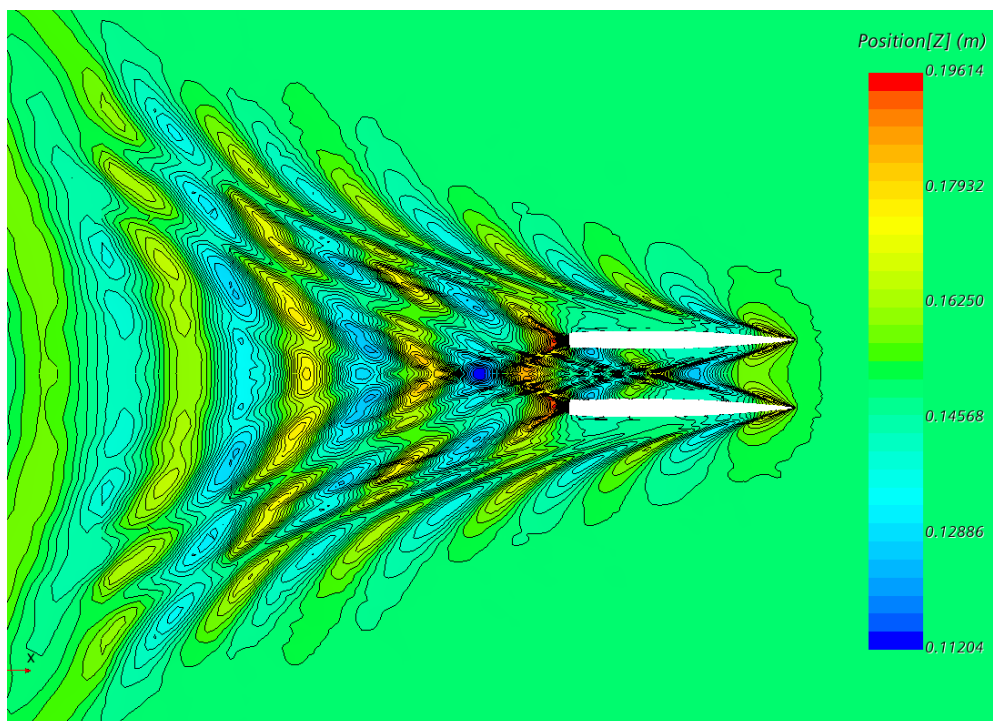


Slika 32. Raspodjela parametra y^+ po trupu katamarana s razmakom $H/L = 0,3$ pri $Fr = 0,5$

Na temelju slike 32. može se zaključiti kako se parametar y^+ nalazi u željenim granicama. Uočava se i gotovo simetrična raspodjela po unutrašnjoj i vanjskoj strani trupa, što može ukazivati na manje izraženu interferenciju u odnosu na onu pri manjem razmaku između trupova katamarana.

4.3.4. Slike valova

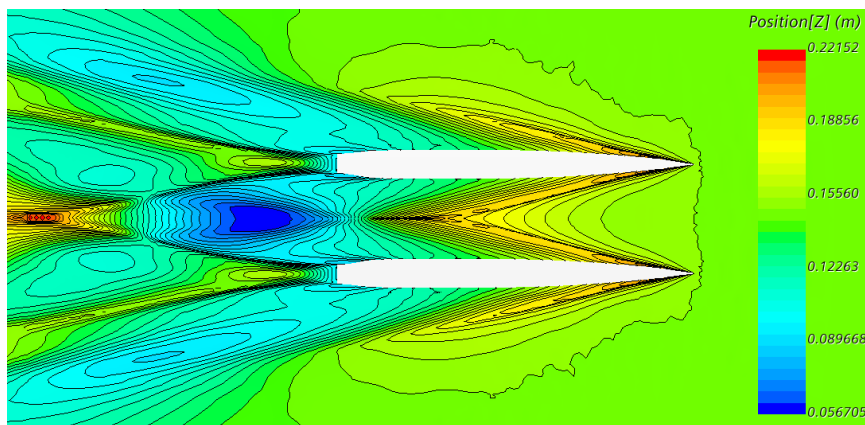
Na slici 33. prikazana je dobivena slika valova pri $Fr = 0,3$ za širi razmak između trupova katamarana.



