

Istraživanje utjecaja mjerila na ukupni otpor kontejnerskog broda u plitkoj vodi

Badrov, Frano

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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:235:027262>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-20**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Frano Badrov

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Nastia Degiuli, dipl. ing.

Dr. sc. Ivana Martić, mag. ing.

Student:

Frano Badrov

Zagreb, 2023.

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

Prije svega, želim se zahvaliti svojim mentoricama prof. dr. sc. Nastii Degiuli i dr. sc. Ivani Martić na svim savjetima, vremenu, konzultacijama, volji, trudu, strpljenju, podršci i prenesenom znanju kroz izradu ovog diplomskog rada i kroz cijelo studiranje. Hvala Vam od srca na svemu!

Također se želim zahvaliti svojim roditeljima, majci Bosiljki i ocu Juri. Hvala vam na golemoj podršci, strpljenju i svemu što ste mi omogućili da ostvarim svoje snove. Hvala posebno mojem bratu Ivanu, koji mi je bio velika podrška te bratu Vinku i sestri Katarini. Hvala i ostatku obitelji na podršci!

Hvala svim mojim prijateljima i prijateljicama, kolegama i kolegicama sa studija, koji su mi također bili oslonac i podrška u teškim i izazovnim trenucima. Hvala vam što ste vjerovali u mene i gurali me naprijed.

Hvala ti dragi Bože što si mi dao snage i volje da završim fakultet i da se kroz njega izgradim kao čovjek.

Frano Badrov



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija brodogradnje



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 22 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 23 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Frano Badrov** JMBAG: 0035208622

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Istraživanje utjecaja mjerila na ukupni otpor kontejnerskog broda u plitkoj vodi**

Naslov rada na engleskom jeziku: **An investigation into the scale effect on the total resistance of a container ship in shallow water**

Opis zadatka:

Pri plovidbi u plitkoj i ograničenoj vodi dolazi do promjene u strujanju oko trupa broda. Utjecaj mjerila na viskozni otpor broda je poznat, dok se smatra da je utjecaj mjerila na otpor valova zanemariv. Ova pretpostavka dovodi se u pitanje u plitkoj vodi uslijed viskoznih učinaka na otpor valova.

U diplomskom radu potrebno je, uz pomoć programskog paketa za računalnu dinamiku fluida, numerički simulirati pokus otpora modela broda i broda u naravi u neograničenoj i plitkoj vodi te istražiti utjecaj mjerila na ukupni otpor. 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 u plitkoj i ograničenoj vodi.
2. Dati matematičku osnovu numeričkih metoda za simulaciju viskoznog strujanja fluida 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 broda i broda u naravi u neograničenoj i plitkoj vodi koristeći programski paket za računalnu dinamiku fluida.
5. Usporediti numerički dobivene rezultate ukupnog otpora modela 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 treba navesti literaturu i eventualno dobivenu pomoć tijekom izrade.

Zadatak zadan:

4. svibnja 2023.

Datum predaje rada:

6. srpnja 2023.

Predviđeni datumi obrane:

17. – 21. srpnja 2023.

Zadatak zadao:

Nastia Degiuli
Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

Ivana Martić
Dr. sc. Ivana Martić

Predsjednik Povjerenstva:

Čatipović
Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	XI
SUMMARY	XII
1. UVOD.....	1
1.1. Pregled dosadašnjih istraživanja	2
2. OTPOR BRODA	5
2.1. Otpor broda	5
2.2. Podjela otpora na osnovne komponente.....	5
2.3. Otpor broda u ograničenoj i plitkoj vodi.....	8
2.4. Schlichtingova metoda proračuna otpora u plitkoj vodi	11
2.5. Pokus otpora.....	12
2.6. ITTC 1957 metoda	14
2.7. ITTC 1978 metoda	14
3. RAČUNALNA DINAMIKA FLUIDA	16
3.1. Uvod u računalnu dinamiku fluida.....	16
3.2. Postavke numeričke simulacije	16
3.3. Pretpostavke fizikalnog modela	17
3.4. Strujanje nestlačivog fluida – osnovni zakoni i jednačbe	17
3.5. Vremenski osrednjene jednačbe.....	19
3.6. $k - \omega$ SST model turbulencije	20
3.7. Modeliranje graničnog sloja.....	21
3.8. Metoda konačnih volumena	23
3.9. Metoda udjela fluida u volumenu (VOF metoda)	24
3.10. Validacija rezultata numeričkih simulacija	25
3.11. Verifikacija rezultata numeričkih simulacija	25

3.12. Numerička nesigurnost rezultata.....	26
4. POSTAVKE NUMERIČKIH SIMULACIJA ZA NEOGRANIČENU I PLITKU VODU ZA MODEL BRODA I BROD U NARAVI.....	28
4.1. Proračunska domena	29
4.1.1. Neograničena dubina.....	29
4.1.2. Plitka voda	30
4.2. Rubni uvjeti.....	30
4.3. Generiranje geometrijske mreže	31
4.3.1. Diskretizacija proračunske domene za model broda u neograničenoj dubini.....	32
4.3.2. Diskretizacija proračunske domene za model broda u plitkoj vodi	33
4.3.3. Diskretizacija proračunske domene za brod u naravi u neograničenoj i plitkoj vodi	34
4.4. Volumetrijska profinjenja	35
4.5. Odabir fizikalnog modela.....	37
4.6. Parametri rješavača	39
5. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA.....	40
5.1. Verifikacija numeričkih rezultata za model broda u neograničenoj dubini	40
5.2. Verifikacija numeričkih rezultata za model broda u plitkoj vodi	41
5.3. Verifikacija numeričkih rezultata za brod u naravi u neograničenoj dubini.....	42
5.4. Verifikacija numeričkih rezultata za brod u naravi u plitkoj vodi	43
5.5. Validacija i usporedba rezultata	44
5.5.1. Validacija rezultata za model broda u plitkoj vodi	44
5.5.2. Validacija rezultata numeričkih simulacija u neograničenoj dubini	45
5.5.3. Usporedba ukupnog otpora modela broda i broda u naravi u neograničenoj i plitkoj vodi	45
5.6. Grafički prikaz rezultata.....	46
5.7. Tangencijalna naprezanja i hidrodinamički tlak	50
5.8. Valne elevacije	52
6. ZAKLJUČAK.....	57
LITERATURA.....	58

POPIS SLIKA

Slika 1. Podjela ukupnog otpora [19].....	7
Slika 2. Slike valova za različite Fn_h [1].....	10
Slika 3. Schlichtingov dijagram za određivanje utjecaja plitke vode na pad brzine [20]	12
Slika 4. Granični sloj i područja strujanja fluida [27].....	21
Slika 5. Diskretizacija proračunske domene [23].....	23
Slika 6. 3D model DTC broda.....	28
Slika 7. Proračunska domena za neograničenu dubinu	29
Slika 8. Dio proračunske domene u plitkoj vodi.....	30
Slika 9. Rubni uvjeti proračunske domene za plitku vodu.....	31
Slika 10. Diskretizacija graničnog sloja [23]	32
Slika 11. Presjek fine geometrijske mreže u razini vodne linije za model broda	34
Slika 12. Profinjenja mreže oko krme i pramca	35
Slika 13. Profinjenje mreže oko trupa.....	35
Slika 14. Profinjenje slobodne površine.....	36
Slika 15. Granični sloj uz trup broda.....	36
Slika 16. Granični sloj na dnu	37
Slika 17. Postavke VOF valova za $Fn = 0,052$	38
Slika 18. Postavka brzine pomicanja granice dna u numeričkim simulacijama u plitkoj vodi	38
Slika 19. Slika valova oko modela broda u neograničenoj dubini za $Fn = 0,139$	47
Slika 20. Slika valova oko modela broda u plitkoj vodi za $Fn = 0,139$	47
Slika 21. Slika valova oko broda u naravi u neograničenoj dubini za $Fn = 0,139$	48
Slika 22. Slika valova oko broda u naravi u plitkoj vodi za $Fn = 0,139$	48
Slika 23. Raspodjela parametra y^+ na trupu modela broda u plitkoj vodi.....	49
Slika 24. Raspodjela parametra y^+ na dnu proračunske domene za plitku vodu.....	49
Slika 25. Raspodjela parametra y^+ na trupu broda u naravi u plitkoj vodi	49
Slika 26. Slobodna površina duž trupa broda u naravi u neograničenoj dubini	50
Slika 27. Slobodna površina duž trupa broda u naravi u plitkoj vodi	50
Slika 28. Tangencijalna naprezanja po trupu broda u naravi u neograničenoj dubini	50
Slika 29. Tangencijalna naprezanja po trupu broda u naravi u plitkoj vodi.....	51
Slika 30. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka po trupu broda u naravi u neograničenoj dubini	51
Slika 31. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka po trupu broda u naravi u plitkoj vodi.....	51
Slika 32. Polje brzine na simetralnoj ravnini modela broda u plitkoj vodi	51

Slika 33. Polje brzine na simetralnoj ravnini broda u naravi u plitkoj vodi.....	52
Slika 34. Valne elevacije iza modela broda u neograničenoj i plitkoj vodi na simetralnoj ravnini $y = 0$	52
Slika 35. Valne elevacije iza modela broda u neograničenoj i plitkoj vodi na $y = 0,145$ m....	53
Slika 36. Valne elevacije iza modela broda u neograničenoj i plitkoj vodi na $y = 0,29$ m.....	53
Slika 37. Valne elevacije u neograničenoj i plitkoj vodi na $y = 0,29$ m duž trupa modela broda	54
Slika 38. Valne elevacije iza broda u naravi u neograničenoj i plitkoj vodi na $y = 0$	54
Slika 39. Valne elevacije iza broda u naravi u neograničenoj i plitkoj vodi na $y = 13$ m	55
Slika 40. Valne elevacije iza broda u naravi u neograničenoj i plitkoj vodi na $y = 25,5$ m	55
Slika 41. Valne elevacije za slučaj neograničene i plitke vode na $y = 25,5$ m duž trupa broda u naravi.....	56
Slika 42. Utjecaj mjerila na valne elevacije	56