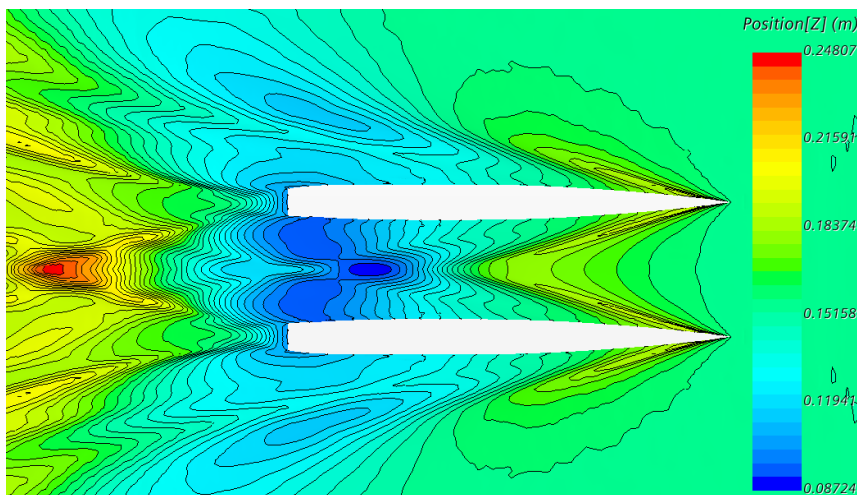
Slika 33. Slika valova katamarana s razmakom $H/L = 0,3$ pri $Fr = 0,3$

Ponovno je dobivena najrealnija slika valova pri najmanjoj vrijednosti Froudeovog broja, zbog već spomenutih razloga opisanih u potpoglavlju 4.1.2.

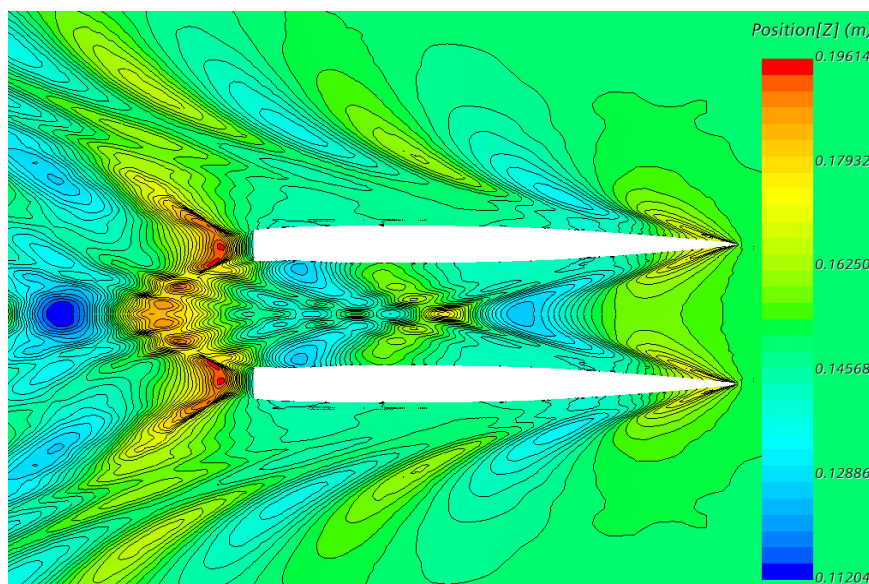
Detaljan prikaz interferencije valova pri različitim brzinama za katamaran sa širim razmakom trupa katamarana dan je na slikama 34. - 36.