POPIS TABLICA

Tablica 1. Sadržaj ćelije za različite vrijednosti parametra α_i	24
Tablica 2. Vrsta konvergencije.....	26
Tablica 3. Glavne značajke DTC modela broda i broda u naravi	28
Tablica 4. Alati za automatsku diskretizaciju mreže.....	31
Tablica 5. Osnovne postavke diskretizacije proračunske domene za finu mrežu modela broda	33
Tablica 6. Osnovne veličine ćelija i ukupni broj ćelija pojedine mreže	33
Tablica 7. Postavke za diskretizaciju graničnih slojeva za model broda u plitkoj vodi.....	33
Tablica 8. Postavke za diskretizaciju graničnih slojeva za brod u naravi u neograničenoj i plitkoj vodi	34
Tablica 9. Osnovne veličine ćelija i ukupni broj ćelija pojedine mreže za brod u naravi u plitkoj vodi	34
Tablica 10. Vremenski koraci za model broda i brod u naravi pri $Fn = 0,139$	39
Tablica 11. Rezultati verifikacije dobiveni primjenom različite gustoće mreže za model broda u neograničenoj dubini	40
Tablica 12. Rezultati verifikacije dobiveni primjenom različitog vremenskog koraka za model broda u neograničenoj dubini	40
Tablica 13. Ukupna nesigurnost rezultata numeričke simulacije za model broda u neograničenoj dubini	41
Tablica 14. Rezultati verifikacije dobiveni primjenom različite gustoće mreže za model broda u plitkoj vodi	41
Tablica 15. Rezultati verifikacije dobiveni primjenom različitog vremenskog koraka za model broda u plitkoj vodi	41
Tablica 16. Ukupna nesigurnost rezultata numeričke simulacije za model broda u plitkoj vodi	42
Tablica 17. Rezultati verifikacije dobiveni primjenom različite gustoće mreže za brod u naravi u neograničenoj dubini	42
Tablica 18. Rezultati verifikacije dobiveni primjenom različitog vremenskog koraka za brod u naravi u neograničenoj dubini	42
Tablica 19. Ukupna nesigurnost rezultata numeričke simulacije za brod u naravi u neograničenoj dubini	43

Tablica 20. Rezultati verifikacije dobiveni primjenom različite gustoće mreže za brod u naravi u plitkoj vodi	43
Tablica 21. Rezultati verifikacije dobiveni primjenom različitog vremenskog koraka za brod u naravi u plitkoj vodi	43
Tablica 22. Ukupna nesigurnost rezultata numeričke simulacije za brod u naravi u plitkoj vodi	43
Tablica 23. Ukupni otpor, uron i trim dobiveni primjenom fine mreže i finog vremenskog koraka pri $Fn = 0,139$	44
Tablica 24. Rezultati modelskih ispitivanja u plitkoj vodi pri $Fn = 0,139$	44
Tablica 25. Relativna devijacija rezultata za model broda u plitkoj vodi pri $Fn = 0,139$	44
Tablica 26. Ukupni otpor, uron i trim dobiveni primjenom fine mreže i finog vremenskog koraka pri $Fn = 0,052$	45
Tablica 27. Rezultati modelskih ispitivanja u plitkoj vodi pri $Fn = 0,052$	45
Tablica 28. Relativna devijacija rezultata za model broda u plitkoj vodi pri $Fn = 0,052$	45
Tablica 29. Relativna devijacija ukupnog otpora za model broda i brod u neograničenoj dubini pri $Fn = 0,139$	45
Tablica 30. Postotno povećanje ukupnog otpora modela broda u plitkoj vodi	46
Tablica 31. Postotno povećanje ukupnog otpora broda u naravi u plitkoj vodi	46

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_{VS}	m^2	površina izložena vjetru projicirana na poprečnu ravninu
A_x	m^2	maksimalna poprečna površina uronjenog dijela trupa
B	m	konstanta integracije
c_w	m/s	brzina valova u dubokoj vodi
$c_{w,s}$	m/s	brzina valova u plitkoj vodi
C_A	/	koeficijent dodatnog otpora
C_A	/	korelacijski dodatak
C_{AAS}	/	koeficijent otpora zraka
C_B	/	koeficijent punoće
C_{DA}	/	koeficijent otpora zraka
C_F	/	koeficijent otpora trenja
C_P	/	koeficijent otpora tlaka
C_{PV}	/	koeficijent viskoznog otpora tlaka
C_R	/	koeficijent preostalog otpora
C_T	/	koeficijent ukupnog otpora
C_V	/	koeficijent viskoznog otpora
C_W	/	koeficijent otpora valova
D_{ij}	s^{-1}	tenzor brzine deformacije
f_i	m/s^2	gustoća masene sile
$\bar{f}$	s	vremenski osrednjena vrijednost
f'	s	pulsirajući dio
Fn	/	Froudeov broj
Fn_h	/	Froudeov broj na temelju dubine
Fn_T	/	Froudeov broj na temelju gaza
Fs	/	faktor sigurnosti
g	m/s^2	ubrzanje zemljine sile teže

h	m	dubina vode
k	/	faktor forme
k	m ² /s ²	kinetička energija turbulencije
k_s	m	srednja amplituda hrapavosti
L	m	duljina broda
L_{CG}	m	uzdužni položaj težišta broda
L_{PP}	m	duljina između okomica broda
L_w	m	duljina valova
L_{WL}	m	duljina na vodnoj liniji
p	Pa	tlak
$\bar{p}$	Pa	vremenski osrednjena komponenta tlaka
p'	Pa	pulsirajuća komponenta tlaka
p_i	/	red točnosti
$\vec{p}_{PV}$	Pa	vektor normalnog naprezanja uslijed viskoznosti
$\vec{p}_W$	Pa	vektor normalnog naprezanja uslijed valova
R_F	N	otpor trenja
R_i	/	omjer konvergencije
Rn	/	Reynoldsov broj
R_p	N	otpor tlaka
R_{PV}	N	viskozni otpor tlaka
R_T	N	ukupni otpor broda
R_{T_EKS}	N	ukupni otpor broda dobiven eksperimentalno
R_{T_RDF}	N	ukupni otpor broda dobiven numeričkom simulacijom
R_V	N	viskozni otpor
R_W	N	otpor valova
R_{WB}	N	otpor lomljenja valova
R_{WP}	N	otpor slike vala
RD	%	relativna devijacija

r_i	/	omjer profinjenja
r_{xx}	m	polumjer momenta tromosti oko x osi
r_{yy}	m	polumjer momenta tromosti oko y osi
r_{zz}	m	polumjer momenta tromosti oko z osi
S	m ²	oplakana površina
$\hat{S}_i$	/	vrijednost rezultata numeričke simulacije
S_L	/	donja vrijednost rezultata numeričke simulacije
S_U	/	gornja vrijednost rezultata numeričke simulacije
t	s	vrijeme
T	m	gaz broda
$\bar{u}$	m/s	komponenta brzine strujanja paralelno sa stijenkom
u^+	/	bezdimenzijska brzina
U_i	/	numerička nesigurnost
$\bar{U}_{SN}$	/	ukupna numerička nesigurnost
$\bar{U}_T$	/	nesigurnost vremenskog koraka
$\bar{U}_G$	/	nesigurnost gustoće mreže
u_τ	m/s	brzina trenja
v	m/s	brzina broda
V	m ³	kontrolni volumen
V	m ³	volumen istisnine
V_i	m ³	volumen i -tog fluida unutar kontrolnog volumena
V_{CG}	m	vertikalni položaj težišta broda
v_i	m/s	vektor brzine
v_{krit}	m/s	kritična brzina
v_{ss}	m/s	brzina broda u slučaju ograničene dubine
$\bar{v}_i$	m/s	vremenski osrednjena komponenta brzine
v'_i	m/s	pulsirajuća komponenta brzine
y	m	udaljenost od stijenke

y^+	/	bezdimenzijska udaljenost od stijenke
α_i	/	volumni udio pojedinog fluida u kontrolnom volumenu
Δ	t	masa istisnine
ΔC	/	razlika brzina broda
ΔC_F	/	dodatak na hrapavost
ΔC_T	/	korelacijski dodatak
Δv_p	/	dodatni pad brzine
δ_{ij}	/	Kroneckerov delta simbol
$\delta_{RE_{i,1}}^{*(1)}$	/	numerička greška
ε_i	/	razlika rezultata
κ	/	Von Karmanova konstanta
λ	/	mjerilo geometrijske sličnosti
μ	Pas	dinamički koeficijent viskoznosti
μ_t	Pas	dinamički koeficijent turbulentne viskoznosti
ν	m ² /s	kinematički koeficijent viskoznosti
ρ	kg/m ³	gustoća fluida
ρ_A	kg/m ³	gustoća zraka
ρ_S	kg/m ³	gustoća mora
Σ_{ij}	N/m ²	devijatorski dio tenzora naprezanja
σ_{ij}	N/m ²	tenzor naprezanja
τ	N/m ²	tangencijalno naprezanje
τ_w	N/m ²	tangencijalno naprezanje na stijenci
ω	m ² s ⁻³	specifična brzina disipacije turbulentne kinetičke energije

SAŽETAK

U ovom radu provedene su numeričke simulacije pokusa otpora modela broda i broda u naravi u neograničenoj i plitkoj vodi za kontejnerski brod DTC. Numeričke simulacije provedene su primjenom komercijalnog programskog paketa za računalnu dinamiku fluida (RDF) STAR-CCM+. Primijenjen je matematički model nestacionarnog trodimenzijskog viskoznog strujanja fluida sa slobodnom površinom na temelju Reynoldsovih osrednjenih Navier – Stokesovih jednadžbi (eng. *Reynolds Averaged Navier – Stokes*, RANS). Korišten je $k - \omega$ SST model turbulencije i metoda udjela fluida u volumenu (eng. *Volume of Fluid*, VOF) za praćenje i određivanje položaja slobodne površine. Simulacije su provedene za dva Froudeova broja te je proveden postupak verifikacije s ciljem određivanja numeričke nesigurnosti ukupnog otpora, urona/izrona te trima modela broda i broda u naravi za jedan Froudeov broj primjenom različite gustoće mreže i vremenskog koraka za slučaj neograničene i plitke vode. Dobiveni numerički rezultati za model broda u plitkoj vodi uspoređeni su s dostupnim eksperimentalnim podacima, dok su za brod u naravi uspoređeni s ekstrapoliranim rezultatima eksperimentalnih ispitivanja. Također, dan je detaljan prikaz strujanja oko trupa modela broda i broda u naravi u plitkoj vodi te je dana usporedba povećanja ukupnog otpora u plitkoj vodi u odnosu na neograničenu dubinu za model broda i brod u naravi.

Ključne riječi: kontejnerski brod, pokus otpora, računalna dinamika fluida, plitka voda, metoda udjela fluida u volumenu, $k - \omega$ SST model turbulencije, Reynoldsove osrednjene Navier – Stokesove jednadžbe

SUMMARY

In this study, numerical simulations of resistance test for DTC container ship at model and full scale in unlimited and shallow water are carried out. Numerical simulations are performed within a commercial software package for Computational Fluid Dynamics (CFD) STAR – CCM+. A mathematical model of unsteady three – dimensional viscous flow with a free surface based on Reynolds averaged Navier – Stokes (RANS) equations is applied. The $k - \omega$ SST turbulence model is used, and the Volume of Fluid (VOF) method is applied for tracking and locating the free surface. The numerical simulations are carried out for two Froude numbers. The verification study is performed to assess the numerical uncertainty of the total resistance, sinkage, and trim for the ship model and full – scale ship at one Froude number using different grid densities and time steps in unlimited and shallow water. The obtained numerical results for the ship model in shallow water are compared with the experimentally obtained data, while for the full – scale ship are compared with the extrapolated results of the experimental tests. Also, a detailed description of the flow around the ship model and full – scale ship in shallow water is given. A comparison of the increase in total resistance in shallow water and unlimited depth for the ship model and full – scale ship is provided as well.

Key words: container ship, resistance test, Computational Fluid Dynamics, shallow water, Volume of Fluid method, $k - \omega$ SST turbulence model, Reynolds Averaged Navier – Stokes equations

1. UVOD

Pri projektiranju broda svoje mjesto u projektnoj spirali zauzima otpor broda. Već u ranoj fazi projektiranja projektant mora preliminarno odrediti snagu otpora za određenu masu istisnine i brzinu broda kako bi mogao procijeniti potrebnu snagu pogonskog stroja za postizanje tražene brzine broda. Iako snaga pogonskog stroja (motora) pri određenoj brzini ne ovisi samo o otporu, nego i o učinkovitosti propulzijskog sustava, otpor je najvažniji faktor koji određuje potrebnu snagu. Prilikom narudžbe novog broda projektant broda i naručitelj potpisuju ugovor sa specifikacijama broda u kojima se nalazi i ugovorna brzina. Ispitivanja u bazenu provode se u idealnim uvjetima, a u stvarnosti se primjenjuju korekcije zbog utjecaja pojedinih faktora kao što su vjetar, valovi ili ograničena voda i struje. U slučaju da je postiziva brzina manja od ugovorne, brodogradilište će platiti kaznu vlasniku, a u slučaju prevelike razlike vlasnik bi vrlo lako mogao odbiti prihvatiti brod [1].

Najstarije, ali i danas korištene metode za određivanje hidrodinamičkih značajki broda su eksperimentalne metode. Eksperimentalnim metodama ispituju se modeli brodova te se dobiveni rezultati ekstrapoliraju na brod u naravi. Glavni problem s kojim su se susretali istraživači bio je upravo ekstrapolacija rezultata s modela na brod u naravi (eng. *full scale*). Danas se sve više koristi računalna dinamika fluida, koja ubrzava proces određivanja hidrodinamičkih značajki i pruža mogućnost detaljne analize strujanja oko trupa broda.

U ovom diplomskom radu korišten je komercijalni programski paket STAR – CCM+ za određivanje hidrodinamičkih značajki broda, tj. otpora, urona/izrona i trima. Numeričke simulacije su provedene za DTC (eng. *Duisburg Test Case*) kontejnerski brod za mjerilo modela i brod u neograničenoj i plitkoj vodi. Numeričke simulacije su provedene za dvije brzine od 6 i 16 čvorova, odnosno dva Froudeova broja za neograničenu dubinu te plitku vodu čija je dubina jednaka dvostrukom gazu broda. Izvršene su četiri verifikacije za brzinu od 16 čvorova za model broda i brod u neograničenoj i plitkoj vodi. Postupak verifikacije je proveden za tri različite gustoće mreže i tri vremenska koraka. Korišten je model nestacionarnog trodimenzijskog strujanja viskoznog fluida sa slobodnom površinom te $k - \omega$ SST model turbulencije. Također je provedena i validacija numeričkih rezultata usporedbom s dostupnim eksperimentalnim podacima.

1.1. Pregled dosadašnjih istraživanja

U nastavku je dan pregled literature i dosadašnjih istraživanja vezanih uz primjenu računalne dinamike fluida za određivanje otpora u plitkoj vodi te utjecaja mjerila na ukupni otpor broda. Dogrul et al. [2] ispitivali su utjecaj mjerila na ukupni otpor broda i faktor forme za dvije forme broda, KCS i KVLCC2. Numeričke simulacije su proveli za četiri različita mjerila u programskom paketu STAR – CCM+. Matematički model je temeljen na Reynoldsovim osrednjenim Navier – Stokesovim (RANS) jednadžbama te je provedena verifikacija i validacija rezultata. Autori su koristili različite metode za ekstrapolaciju rezultata. Zeng et al. [3] proveli su istraživanje u kojem su za različite Reynoldsove brojeve ispitivali utjecaj mjerila na otpor valova. Ispitivanja su provedena za Wigleyevu i KCS formu broda te su rezultati pokazali da plitka voda utječe na promjenu koeficijenata otpora trenja i otpora valova između modela broda i broda. Zaključili su da bi se ispitivanjem većeg modela pri većem Reynoldsovom broju u plitkoj vodi smanjio utjecaj mjerila na koeficijent otpora valova. Song et al. [4] istraživali su utjecaj hrapavosti na otpor broda u plitkoj vodi. Koristili su RANS jednadžbe te su pokazali da se koeficijent ukupnog otpora povećava između 22% i 33% zbog hrapavosti, ovisno o brzini i omjeru dubine i gaza. Također je dokazano da se otpor tlaka značajnije povećava od otpora trenja te time više doprinosi povećanju ukupnog otpora za razliku od neograničene dubine. Grlj et al. [5] ispitivali su utjecaj različitih konfiguracija kontejnera i trima kontejnerskog broda na otpor vjetra i zraka, kao i utjecaj brzine broda na otpor zraka. Provedena je verifikacija numeričkih rezultata za različite gustoće mreže i različite vremenske korake te je provedena validacija pomoću dostupnih eksperimentalnih podataka. Tezdogan et al. [6] proveli su numeričke simulacije strujanja oko tankera u naravnoj veličini te su koristili RANS jednadžbe i $k - \varepsilon$ model turbulencije. Numeričke simulacije su provedene za različite vrijednosti omjera dubine i gaza te za različite kružne frekvencije ω . Provedeno istraživanje je omogućilo korisnu polaznu točku za daljnju analizu otpora i ponašanja broda u plitkoj vodi. Martić et al. [7] ispitivali su dodatni otpor na valovima DTC kontejnerskog broda pomoću RANS rješavača u ograničenoj dubini za dubinu ispod kobilice jednaku 100% gaza za dvije brzine te 20% gaza za jednu brzinu. Dobiveni numerički rezultati su uspoređeni s eksperimentalnim rezultatima ispitivanja modela u belgijskom institutu FHR (eng. *Flanders Hydraulic Research*) u sklopu projekta pod nazivom „*SHOPERA project*“. Nakon provedenih numeričkih simulacija u mirnoj vodi, autori su izračunali povećanje otpora uslijed pravilnih valova pri različitim brzinama napredovanja. Istraživanje je potvrdilo pouzdanost primjene računalne dinamike fluida za izračun dodatnog otpora na valovima u ograničenoj dubini. Isti

autori [8] proveli su istraživanje gibanja DTC modela broda, za dubine ispod kobilice jednake 100% i 20% gaza. Numerički rezultati za dubinu ispod kobilice od 100% gaza pokazali su dobru korelaciju s eksperimentalnim podacima. Za dubinu ispod kobilice od 20% gaza utvrđeno je da se visina generiranih valova smanjuje u smjeru napredovanja vala što postaje još izraženije kada se radi o malim amplitudama. Također su zaključili da je uron broda veći za dubinu ispod kobilice od 20% gaza u odnosu na dubinu od 100% gaza zbog utjecaja dna. Niklas i Pruzsko [9] su analizirali numeričke i eksperimentalne metode za procjenu ukupnog otpora broda u mirnoj vodi. Provedene su numeričke simulacije za brod u naravi te su autori zaključili da je na taj način moguće izbjeći potencijalne probleme prilikom ekstrapolacije rezultata s modela na brod. Dobiveni rezultati ukupnog otpora broda u naravi u mirnoj vodi variraju od -10% do 4% u odnosu na rezultate pokusne plovidbe ovisno o hrapavosti trupa i odabranom modelu turbulencije. Donatini et al. [10] istraživali su dodatni otpor na valovima ultra velikog kontejnerskog broda u plitkoj vodi te su za proračun odziva koristili RAO funkcije. Wang et al. [11] proveli su numeričke simulacije strujanja oko modela broda za rasuti teret te su zaključili kako $k - \omega$ SST model turbulencije daje najmanja odstupanja numeričkih od eksperimentalnih rezultata. Ulgen i Dhanak [12] istraživali su utjecaj ograničene dubine na hidrodinamičke značajke katamarana u naravi i bespilotne letjelice koja se koristi u plitkoj vodi. Numeričke simulacije provedene su u programskom paketu OpenFOAM za niz brzina pri različitim dubinama vode. Autori su numeričkim simulacijama pokazali da se koeficijent ukupnog otpora katamarana povećava za više od 40% pri nadkritičnim Froudeovim brojevima. Degiuli et al. [13] istraživali su utjecaj oblika pramca na ukupni otpor jahte. Istraživanje je provedeno za tri modela te su rezultati dobiveni numeričkim simulacijama primjenom tri modela turbulencije uspoređeni s eksperimentalnim rezultatima. Autori su zaključili da se primjenom pramčanog bulba ukupni otpor jahte može smanjiti za čak 7%. Hoa et. al [14] proveli su numeričke simulacije za DTBM model u plitkoj vodi za različite dubine. Zaključili su da je povećanje otpora broda u plitkoj vodi, pri istoj brzini kao i u neograničenoj dubini, posljedica promjene brzine strujanja ispod dna (kobilice) i značajnog pada tlaka duž trupa što dovodi do promjene slike valova. Farkas et al. [15] proveli su numeričke simulacije strujanja oko katamarana i jednotrupca S60 te su istražili interferenciju valova. Numeričke simulacije viskoznog strujanja sa slobodnom površinom kao i numeričke simulacije viskoznog strujanja udvojenog modela provedene su za šest Froudeovih brojeva u rasponu od 0,3 do 0,55 i za četiri omjera razmaka između trupova i duljine katamarana u rasponu od 0,226 do 0,4696. Campbell et al. [16] analizirali su učinke povećanja trima i gaza na otpor broda prilikom plovidbe ograničenim plovnom putem. Rezultati su pokazali da se s povećanjem gaza povećava ukupni otpor za

otprilike 10% do 15%, ovisno o brzini broda. Autori su primijenili RANS jednadžbe, $k - \varepsilon$ model turbulencije te metodu udjela fluida u volumenu (VOF). Degiuli et al. [17] analizirani su povećanje potrošnje goriva kontejnerskog broda. Uz ukupni otpor broda u mirnoj vodi autori su proračunali i dodatni otpor na valovima te su proveli spektralnu analizu na temelju Bretschneiderovog spektra. Dobiveni rezultati su pokazali važnost smanjenja brzine sa stajališta potrošnje goriva po ruti. Uz pretpostavku potpunog izgaranja, smanjenje potrošnje goriva jednako je smanjenju emisije CO₂ što je s ekološke strane jako bitno. Degiuli et al. [18] proveli su opsežno eksperimentalno istraživanje značajki otpora i propulzije modela broda za rasuti teret JBC. Eksperimentalna ispitivanja provedena su u Brodarskom institutu u Zagrebu za veliki raspon brzina. Za predviđanje značajki otpora i propulzije broda u naravnoj veličini korištene su četiri metode ekstrapolacije, temeljene na različitim pretpostavkama.