Slika 34. Interferencija valova kod katamarana s razmakom $H/L = 0,3$ pri $Fr = 0,75$



Slika 35. Interferencija valova kod katamarana s razmakom $H/L = 0,3$ pri $Fr = 0,5$



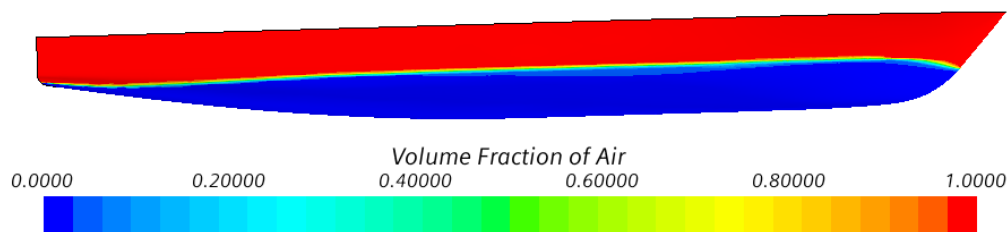
Slika 36. Interferencija valova kod katamarana s razmakom $H/L = 0,3$ pri $Fr = 0,3$

Na slikama 34.-36. moguće je uočiti iste pojave kao i kod katamarana s užim razmakom između trupova, uz jednu bitnu razliku. Usporedbom slika valova katamarana s užim i širim razmakom između trupova, može se uočiti kako je generirani valni brijeg i dol u području između trupova katamarana s razmakom $H/L = 0,3$ više pomaknut prema krmu broda u odnosu na generirani valni brijeg i dol kod katamarana s razmakom $H/L = 0,167$. Ovo je moguće primijetiti pri svim ispitanim brzinama te se stoga u usporedbi ukupnih otpora ova dva katamarana, može očekivati manji ukupni otpor i faktor interferencije za katamaran s većim razmakom između trupova.

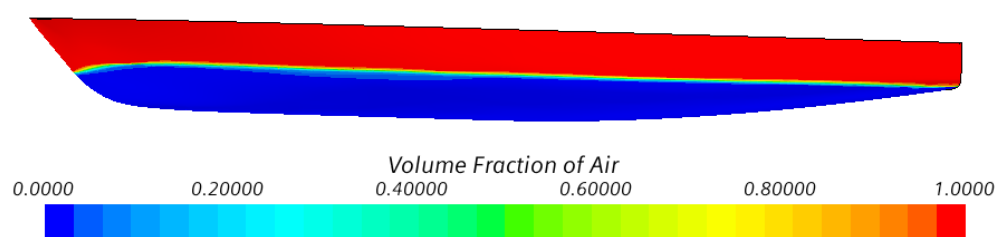
Usporedbom slika 34. i 25. uočava se kako je valni dol kod katamarana s većim razmakom između trupova potpuno iza katamarana, dok se kod katamarana s užim razmakom između trupova još uvijek dijelom nalazi u području između trupova katamarana.

4.3.5. Položaj slobodne površine po trupu katamarana

Usljed manje izraženih posljedica interferencije valova kod katamarana sa širim razmakom između trupova u odnosu na katamaran s užim razmakom između trupova, dobiven je simetričniji prikaz slobodne površine, nego što je to za katamarana s užim razmakom između trupova. Na slikama 37. i 38. dan je prikaz položaja slobodne površine pri $Fr = 0,5$ s unutrašnje i vanjske strane trupa katamarana.



Slika 37. Slobodna površina po unutarnjem dijelu trupa katamarana s razmakom $H/L = 0,3$ pri $Fr = 0,5$

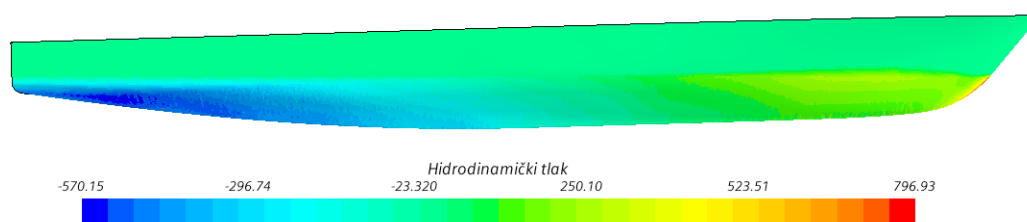


Slika 38. Slobodna površina po vanjskom dijelu trupa katamarana s razmakom $H/L = 0,3$ pri $Fr = 0,5$