2. OTPOR BRODA

2.1. Otpor broda

Otpor broda analizira pojave u moru (vodi) za vrijeme plovidbe te se najjednostavnije definira kao sila čije je djelovanje suprotno od smjera gibanja broda ili nekog drugog plutajućeg objekta [19].

Ukupni otpor R_T se često bezdimenzijski prikazuje preko koeficijenta ukupnog otpora C_T , koji je funkcija Froudeovog i Reynoldsovog broja, te glasi:

$$C_T = \frac{R_T}{0,5\rho v^2 S} \quad (1)$$

gdje je:

v – brzina broda,

ρ – gustoća fluida,

S – oplakana površina.

Reynoldsov broj bezdimenzijska je veličina definirana kao omjer inercijskih i viskoznih sila, dok Froudeov broj predstavlja omjer inercijskih i gravitacijskih sila. Prikazani su sljedećim izrazima:

$$Rn = \frac{vL}{\nu} \quad (2)$$

$$Fn = \frac{v}{\sqrt{gL}} \quad (3)$$

gdje je:

L – duljina broda,

ν – kinematički koeficijent viskoznosti,

g – ubrzanje Zemljine sile teže.

2.2. Podjela otpora na osnovne komponente

Ukupni otpor ovisi o različitim parametrima kao što su geometrija tijela, brzina gibanja, svojstva fluida i ubrzanje Zemljine sile teže. S obzirom da je otpor broda složena pojava dijeli se na nekoliko komponenata [19]. Ovakav pristup pojednostavljuje teorijsko i eksperimentalno određivanje otpora broda.

Na brod koji se giba kroz vodu djeluje hidrodinamička sila, čija je horizontalna komponenta upravo ukupni otpor. Ako se u razmatranje uzme mali dio površine podvodnog dijela forme u nekoj točki, onda u njoj djeluje vektor ukupnog naprezanja koji se dijeli na vektor tangencijalnog naprezanja i vektor tlaka u smjeru normale. Integracijom pojedinih komponenata po površini dobivaju se otpor trenja R_F i otpor tlaka R_P , čiji zbroj predstavlja ukupni otpor. Ova vrsta podjele proizlazi iz pretpostavke da fluid djeluje na trup neprekidno raspodijeljenim površinskim silama [19]. U tom slučaju ukupni otpor broda izražava se preko formule:

$$R_T = \int_S \tau_0 \cos(\tau_0, x_1) dS + \int_S p \cos(p, x_1) dS = R_F + R_P \quad (4)$$

Drugi način podjele otpora je na komponente viskoznog otpora i otpora valova. Viskoznost je dominantna u području graničnog sloja i hidrodinamičkog traga, dok se u području potencijalnog strujanja utjecaj viskoznosti zanemaruje. Viskozni otpor ovisi o Reynoldsovom broju dok otpor valova ovisi o Froudeovom broju. Izraz za ukupni otpor broda glasi:

$$R_T = R_V(Rn) + R_W(Fn) \quad (5)$$

gdje je:

R_V – viskozni otpor,

R_W – otpor valova.

Otpor trenja dio je viskoznog otpora te je posljedica djelovanja tangencijalnih naprezanja između vode i brodske oplata. Ostatak viskoznog otpora posljedica je promjene normalnih naprezanja u graničnom sloju. Mjerenja su dokazala da je nemoguće u viskoznoj tekućini postići tlak, koji bi postojao u idealnoj tekućini bez stvaranja valova na površini [19]. Stoga se hidrodinamički tlak dijeli na:

$$\vec{p} = \vec{p}_{PV} + \vec{p}_W \quad (6)$$

gdje je:

$\vec{p}_{PV}$ – vektor normalnog naprezanja uslijed viskoznosti,

$\vec{p}_W$ – vektor normalnog naprezanja uslijed valova.

Otpor tlaka može se napisati kao:

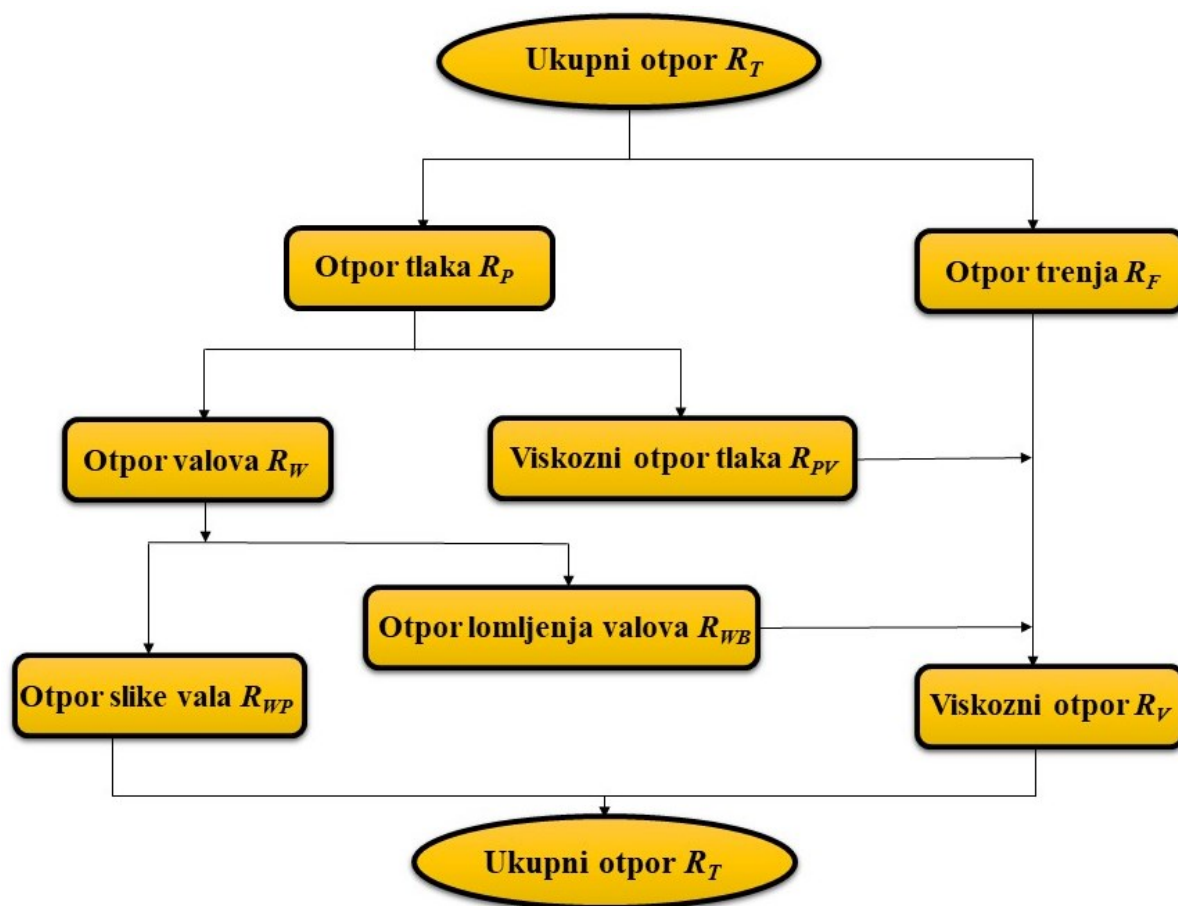
$$R_P = \int_S p_{PV} \cos(p, x_1) dS + \int_S p_W \cos(p, x_1) dS = R_{PV} + R_W \quad (7)$$

pri čemu je R_{PV} viskozni otpor tlaka.

Viskozni otpor može se podijeliti na otpor trenja i viskozni otpor tlaka kako slijedi:

$$R_V = R_F + R_{PV} \quad (8)$$

Na slici 1. prikazana je shema podjele ukupnog otpora.



Slika 1. Podjela ukupnog otpora [19]

Izraz za ukupni otpor broda glasi [19]:

$$R_T = 0,5(C_F + C_{PV} + C_W + C_A)\rho v^2 S \quad (9)$$

gdje je:

C_F – koeficijent otpora trenja,

C_{PV} – koeficijent viskoznog otpora tlaka,

C_W – koeficijent otpora valova,

C_A – koeficijent dodatnog otpora.

2.3. Otpor broda u ograničenoj i plitkoj vodi

Plitka voda (eng. *shallow water*) odnosi se na ograničenje plovnog puta u vertikalnom smjeru tj. ograničenu dubinu. Tijekom plovidbe broda u takvim uvjetima dolazi do povećanja brzine strujanja vode koja se nalazi između dna broda i dna plovnog puta što rezultira povećanjem ukupnog otpora broda [20]. Trodimenzijsko strujanje oko broda približava se dvodimenzijskom. Valovi nastali gibanjem broda u plitkoj vodi dulji su od valova nastalih gibanjem broda u dubokoj vodi za istu brzinu plovidbe. Povećanje otpora u plitkoj vodi određuje se ispitivanjem modela broda ili primjerice analitičkom metodom kao što je Schlichtingova metoda [19].

Brzina valova u dubokoj vodi određuje se sljedećim izrazom:

$$c_w = \sqrt{\frac{gL_w}{2\pi}} \quad (10)$$

dok se brzina valova u plitkoj vodi može izračunati kao:

$$c_{w,s} = \sqrt{\frac{gL_w}{2\pi} \operatorname{th} \frac{2\pi h}{L_w}} \quad (11)$$

gdje je:

c_w – brzina valova u dubokoj vodi,

$c_{w,s}$ – brzina valova u plitkoj vodi,

L_w – duljina valova,

h – dubina vode.

Za velike vrijednosti $\frac{2\pi h}{L_w}$ vrijednost $\operatorname{th}\left(\frac{2\pi h}{L_w}\right)$ asimptotski teži jedinici, što znači da brzina

valova u plitkoj vodi teži brzini valova u dubokoj vodi. Ako je dubina vode $h = \frac{L_w}{2}$ onda vrijedi:

$$\operatorname{th} \frac{2\pi h}{L_w} = \operatorname{th} \frac{2\pi L_w}{2L_w} = \operatorname{th} \pi = 0,996 \quad (12)$$

te se za taj slučaj dubina vode može smatrati neograničenom.