Na unutarnjem dijelu trupa (Slika 37.) vidljiv je drukčiji položaj slobodne površine u blizini krme u odnosu na položaj slobodne površine na vanjskom dijelu trupa. U usporedbi sa slikom 28. moguće je zaključiti kako je utjecaj interferencije na položaj slobodne površine znatno manji zbog većeg razmaka između trupova.

4.3.6. Hidrodinamički tlak

Raspodjela hidrodinamičkog tlaka po jednom trupu katamarana prikazana je na slici 39.

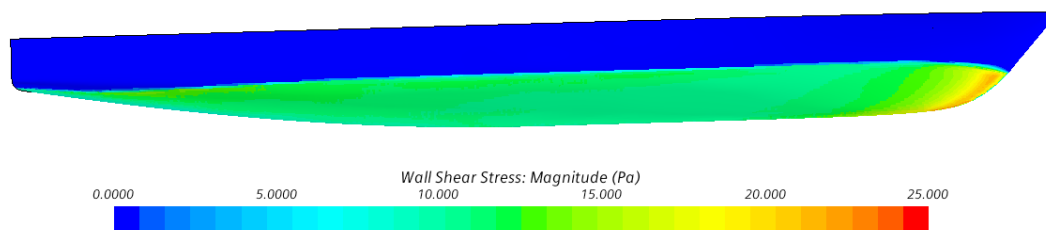


Slika 39. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka po trupu katamarana s razmakom $H/L = 0,3$ pri $Fr = 0,5$

Uočava se pad tlaka od pramca prema krmi što će uzrokovati zategu katamarana. Također pregledom raspodjele hidrodinamičkog tlaka odozdo moguće je uočiti kako je polje hidrodinamičkog tlaka više simetrično nego kod katamarana s užim razmakom između trupova. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka sa širim razmakom između trupova vrlo je slična onoj kod jednotrupnog broda (Slika 21.), što se može pripisati manjem utjecaju interferencije. Moguće je uočiti i područje nižeg tlaka koje se poklapa s valnim dolom kojeg je moguće uočiti na slici 37.

4.3.7. Tangencijalno naprezanje na trupu

Slika 40. prikazuje raspodjelu tangencijalnog naprezanja na unutarnjem dijelu trupa katamarana.



Slika 40. Raspodjela naprezanja na trupu katamarana s razmakom $H/L = 0,3$ pri $Fr = 0,5$

Shodno navedenom u prijašnjem potpoglavlju, moguće je uočiti povećanje tangencijalnog naprezanja na stijenci u području valnog dola, što je posljedica interferencije. Povećanje tangencijalnog naprezanja dovodi do povećanja ukupnog otpora i faktora interferencije, ali kako tangencijalno naprezanje djeluje na manjoj površini očekuje se manji ukupni otpor katamarana i faktor interferencije nego kod katamarana s užim razmakom između trupova pri istoj brzini strujanja.

4.3.8. Faktor interferencije za katamaran s razmakom $H/L = 0,3$

U tablici 21. dani su dobiveni faktori interferencije za katamaran sa širim razmakom između trupova.

Tablica 21. Faktor interferencije za katamaran s razmakom $H/L = 0,3$

Fr	I_f
0,3	0,093
0,5	0,156
0,75	0,001

Važno je napomenuti kako je faktor interferencije ponovno najmanji pri najvećoj brzini te najveći pri $Fr = 0,5$. Postignuti su isti trendovi kao i kod katamarana s užim razmakom između trupova, ali su dobiveni manji iznosi faktora interferencije kod katamarana sa širim razmakom. Prema ovim rezultatima moguće je zaključiti da je pri $Fr = 0,75$ i širem razmaku između trupova gotovo dobivena povoljna interferencija. Stoga bi u budućim istraživanjima bilo zanimljivo ispitati još veći razmak između trupova, u svrhu pojave povoljne interferencije.

4.4. Usporedba rezultata katamarana s razmakom $H/L = 0,167$ i rezultata za jednotrupni brod

Uslijed pojave interferencije ukupni otpor katamarana neće biti jednak dvostrukoj vrijednosti ukupnog otpora jednotrupnog broda iste forme. Dobivene vrijednosti ukupnog otpora modela jednotrupnog broda Delft 372 u ovom potpoglavlju uspoređene su s ukupnim otporom katamarana Delft 372. U tablici 22. prikazana je usporedba ukupnih otpora, kuta trima te urona jednotrupnog broda i katamarana.

Tablica 22. Usporedba rezultata jednotrupnog broda i katamarana s razmakom $H/L = 0,167$

Fr	Mreža	R_{t_k} , N	$2R_{t_m}$, N	τ_k^o , °	τ_m^o , °	σ_k , m	σ_m , m
0,3	Fina	12,390	11,164	-0,20	-0,18	-0,0048	-0,0035
0,5	Fina	53,344	39,912	-2,24	-1,15	-0,0120	-0,0083
0,75	Fina	80,808	73,824	-2,14	-1,75	-0,0083	-0,0100

Analizom ukupnog otpora iz tablice 22. zaključuje se da se interferencija pojavljuje pri svim ispitanim brzinama. Uočena je i razlika u povećanju ukupnog otpora katamarana pri različitim brzinama. Pri najmanjem i najvećem Froudeovom broju razlika između ukupnog otpora katamarana i dvostruke vrijednosti ukupnog otpora jednotrupnog broda je manja, dok je pri Fr

= 0,5 ukupni otpor katamarana značajno veći u odnosu na dvostruki otpor jednotrupnog broda.

Ovo se može pripisati interferenciji valova. Naime, val nastao uslijed interferencije sustava valova lijevog i desnog trupa nalazi se u prostoru između trupova pri $Fr = 0,5$, dok pri $Fr = 0,75$ valni dol gotovo izlazi izvan područja između trupova i više ne utječe u tolikoj mjeri na ukupni otpor katamarana. Dobivena je veća razlika ukupnog otpora katamarana i dvostruke vrijednosti ukupnog otpora jednotrupnog broda pri $Fr = 0,5$. Pri $Fr = 0,3$ povećanje ukupnog otpora katamarana nije u toj mjeri izraženo, kako se radi o manjoj brzini.

4.5. Usporedba rezultata katamarana s razmakom $H/L = 0,3$ i rezultata za jednotrupni brod

U tablici 23. dan je prikaz usporedbe dobivenih rezultata za model jednotrupnog broda s rezultatima dobivenim za katamaran sa širim razmakom između trupova.

Tablica 23. Usporedba rezultata za model jednotrupnog broda i katamarana s razmakom $H/L = 0,3$

Fr	Mreža	R_{t_k} , N	$2R_{t_m}$, N	τ_k^o , °	τ_m^o , °	σ_k , m	σ_m , m
0,3	Fina	12,160	11,164	-0,23	-0,18	-0,0038	-0,0035
0,5	Fina	46,142	39,912	-1,68	-1,15	-0,0081	-0,0083
0,75	Fina	74,537	73,824	-1,80	-1,75	-0,0097	-0,0100

Uočava se da je ukupni otpor katamarana pri svim brzinama veći u odnosu na dvostruku vrijednost ukunog otpora modela jednotrupnog broda. Najveća razlika je uočena pri $Fr = 0,5$, iako u manjoj mjeri nego što je to bilo kod katamarana s užim razmakom između trupova. Ovo se može pripisati nešto povoljnijoj interferenciji valova kod katamarana sa širim razmakom između trupova.