U slučaju male dubine izraz (11) poprima sljedeći oblik:

$$c_{w,s} = \sqrt{\frac{gL_w}{2\pi} \frac{2\pi h}{L_w}} = \sqrt{gh} \quad (13)$$

jer za male vrijednosti $\frac{2\pi h}{L_w}$ vrijedi:

$$\tanh \frac{2\pi h}{L_w} \approx \frac{2\pi h}{L_w} \quad (14)$$

Iz izraza (13) može se zaključiti da brzina valova u plitkoj vodi ne ovisi o duljini vala, nego samo o dubini vode h . U plitkoj vodi uvodi se pojam kritične brzine:

$$v_{krit} = \sqrt{gh} \quad (15)$$

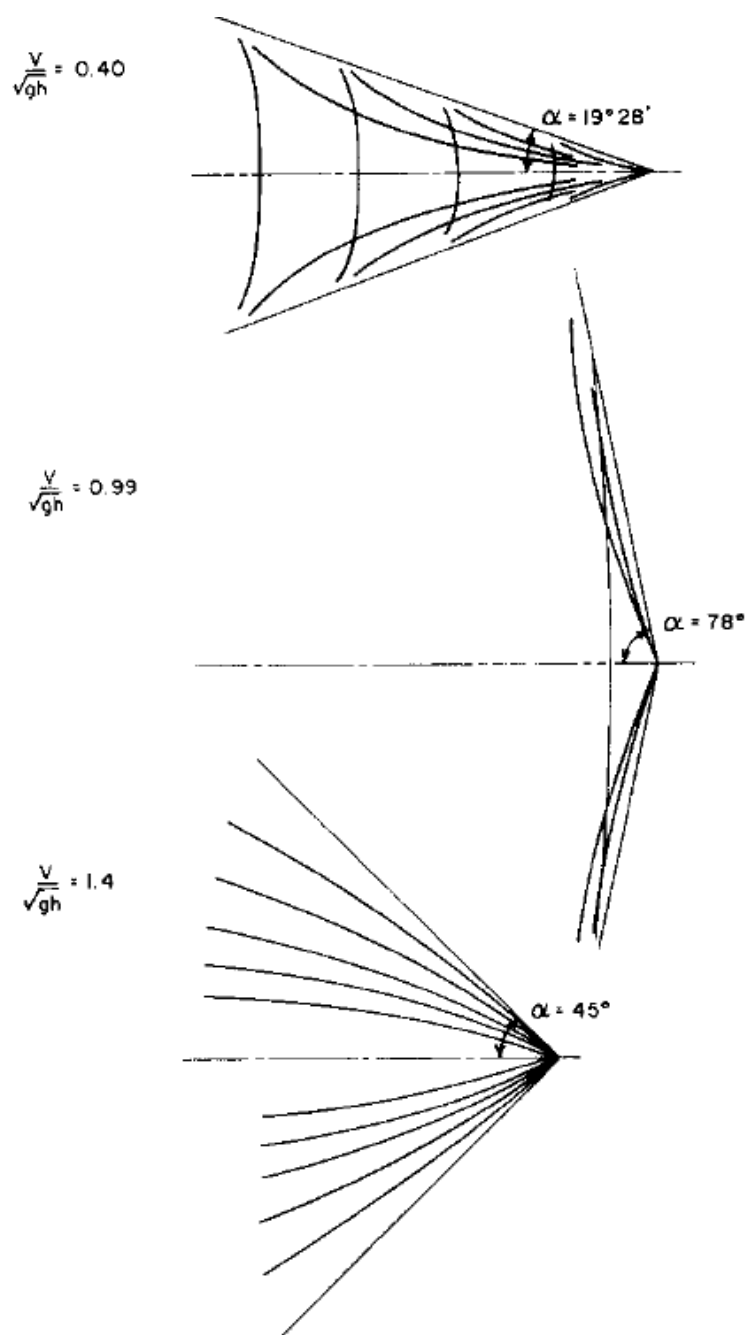
Vrijednosti brzine manje od brzine dane jednadžbom (15) nazivaju se podkritične, a vrijednosti brzine koje su veće nadkritične brzine. Najveći broj deplasmanskih brodova plovi u podkritičnom području.

Slika valova u plitkoj vodi mijenja se u ovisnosti o Froudeovom broju na temelju dubine [19]:

$$Fn_h = \frac{v}{\sqrt{gh}} \quad (16)$$

Na slici 2. prikazane su slike valova za različite Froudeove brojeve na temelju dubine za istu brzinu broda [1].

Kada je brzina broda $v \leq 0,4\sqrt{gh}$ razilazni valovi zatvaraju Kelvinov kut sa simetralom broda te on iznosi $19^\circ 28'$. Slika valova je u tom slučaju ista kao ona u neograničenoj dubini. Porastom brzine raste i kut pa se valovi sve više udaljavaju od simetrane broda te pri brzini $v = \sqrt{gh}$ zatvaraju pravi kut sa simetralom broda. U tim uvjetima se brod giba brzinom jednakom brzini valova. Iz tog razloga svi valovi sustava tvore jedan poprečni val. Takva je pojava vidljiva kod broda koji se giba kritičnom brzinom $v_{krit} = \sqrt{gh}$. Daljnjim povećanjem brzine broda kut se ponovno počinje smanjivati te se pri $v = 1,4\sqrt{gh}$ slika valova sastoji samo od razilaznih valova što je vidljivo na slici 2.



Slika 2. Slike valova za različite Fn_h [1]

Dubina vode ima utjecaj i na viskozni otpor i otpor valova. Pri malim dubinama u odnosu na gaz formira se granični sloj na dnu. Primjer takve pojave su korita rijeka. Povećanje brzine strujanja za neki iznos na granici graničnog sloja rezultira porastom tangencijalnih naprezanja te samim time i većim otporom trenja. Porastom trenja smanjuje se kinetička energija čestica tekućine, porast tlaka na krmi je manji te se povećava otpor forme (otpor viskoznog tlaka).

Povećanje viskoznog otpora također može biti rezultat ranijeg odvajanja strujanja do kojeg dolazi uslijed smanjenja kinetičke energije čestica [19].

Odnos viskoznog otpora u plitkoj vodi i neograničenoj dubini prikazan u ovisnosti omjera dubine vode i gaza h/T pokazuje da se utjecaj dubine može zanemariti za:

$$\frac{h}{T} > 3 \quad (17)$$

Uslijed plovidbe plitkom vodom može doći do izraženijih promjena gaza i trima broda te postoji mogućnost povremenog privlačenja trupa prema dnu i udaranja o dno za omjere dubine i gaza:

$$\frac{h}{T} = 1,2 \div 1,5 \quad (18)$$

te pri brzini broda:

$$v = (0,8 \div 0,95)\sqrt{gh} \quad (19)$$

Empirijska formula kojom se može provjeriti da li postoji utjecaj plitke vode glasi [19]:

$$\frac{h}{T} \geq 4 + 3Fn_T^2 \quad (20)$$

pri čemu je Fn_T Froudeov broj na temelju gaza broda:

$$Fn_T = \frac{v}{\sqrt{gT}} \quad (21)$$

2.4. Schlichtingova metoda proračuna otpora u plitkoj vodi

Schlichtingova metoda primjenjuje se za proračun povećanja ukupnog otpora uslijed plovidbe broda u plitkoj vodi. Schlichting je smatrao da je otpor stvaranja valova ovisan isključivo o duljini poprečnih valova, ali prema izrazu (13) brzina vala ovisi o dubini vode [19].

Brzina broda v u neograničenoj dubini jednaka je brzini poprečnog vala c_w :

$$v = \sqrt{\frac{gL_w}{2\pi}} = c_w \quad (22)$$

U slučaju ograničene dubine brzina v_{ss} jednaka je brzini poprečnog vala $c_{w,s}$ te glasi:

$$v_{ss} = \sqrt{\frac{gL_w}{2\pi} \operatorname{th} \frac{2\pi h}{L_w}} = c_{w,s} \quad (23)$$

Iz omjera ovih dviju brzina dobije se:

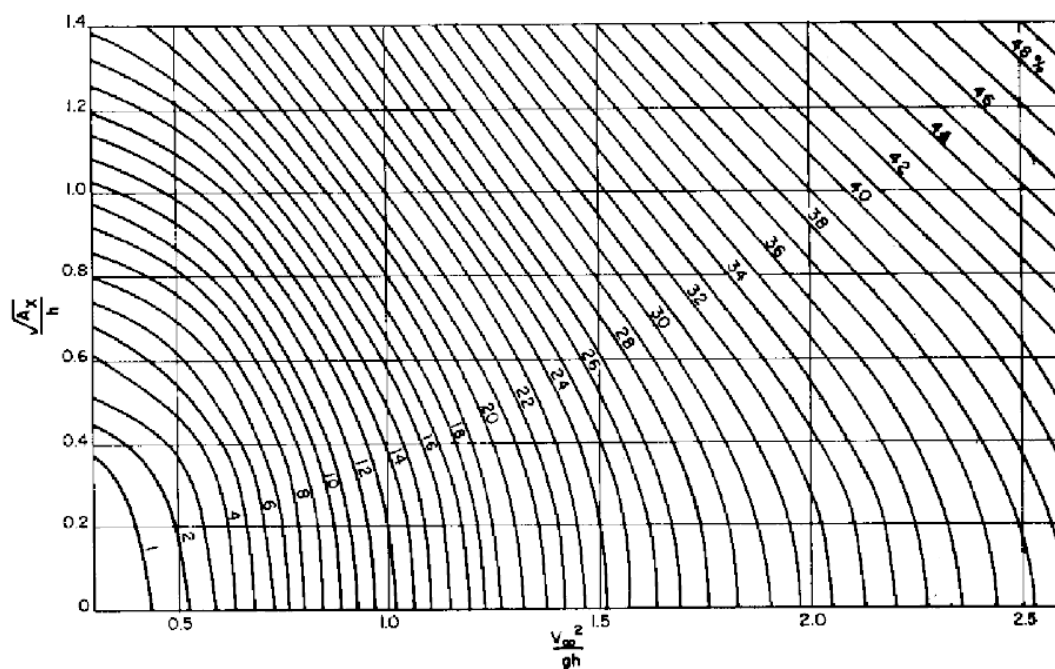
$$c_{w,s} = c_w \sqrt{\text{th} \frac{gh}{c_w^2}} \quad (24)$$

Slijedi da je brzina broda u plitkoj vodi jednaka:

$$v_{ss} = v - \Delta C \quad (25)$$

gdje ΔC predstavlja pad brzine broda. Opor trenja se smanjuje sa smanjenjem brzine broda. Prema Schlichtingu otpor trenja varira s drugom potencijom brzine.

Na slici 3. prikazan je Schlichtingov dijagram za određivanje utjecaja plitke vode na pad brzine.



Slika 3. Schlichtingov dijagram za određivanje utjecaja plitke vode na pad brzine [20]

Δv_p predstavlja dodatni pad brzine. Schlichtingova istraživanja pokazala su da Δv_p najviše ovisi o omjeru $\sqrt{A_x}/h$, gdje A_x predstavlja maksimalnu poprečnu površinu uronjenog dijela trupa. Sama metoda temeljena je na jednakosti preostalog otpora u neograničenoj i plitkoj vodi. Ova metoda je približna metoda te se može primijeniti i za ograničenu širinu plovnog puta.

2.5. Pokus otpora

Pokus otpora modela broda provodi se u bazenima za ispitivanje modela, koji prate preporuke i norme međunarodne organizacije poznate pod nazivom ITTC (eng. *International Towing Tank Conference*). Glavni cilj pokusa otpora je odrediti krivulju ovisnosti otpora o brzini modela. Što se izrade modela tiče, bitno je uskladiti veličinu modela s dimenzijama bazena.

Potrebno je osigurati i kalibrirati mjerne instrumente za provedbu pokusa. U pokusu otpora model se kolicima tegli kroz bazen te se mjere brzina i ukupni otpor [19].

Nakon što se provede ispitivanje, dobiveni rezultati za model broda prenose se na brod u naravi te se taj postupak naziva ekstrapolacija. Prilikom provedbe pokusa otpora potrebno je zadovoljiti hidrodinamičku sličnost koja uključuje geometrijsku, kinematičku i dinamičku sličnost. Geometrijska sličnost ostvaruje se konstantnim odnosom glavnih dimenzija modela broda i broda u naravi. Mjerilo geometrijske sličnosti definira se kao omjer glavnih značajki (duljina, širina i gaz) modela broda i broda u naravi [21]:

$$\lambda = \frac{L_S}{L_M} = \frac{B_S}{B_M} = \frac{T_S}{T_M} \quad (26)$$

gdje je λ mjerilo geometrijske sličnosti. Indeks S označava značajke broda (eng. *ship*), a indeks M (eng. *model*) označava značajke modela broda. Površine se odnose kao kvadrati mjerila geometrijske sličnosti, dok se volumeni odnose kao kubovi mjerila geometrijske sličnosti:

$$\lambda^2 = \frac{S_S}{S_M} \quad (27)$$

$$\lambda^3 = \frac{V_S}{V_M} \quad (28)$$

Da bi kinematička sličnost bila zadovoljena vektori brzina modela broda i broda moraju biti kolinearni, istog smjera te veličine u stalnom odnosu. Isto vrijedi i za vektore ubrzanja.

Prilikom plovidbe na brod djeluju gravitacijske, viskozne i inercijske sile. Da bi se ostvarila potpuna hidrodinamička sličnost, sve tri vrste sila moraju biti u stalnom odnosu. To nije moguće postići za mjerilo modela koje se razlikuje od 1 te se za potrebe modelskih ispitivanja dinamička sličnost djelomično zadovoljava preko jednakosti Froudeovih brojeva dok se Reynoldsov broj drži iznad kritične vrijednosti da bi se ostvarila turbulencija:

$$Rn_M > Rn_{krit} \quad (29)$$

Pri provedbi pokusa otpora model broda ima četiri stupnja slobode gibanja [19]:

- translacijsko gibanje u smjeru osi x – zaostajanje,
- translacijsko gibanje u smjeru osi z – poniranje,
- rotacijsko gibanje oko osi x – valjanje,
- rotacijsko gibanje oko osi y – posrtanje.

Rotacijsko gibanje oko osi z i translacijsko gibanje u smjeru osi y su onemogućeni.

Postoji više metoda kojima se rezultati ispitivanja mogu prenijeti na brod u naravi. Za ekstrapolaciju rezultata najčešće se koriste metode ITTC 1957 i ITTC 1978. U ovom radu korištena je metoda ITTC 1957 za ekstrapolaciju rezultata s modela broda na brod u naravi.

2.6. ITTC 1957 metoda

Ekstrapolacijska metoda ITTC 1957 temelji se na Froudeovoj podjeli otpora, gdje se ukupni otpor dijeli na otpor trenja i preostali otpor:

$$R_T = R_F + R_R \quad (30)$$

Ukupni otpor modela broda određuje se modelskim ispitivanjima kako bi se u konačnici izračunao koeficijent preostalog otpora za koji se pretpostavlja da je jednak za model i brod u naravi. Otpor trenja, odnosno koeficijent otpora trenja računa se pomoću korelacijske linije model – brod ITTC 1957 [21]:

$$C_F = \frac{0,075}{(\log Rn - 2)^2} \quad (31)$$

Koeficijenti preostalog otpora jednaki su za model broda i brod u naravi pri istom Froudeovom broju te glasi:

$$C_R = C_{R,M} = C_{R,S} \quad (32)$$

Primjenom ove ekstrapolacijske metode, koeficijent ukupnog otpora broda u naravi glasi:

$$C_{T,S} = C_{F,S} + C_R + C_A \quad (33)$$

gdje C_A predstavlja korelacijski dodatak, koji uzima u obzir hrapavost površine i utjecaj mjerila. Korelacijski dodatak se određuje na temelju rezultata pokusnih plovidbi te njegova vrijednost u nekim slučajevima može biti negativna.

2.7. ITTC 1978 metoda

Metoda ITTC 1978 [22] unaprijeđena je metoda ITTC 1957. ITTC je uveo faktor forme te su istraživanjima dokazali poboljšanje korelacije i ekstrapolacije podataka s modela broda na brod u naravi. Faktor forme k određuje se prema metodi Prohaske te je za njegovo određivanje potrebno koristiti rezultate ispitivanja otpora u području Froudeovih brojeva:

$$0,12 < Fn < 0,2 \quad (34)$$

Koeficijent ukupnog otpora za brod u naravi računa se pomoću izraza:

$$C_{TS} = (1+k)C_{FS} + \Delta C_F + C_A + C_W + C_{AAS} \quad (35)$$

gdje je:

ΔC_F – dodatak na hrapavost,

C_A – korelacijski dodatak,

C_{AAS} – koeficijent otpora zraka.

Koeficijent otpora trenja računa se prema jednadžbi (31), dok se koeficijent otpora valova C_W računa prema:

$$C_W = C_{TM} - C_{FM}(1+k) \quad (36)$$

Dodatak na hrapavost određuje se sljedećim izrazom:

$$\Delta C_F = 0,044 \left[\left(\frac{k_s}{L_{WL}} \right)^{\frac{1}{3}} - 10 Rn^{-\frac{1}{3}} \right] + 0,000125 \quad (37)$$

gdje je:

k_s – srednja amplituda hrapavosti,

L_{WL} – duljina na vodnoj liniji.

Korelacijski dodatak računa se kako slijedi:

$$C_A = 0,001(5,68 - 0,6 \log Rn) \quad (38)$$

Koeficijent otpora zraka može se izračunati kao:

$$C_{AAS} = C_{DA} \frac{\rho_A A_{VS}}{\rho_S S_S} \quad (39)$$

gdje je:

ρ_A – gustoća zraka,

A_{VS} – površina izložena vjetru projicirana na poprečnu ravninu,

ρ_S – gustoća morske vode,

S_S – oplakana površina broda,

C_{DA} – koeficijent otpora zraka (najčešće iznosi 0,8).

3. RAČUNALNA DINAMIKA FLUIDA

3.1. Uvod u računalnu dinamiku fluida

Mehanika fluida temelji se na teorijskom i eksperimentalnom pristupu. Temelj teorijskog pristupa je rješavanje matematičkih modela strujanja fluida, čija bi analitička rješenja trebala dati uvid u fiziku samog problema. S druge strane većinu problema vezanih uz strujanje fluida definiraju nelinearne diferencijalne jednačbe, koje nemaju opće analitičko rješenje. Dodatan problem je turbulentno strujanje, koje nije moguće analitički opisati. Eksperimentalni pristup olakšao je rješavanje problema, ali je njime dobiven ograničeni broj podataka vezanih uz neku pojavu. Prednost analitičkog pristupa u odnosu na eksperimentalni je što se iz jednog rezultata mogu dobiti detaljnije informacije o utjecaju pojedinih parametara. Tehnološki napredak omogućio je razvoj nove grane mehanike fluida poznate pod nazivom računalna dinamika fluida, RDF. Računalna dinamika fluida ima dosta sličnosti s eksperimentalnim pristupom, ali njen temelj leži na teorijskom pristupu za koju je važna matematička podloga. Uz brojne prednosti RDF – a izrazito je bitno iskustvo inženjera koji provodi numeričke simulacije jer uvijek postoji mogućnost da numerički postupak ne postigne željenu konvergenciju [23].

3.2. Postavke numeričke simulacije

Na početku svake numeričke simulacije potrebno je definirati problem te odabrati matematički model. Svaki komercijalni programski paket za RDF ima već ugrađeni matematički model. Matematički model predstavlja matematički zapis fizikalnog modela, koji se temelji na nekoliko pretpostavki pri aproksimaciji realnog svijeta te će se ukratko opisati u sljedećem poglavlju. Sljedeći korak u numeričkoj simulaciji je rješavanje zadanog matematičkog modela. Numeričko rješavanje sastoji se od tri koraka. Prvi korak čini diskretizacija područja proračuna, čiji je rezultat geometrijska mreža. U drugom koraku se na temelju definirane geometrijske mreže diskretiziraju parcijalne diferencijalne jednačbe matematičkog modela. Diskretizaciju je moguće provesti nekom od metoda kao što je primjerice metoda konačnih volumena. Na kraju se dobiva sustav linearnih ili nelinearnih diferencijalnih jednačbi, koje se rješavaju iterativnim postupcima. Nakon dobivenog numeričkog rješenja slijedi njegova analiza. Organizacijski gledano numerička simulacija provodi se kroz tri programa s različitim zadacima:

- predprocesor,
- procesor,

- postprocesor.

Predprocesor služi za generiranje geometrijske mreže pri čemu je važno dobro definirati rubne uvjete domene. Generiranje mreže jedan je od ključnih dijelova u postavljanju numeričke simulacije te zahtijeva određeno vrijeme. Zadatak procesora je numeričko rješavanje matematičkog modela, dok postprocesor služi za analizu i vizualizaciju rezultata [23].