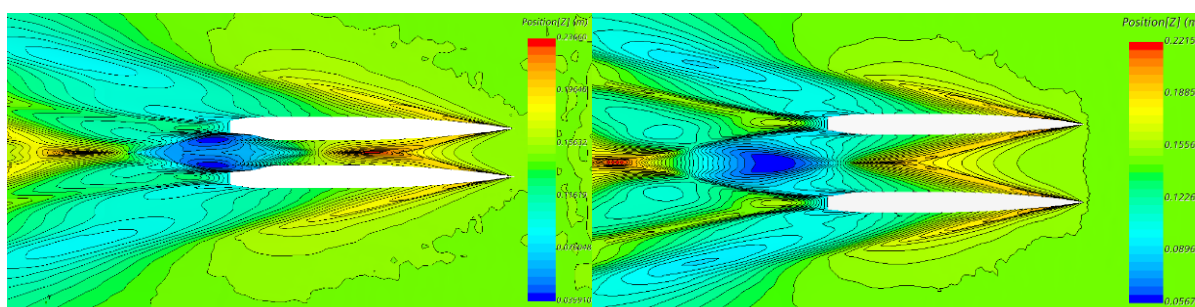
4.6. Usporedba otpora i faktora interferencije katamarana s razmacima $H/L = 0,167$ i $H/L = 0,3$

Pojava interferencija opisana je u prethodnim potpoglavljima za katamaran s užim i širim razmakom između trupova. Zanimljivo je usporediti i njihove rezultate međusobno, kako bi se prikazao utjecaj razmaka između trupova na pojavu interferencije. U tablici 24. dana je usporedba ukupnih otpora i faktora interferencije za katamarane s dva različita razmaka između trupova pri svim ispitanim brzinama.

Tablica 24. Usporedba rezultata katamarana s razmacima $H/L = 0,167$ i $H/L = 0,3$

Fr	Mreža	$R_{t_{0.167}}, N$	$R_{t_{0.3}}, N$	$I_{f_{0.167}}$	$I_{f_{0.3}}$
0,3	Fina	12,390	12,160	0,108	0,093
0,5	Fina	53,344	46,142	0,337	0,156
0,75	Fina	80,808	74,537	0,095	0,001

Moguće je uočiti kako su pri istim brzinama dobiveni veći ukupni otpori za katamaran s užim razmakom između trupova. Trendovi faktora interferencije jednaki su za katamaran s užim i širim razmakom između trupova, gdje je najveća interferencija dobivena pri $Fr = 0,5$. Interferencija je izraženija kod katamarana s užim razmakom između trupova, što se vidi usporedbom faktora interferencije, koji su otprilike dvostruko veći nego kod katamarana sa širim razmakom između trupova. Ovo se može objasniti položajem valova generiranih interferencijom (Slika 41.), kao što je to već objašnjeno u prethodnim potpoglavljima.

**Slika 41. Usporedni prikaz interferencije valova za dva razmaka trupova (lijevo – katamaran s užim razmakom između trupova) i (desno – katamaran sa širim razmakom između trupova)**

Slika 41. prikazuje dobiveni sustav valova pri $Fr = 0,75$ te se iz nje jasno može uočiti pomak valnog brijega i dola prema krmu, odnosno iza katamarana, kod katamarana sa širim razmakom između trupova. Uslijed toga, utjecaj valnog dola i brijega na ukupni otpor katamarana je manji.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazan je utjecaj interferencije na ukupni otpor katamarana. Za potrebe ovog istraživanja provedene su numeričke simulacije modela jednotrupnog broda Delft 372 i katamarana Delft 372 s dva različita razmaka između trupova pri tri vrijednosti Froudeovog broja. Provedena je verifikacija numeričkih rezultata te je izračunata numerička nesigurnost simulacija. Također, provedena je i validacija numeričkih rezultata usporedbom s eksperimentalnim rezultatima dostupnim u literaturi. Pojava interferencije analizirana je pomoću faktora interferencije, kao i detaljnim uvidom u strujanje oko katamarana.

Analizom rezultata uočeno je kako je kod oba katamarana pojava interferencije najizraženija pri srednjoj ispitanoj brzini, odnosno pri $Fr = 0,5$. Pri manjem Froudeovom broju brzina nastrujavanja fluida je manjeg iznosa te stoga valovi nastali interferencijom ne utječu u značajnijoj mjeri na ukupni otpor katamarana. Pri najvećoj ispitanoj brzini ($Fr = 0,75$) generiraju se valovi veće valne visine, ali se oni jednim dijelom nalaze izvan područja između trupova te u manjoj mjeri utječu na ukupni otpor katamarana, nego što je to slučaj pri $Fr = 0,5$. Zanimljivo je da je faktor interferencije za najveću brzinu manji nego pri najmanjoj ispitanoj brzini, što znači da je interferencija valova povoljnija pri $Fr = 0,75$ nego pri $Fr = 0,3$.

Razmak između trupova uvelike utječe na pojavu interferencije. Faktori interferencije manji su gotovo dvostruko za katamaran sa širim razmakom između trupova. Valovi nastali interferencijom više su pomaknuti prema krmi, odnosno iza samog katamarana te time manje utječu na ukupni otpor katamarana, nego što je to slučaj kod katamarana s užim razmakom između trupova.

Za ispitani model katamarana Delft 372 najnepovoljnija brzina plovidbe sa stajališta faktora interferencije je pri $Fr = 0,5$. Na temelju dobivenih rezultata najpovoljnije bi bilo odabrati katamaran sa širim razmakom između trupova te plovidbu pri $Fr = 0,75$, jer će u tom slučaju katamaran imati najmanji faktor interferencije. Daljnje istraživanje može biti usmjereno prema analizi ukupnog otpora katamarana s još širim razmakom između trupova, gdje bi se potencijalno mogla očekivati povoljna interferencija. Svakako važno je naglasiti da u projektu katamarana, ukupni otpor ne predstavlja jedini parametar. Tako se povećavanjem razmaka između trupova, povećava i stabilitet katamarana, ali se i povećavaju zahtjevi za čvrstoćom samog trupa. Nadalje, katamaran s većim razmakom između trupova ima većih poteškoća kod pristajanja, posebice u luke s ograničenim prostorom.

Usporedbom numeričkih rezultata s eksperimentalnim rezultatima uočeno je kako su dobivene manje vrijednosti ukupnih otpora primjenom numeričkih simulacija u odnosu na eksperiment s relativnim odstupanjem od oko 10%. Ovo se može pripisati primjeni nepomične mreže u numeričkim simulacijama, odnosno činjenicom da prostorna mreža nije pratila dinamički trim broda, odnosno katamarana. U daljnjim istraživanjima svakako bi bilo korisno ispitati primjenu preklapajuće mreže te usporediti dobivene rezultate s rezultatima dobivenim u ovom radu. Također primjena finije mreže, odnosno mreže s većim brojem ćelija, može dovesti do točnijih rezultata. Konačno, dobiveno relativno odstupanje može se pripisati i mjernoj nesigurnosti, koja je znatno veća kod ispitivanja malih modela. Naime, već mala pogreška mjerenja u konačnici daje velike razlike u usporedbi s rezultatima numeričkih simulacija s obzirom da se radi o malim vrijednostima.