3.3. Pretpostavke fizikalnog modela

Kao što je prethodno spomenuto svaka numerička simulacija sadrži matematički model koji predstavlja zapis fizikalnog modela. Za uspješno postavljanje i provedbu numeričke simulacije bitno je definirati nekoliko preduvjeta kako bi se određeni problem mogao dobro opisati. Jedna od bitnijih pretpostavki je da je fluid kontinuum što znači da se fizikalna svojstva ne mijenjaju ni za slučaj izrazito malog volumena. Sljedeće pretpostavke koje su važne su izotropnost i homogenost. Izotropnost podrazumijeva jednakost fizikalnih svojstava u svim smjerovima, dok homogenost znači da su fizikalna svojstva ista u svim točkama fluida. Fluid se može sastojati od jedne ili više faza kao i od jedne ili više komponenti. U stvarnom svijetu strujanje se mijenja u vremenu što znači da je nestacionarno te bi pretpostavka o stacionarnom strujanju pojednostavnila problem. U prirodi je najčešći slučaj turbulentnog strujanja, koje se ne može opisati analitički, dok je laminarno strujanje rijetko i to samo pri niskim Reynoldsovim brojevima. Modeliranje turbulencije obuhvaća različite metode kojima se može pristupiti rješavanju problema i jednadžbi vezanih uz turbulenciju. Turbulentnu viskoznost moguće je modelirati preko dva parametra turbulencije, koje mogu uključivati diferencijalne ili algebarske jednadžbe.

3.4. Strujanje nestlačivog fluida – osnovni zakoni i jednadžbe

Zakoni fizike koji opisuju strujanje nestlačivog fluida su zakon očuvanja mase, zakon očuvanja količine gibanja, zakon očuvanja momenta količine gibanja te zakon očuvanja energije. Temelj za definiranje navedenih zakona je materijalni volumen, iako ih je također moguće primijeniti na volumen nepromjenjivog položaja, oblika i veličine, koji se zove kontrolni volumen.

Zakon očuvanja mase poznat i pod nazivom jednadžba kontinuiteta pokazuje da je promjena mase materijalnog volumena jednaka nuli te glasi [24]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (40)$$

gdje je v_i vektor brzine.

Eulerova jednadžba, odnosno jednadžba količine gibanja zapisuje se kao:

$$\rho \frac{Dv_i}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) = \rho f_i + \frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j} \quad (41)$$

gdje je:

ρ – gustoća fluida,

v_i – vektor brzine,

f_i – gustoća masene sile,

$\frac{D}{Dt}$ – operator materijalne derivacije,

σ_{ij} – tenzor naprezanja.

S obzirom da je više nepoznanica nego jednadžbi, uvode se dopunske jednadžbe:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \Sigma_{ij} \quad (42)$$

$$p = -\frac{1}{3} \sigma_{kk} \quad (43)$$

$$\Sigma_{ij} = 2\mu D_{ij} - \frac{2}{3} \mu D_{kk} \delta_{ij} \quad (44)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (45)$$

gdje je:

p – tlak,

δ_{ij} – Kroneckerov delta simbol,

Σ_{ij} – devijatorski dio tenzora naprezanja,

D_{ij} – tenzor brzine deformacije,

μ – dinamički koeficijent viskoznosti.

Kombinacijom dopunskih jednadžbi i Eulerove jednadžbe (41) dobivaju se Navier – Stokesove jednadžbe koje za nestlačivo strujanje glase:

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \rho v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \rho f_i - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(p + \frac{2}{3} \mu D_{kk} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu D_{ij}) \quad (46)$$

Uvođenjem supstitucije $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ jednadžba (46) glasi:

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \nabla^2 v_i \quad (47)$$

gdje je ν kinematički koeficijent viskoznosti.

3.5. Vremenski osrednjene jednadžbe

Kao što je već naglašeno, turbulentno strujanje nije moguće opisati analitički te se rješava numerički. S obzirom da su inženjerima dovoljne prosječne vrijednosti fizikalnih veličina turbulentno strujanje se često opisuje pomoću Reynoldsovih osrednjenih Navier – Stokesovih jednadžbi (RANS).

Određenu fizikalnu veličinu u turbulentnom strujanju moguće je izraziti kao [25]:

$$f(x_i, t) = \bar{f}(x_i) + f'(x_i, t) \quad (48)$$

gdje je:

$\bar{f}$ – vremenski osrednjena vrijednost,

f' – pulsirajući dio.

Vremenski osrednjena vrijednost računa se kao:

$$\bar{f}(x_i) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T f(x_i, t) dt \quad (49)$$

gdje je:

t – vrijeme,

T – period osrednjavanja.

Ukoliko je period osrednjavanja T dovoljno velik, tada $\bar{f}$ neće ovisiti o trenutku kada je osrednjavanje započelo.

Komponente tlaka i brzine, nepoznanice u jednadžbi kontinuiteta i jednadžbi količine gibanja, sastoje se od osrednjenog i pulsirajućeg dijela te glase:

$$v_i = \bar{v}_i + v'_i \quad (50)$$

$$p = \bar{p} + p' \quad (51)$$

gdje je:

$\bar{v}_i$ – vremenski osrednjena komponenta brzine,

v'_i – pulsirajuća komponenta brzine,

$\bar{p}$ – vremenski osrednjena komponenta tlaka,

p' – pulsirajuća komponenta tlaka.

Nakon vremenskog osrednjavanja jednadžba kontinuiteta glasi:

$$\frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (52)$$

Vremenskim osrednjavanjem gube se pulsirajuće komponente fizikalnih veličina.

Uz zanemarenje masene sile slijedi Reynoldsova osrednjena Navier – Stokesova jednadžba koja glasi:

$$\rho \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \rho \bar{v}_j \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{v'_i v'_j} \right) \quad (53)$$

gdje je $\overline{\rho v'_i v'_j}$ Reynoldsov tenzor naprežanja sa šest nepoznanica. Kako bi se uskladio broj nepoznanica i jednadžbi primjenjuje se model turbulencije.

U ovom radu korišten je $k - \omega$ SST model turbulencije.

3.6. $k - \omega$ SST model turbulencije

Za potrebe ovog rada korišten je $k - \omega$ SST model turbulencije [26]. To je model koji sadrži dvije transportne jednadžbe, jednu za turbulentnu kinetičku energiju k i drugu za specifičnu brzinu disipacije turbulentne kinetičke energije ω . Model je dobiven kombinacijom $k - \varepsilon$ modela turbulencije i standardnog $k - \omega$ modela turbulencije. Iako se češće primjenjuje $k - \varepsilon$ model, koji je ekonomičniji sa stajališta proračunskog vremena $k - \omega$ SST ima bitne prednosti kao što su:

- veća točnost proračuna kod povećanih gradijenata tlaka (granični sloj),
- model je moguće primijeniti u cijelom graničnom sloju, čak i u područjima velikog utjecaja viskoznosti,
- koristi modificirane linearne konstitutivne jednadžbe.

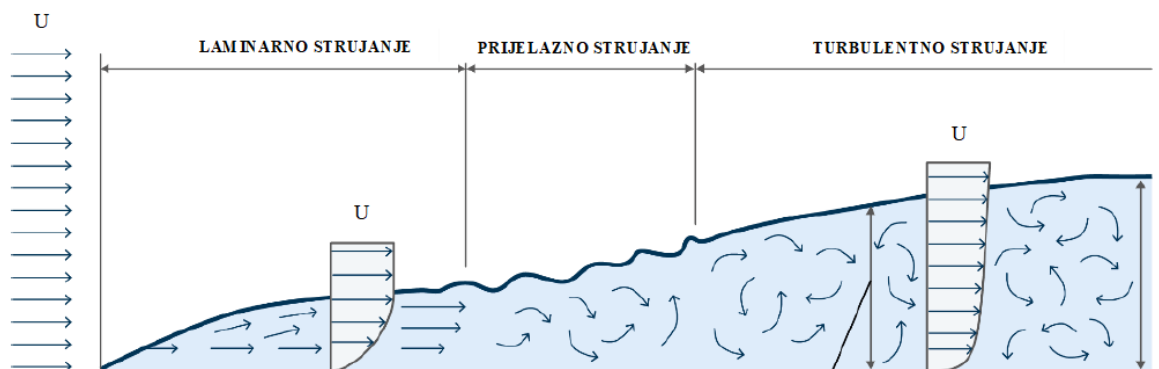
3.7. Modeliranje graničnog sloja

Strujanje oko broskog trupa može se podijeliti na tri područja s različitim značajkama, a to su [19]:

- granični sloj,
- hidrodinamički trag,
- područje potencijalnog strujanja.

Područje strujanja koje se formira uz stijenku broda naziva se granični sloj [21]. Podrazumijeva se da se radi o krutoj i nepropusnoj stijenci. Izvan graničnog sloja utjecaj viskoznosti zanemaruje se zbog malih gradijenata brzine strujanja pa se fluid smatra idealnim u području potencijalnog strujanja. Strujanje unutar graničnog sloja može biti laminarno, prijelazno ili turbulentno. Debljina graničnog sloja veća je kod turbulentnog strujanja te se povećava od pramca prema krmi. U području krme granični sloj odvaja se od trupa broda te prelazi u područje koje se zove hidrodinamički trag [19].

Modeliranje graničnog sloja u blizini krute stijenske predstavlja izazov za inženjere. Turbulencija najčešće nastaje pri velikim gradijentima brzine te strujanje prelazi iz laminarnog u turbulentno. Nerijetko je potrebna vrlo fina mreža kako bi se granični sloj dobro modelirao. Na slici 4. prikazan je granični sloj i područja strujanja fluida [27].



Slika 4. Granični sloj i područja strujanja fluida [27]

Debljina graničnog sloja δ definirana je kao udaljenost od površine na kojoj brzina strujanja u postiže vrijednost:

$$u_x = (0,99 - 0,995)u \quad (54)$$

Kao što je vidljivo sa slike 4. brzina strujanja se značajno mijenja u smjeru normale. Granični sloj dijeli se na tri podsloja:

- viskozni (eng. *viscous sublayer*),
- prijelazni (eng. *buffer layer*),
- logaritamski (eng. *log – law region*).

Viskozni podsloj ($0 < y^+ < 5$) nalazi se u blizini stijenke te bezdimenzijski izraz za profil brzine glasi:

$$u^+ = y^+ \quad (55)$$

gdje je:

u^+ – bezdimenzijska brzina,

y^+ – bezdimenzijska udaljenost od stijenke.

Bezdimenzijsku brzinu i bezdimenzijsku udaljenost od stijenke moguće je izraziti kako slijedi:

$$u^+ = \frac{\bar{u}}{u_\tau} \quad (56)$$

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau y}{\mu} \quad (57)$$

gdje je:

u_τ – brzina trenja,

$\bar{u}$ – komponenta brzine strujanja paralelno sa stijenkom,

y – udaljenost od stijenke.

Brzina trenja u_τ određuje se na sljedeći način:

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (58)$$

gdje je:

τ_w – tangencijalno naprezanje na stijenci.

U prijelaznom području ($5 < y^+ < 30$) profil brzine nije definiran. U logaritamskom području ($30 < y^+ < 300$) profil brzine slijedi logaritamski zakon te glasi [23]:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B \quad (59)$$

gdje je:

B – konstanta integracije,

K – von Karmanova konstanta.