LITERATURA

- [1] Zaghi, S., Broglia, R., Di Mascio, A.: *Experimental and numerical investigations on fast catamarans interference effects*, J. Hydrodyn., 2010, 22(5), 545–549.
- [2] Bari, G.S., Matveev, K.I.: *Hydrodynamic modeling of planing catamarans with symmetric hulls*, Ocean. Eng., 2016, 115, 60–66.
- [3] Souto-Iglesias, A., Fernandez-Gutierrez, D., Perez-Rojas, L.: *Experimental assessment of interference resistance for a Series 60 catamaran in free and fixed trim-sinkage conditions*, Ocean. Eng., 2012., 53, 38–47.
- [4] He, J., Zhang, C., Zhu, Y., Zou, L., Li, W., Noblesse, F.: *Interference effects on the Kelvin wake of a catamaran represented via a hull-surface distribution of sources*, Eur. J. Mechanics-B/Fluids, 2016., 56, 1–12.
- [5] Jamaluddin, A., Utama, I.K.A.P., Widodo, B., Molland, A.F.: *Experimental and numerical study of the resistance component interactions of catamarans*, Proc. Institute. Mech. Eng. Part M J. Eng. Marit. Environ., 2012., 227 (1), 51–60.
- [6] Insel, M., Molland, A.F.: *An investigation into the resistance components of high speed displacement catamarans*, R. Inst. Nav. Archit., 1992., 134, 1–20.
- [7] Broglia, R., Jacob, B., Zaghi, S., Stern, F., Olivieri, A.: *Experimental investigation of interference effects for high-speed catamarans*, Ocean. Eng., 2014., 76, 75–85.
- [8] Farkas, A., Degiuli, N., Martić, I.: *Numerical investigation into the interaction of resistance components for a series 60 catamaran*, Ocean. Eng., 2017., 146, 151–169.
- [9] Zha, R., Ye, H., Shen, Z., Wan, D.: *Numerical computations of resistance of high speed catamaran in calm water*, J. Hydrodyn. Ser. B, 2015., 26 (6), 930–938.
- [10] Haase, M., Davidson, G., Thomas, G., Binns, J., Bose, N.: *A practical design approach including resistance predictions for medium-speed catamarans*, Ship Technol. Res., 2013., 60 (1), 4–12.
- [11] Zaghi, S., Broglia, R., Di Mascio, A.: *Analysis of the interference effects for high-speed catamarans by model tests and numerical simulations*, Ocean. Eng., 2011., 38 (17), 2110–2122.
- [12] Utama, I.K.A.P., Jamaluddin, A., Aryawan, W.D.: *Experimental investigation into the drag interference of symmetrical and asymmetrical staggered and unstaggered catamarans*, J. Ocean Technol., 2012., 7 (1), 47–58.

- [13] He, W., Castiglione, T., Kandasamy, M., Stern, F.: *Numerical analysis of the interference effects on resistance, sinkage and trim of a fast catamaran*, J. Mar. Sci. Technol., 2015., 20 (2), 292–308.
- [14] Farkas, A., Degiuli, N., Martić, I.: *Numerical and experimental assessment of nominal wake for a bulk carrier*, J. Mar. Sci. Technol., 2019, 24(4), 1092-1104.
- [15] Farkas, A., Degiuli, N., Martić, I.: *The impact of biofouling on the propeller performance*, Ocean. Eng., 2020., 219, 108376.
- [16] Farkas, A., Degiuli, N., Martić, I.: *Impact of biofilm on the ship propulsion characteristics and the speed reduction*, Ocean. Eng., 2019., 199, 107033.
- [17] Virag, Z., Džijan, I., *Mehanika fluida II.*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.
- [18] Molland, Turnock, Hudson, *Ship Resistance and Propulsion*, Cambridge university press, 2011.
- [19] Virag, Z., Džijan, I., *Računalna dinamika fluida, Interna skripta*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [20] F.R.Menter: *Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications*, AIAA journal, 1994.
- [21] N. Ferdelji, *Laminarni granični slojevi, Interna skripta*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [22] ITTC - Recommended Procedures and Guidelines: Uncertainty Analysis in CFD Verification and Validation Methodology and Procedures, 2008.
- [23] D. Haramustek: *Numerička simulacija viskoznog strujanja oko modela broda za rasuti teret, Završni Rad*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2021.
- [24] R. Broglia, B. Jacob, S. Zaghi, F. Stern, A. Oliveri: *Experimental investigation of interference effects for high-speed catamarans*, Ocean. Eng., 2013., 76, 75-85.
- [25] ITTC – Recommended Procedures and Guidelines - Practical Guidelines for Ship CFD Applications, 2011.
- [26] STAR-CCM+, Tutorials/Tutorial Guide/Motion/ Marine Resistance rediction: KCS Hull with a Rudder.
- [27] New world encyclopedia, Catamaran.
- [28] Virag, Z., Džijan, I., *Mehanika fluida I.*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.