Ukoliko se pri modeliranju graničnog sloja primjenjuju zidne funkcije vrijednost parametra y^+ mora iznositi $30 < y^+ < 300$. U ovom radu zidne funkcije primijenjene su u numeričkim simulacijama za brod u naravi u neograničenoj i plitkoj vodi, dok je za model broda u neograničenoj i plitkoj vodi $y^+ < 1$.

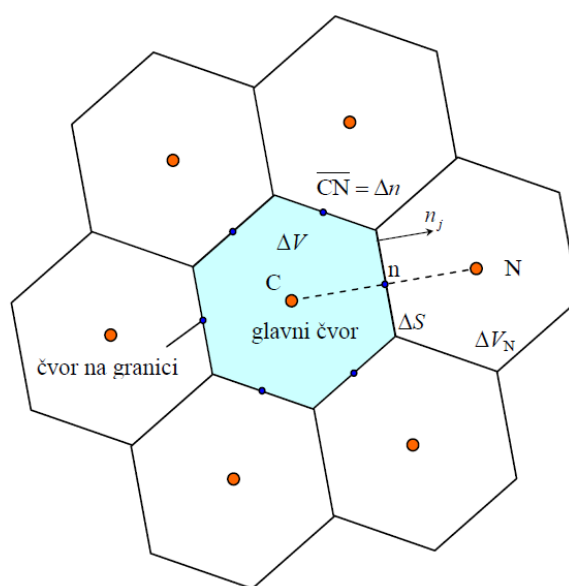
3.8. Metoda konačnih volumena

Metodom konačnih volumena proračunska domena diskretizira se pomoću manjih, kontrolnih volumena. Temelj ove metode leži na integraciji konzervativnog oblika transportnih jednadžbi po kontrolnom volumenu:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Delta V} \rho \varphi dV = - \int_{\Sigma \Delta S} (\rho v_j \varphi - \Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x_j}) n_j dS + \int_{\Delta V} S_\varphi dV \quad (60)$$

Prvi član s lijeve strane izraza (60) je brzina promjene sadržaja razmatranog fizikalnog svojstva φ u volumenu, koji je jednak zbroju konvekcijskog i difuzijskog protoka φ kroz granice, što je dano prvim članom s desne strane jednadžbe i izvora fizikalnog svojstva što je dano drugim članom s desne strane jednadžbe.

Slika 5. prikazuje ćeliju diskretiziranog volumena i njezin glavni čvor. Ćeliju okružuju dodatni volumeni i njihovi čvorovi te su vidljivi i čvorovi na granicama [23].



Slika 5. Diskretizacija proračunske domene [23]

3.9. Metoda udjela fluida u volumenu (VOF metoda)

Za određivanje položaja slobodne površine u ovom radu primijenjena je metoda udjela fluida u volumenu (eng. *Volume of Fluid*, VOF). Navedena metoda omogućuje analizu položaja slobodne površine između zraka i vode, koji se ne miješaju. Pretpostavlja se da različiti fluidi na istoj granici imaju iste vrijednosti tlaka, brzine i temperature te nije potrebno dodatno modelirati međufazne interakcije [26].

Za pojedinu fazu (fluid) volumni udio unutar kontrolnog volumena određuje se na sljedeći način:

$$\alpha_i = \frac{V_i}{V} \quad (61)$$

gdje je:

α_i – volumni udio pojedinog fluida u kontrolnom volumenu,

V – kontrolni volumen,

V_i – volumen i – tog fluida unutar kontrolnog volumena.

U tablici 1. prikazana su tri slučaja za različite vrijednosti parametra α_i .

Tablica 1. Sadržaj ćelije za različite vrijednosti parametra α_i

Parametar α_i	Sadržaj ćelije
$\alpha_i = 0$	zrak
$0 < \alpha_i < 1$	voda i zrak
$\alpha_i = 1$	voda

Gustoću ρ i dinamički koeficijent viskoznosti μ moguće je izračunati na temelju sljedećih izraza:

$$\rho = \sum_i \rho_i \alpha_i \quad (62)$$

$$\mu = \sum_i \mu_i \alpha_i \quad (63)$$

gdje indeks i predstavlja i – tu fazu unutar kontrolnog volumena.

3.10. Validacija rezultata numeričkih simulacija

Validacija rezultata numeričkih simulacija za plitku vodu provedena je usporedbom rezultata dobivenih numeričkim simulacijama s rezultatima ispitivanja. Rezultati numeričkih simulacija za brod u naravi uspoređeni su s ekstrapoliranim rezultatima modelskih ispitivanja. Cilj je ostvariti što bolje rezultate, odnosno što manje odstupanje numeričkih rezultata od rezultata ispitivanja (eksperimentalnih rezultata).

U ovom radu relativna devijacija numeričkih od eksperimentalnih rezultata određena je na sljedeći način:

$$RD = \frac{R_{T_RDF} - R_{T_EKS}}{R_{T_EKS}} \cdot 100\% \quad (64)$$

gdje je:

RD – relativna devijacija,

R_{T_RDF} – ukupni otpor dobiven numeričkom simulacijom,

R_{T_EKS} – ukupni otpor određen eksperimentom.

Jednadžba (64) prikazuje način izračuna relativne devijacije za ukupni otpor, uron/izron i trim broda. Ekstrapolacija rezultata s modela na brod u naravi provedena je metodom ITTC 1957 čija je teorijska podloga dana u drugom poglavlju.

3.11. Verifikacija rezultata numeričkih simulacija

Verifikacija je postupak određivanja nesigurnosti numeričkih rezultata te provjere konvergencije rezultata. Kako bi se proveo postupak verifikacije numeričke simulacije potrebno je provesti za minimalno tri mreže različite gustoće te minimalno tri različita vremenska koraka [28]. Gruba, srednja i fina mreža se razlikuju po broju ćelija, ovisno o vrijednosti osnovne veličine ćelije. Verifikacija se također provodi za tri različita vremenska koraka i finu mrežu te se na taj način analizira kako promjena vremenskog koraka (eng. *time step*) utječe na numeričke rezultate.

Razlike numeričkih rezultata računaju se prema sljedećim izrazima:

$$\varepsilon_{i,21} = \hat{S}_{i,2} - \hat{S}_{i,1} \quad (65)$$

$$\varepsilon_{i,32} = \hat{S}_{i,3} - \hat{S}_{i,2} \quad (66)$$

gdje je:

$\hat{S}_{i,1}$ – rezultat fine mreže,

$\hat{S}_{i,2}$ – rezultat srednje mreže,

$\hat{S}_{i,3}$ – rezultat grube mreže,

$\varepsilon_{i,21}$ – razlika rezultata srednje i fine mreže,

$\varepsilon_{i,32}$ – razlika rezultata grube i srednje mreže.

Vrsta konvergencije određuje se pomoću vrijednosti omjera konvergencije R_i , tablica 2.

Tablica 2. Vrsta konvergencije

R_i	Vrsta konvergencije
$0 < R_i < 1$	monotona
$-1 < R_i < 0$	oscilatorna
$ R_i > 1$	divergencija

Omjer konvergencije R_i računa se prema:

$$R_i = \frac{\varepsilon_{i,21}}{\varepsilon_{i,32}} \quad (67)$$

3.12. Numerička nesigurnost rezultata

Numerička nesigurnost rezultata računa se ovisno o vrsti konvergencije [29]. Ako je riječ o monotonij konvergenciji, numerička nesigurnost određuje se pomoću Richardsonove ekstrapolacije koja glasi:

$$U_i = F_s \left| \delta_{RE_i,1}^{*(1)} \right| \quad (68)$$

gdje je F_s faktor sigurnosti, čija vrijednost iznosi 1,25 dok se greška $\delta_{RE_i,1}^{*(1)}$ računa kao:

$$\delta_{RE_i,1}^{*(1)} = \frac{\varepsilon_{i,21}}{r_i^{p_i} - 1} \quad (69)$$

gdje je:

p_i – red točnosti,

r_i – omjer profinjenja, koji iznosi $\sqrt{2}$.

Red točnosti određuje se pomoću izraza:

$$p_i = \frac{\ln\left(\frac{\varepsilon_{i,32}}{\varepsilon_{i,21}}\right)}{\ln(r_i)} \quad (70)$$

Ako je riječ o oscilatornoj konvergenciji nesigurnost se računa na sljedeći način:

$$U_i = \frac{S_U - S_L}{2} \quad (71)$$

gdje je:

S_U – gornja vrijednost rezultata dobivenih numeričkim simulacijama,

S_L – donja vrijednost rezultata dobivenih numeričkim simulacijama.

Ukoliko je omjer konvergencije veći od 1, riječ je o divergenciji te se numerička nesigurnost određuje kao:

$$U_i = |S_U - S_L| \quad (72)$$

Konačno, ukupna se nesigurnost numeričkih simulacija određuje prema [29]:

$$\overline{U}_{SN} = \sqrt{\overline{U}_G^2 + \overline{U}_T^2} \quad (73)$$

$$\overline{U}_G = \frac{U_i}{\hat{S}_{G,1}} \cdot 100\% \quad (74)$$

$$\overline{U}_T = \frac{U_i}{\hat{S}_{T,1}} \cdot 100\% \quad (75)$$

gdje je:

$\overline{U}_G$ – nesigurnost gustoće mreže,

$\overline{U}_T$ – nesigurnost vremenskog koraka.

4. POSTAVKE NUMERIČKIH SIMULACIJA ZA NEOGRANIČENU I PLITKU VODU ZA MODEL BRODA I BROD U NARAVI

Računalne simulacije provedene su za model kontejnerskog broda DTC (eng. *Duisburg Test Case*) i brod u naravi u neograničenoj i plitkoj vodi za dva Froudeova broja, $Fn = 0,052$ i $Fn = 0,139$ što odgovara brzini od 6 čv odnosno 16 čv za brod u naravi.

3D forma broda i eksperimentalni rezultati ispitivanja modela broda dostupni su u literaturi, a u tablici 3. nalaze se glavne značajke modela broda i broda u naravi [30].

Tablica 3. Glavne značajke DTC modela broda i broda u naravi

Značajka	Model	Brod
λ	89,11	-
L_{PP} , m	3,984	355
B , m	0,572	51
T , m	0,163	14,5
Δ , t	0,1214	173 467
S , m ²	2,775	22 032
C_B	0,661	0,661
L_{CG} , m	2,029	180,8
V_{CG} , m	0,059	5,257
r_{xx} , m	0,22	19,8
r_{yy} , m	0,95	85,02
r_{zz} , m	0,97	86,7

Na slici 6. prikazan je 3D model broda, nakon unosa u STAR – CCM+. Ishodište koordinatnog sustava nalazi se na konstrukcijskoj vodnoj liniji na krmenoj okomici. Os x pozitivna je gledajući od krme prema pramcu, os y pozitivna je u smjeru lijevog boka, dok je os z pozitivna u smjeru normale na slobodnu površinu.



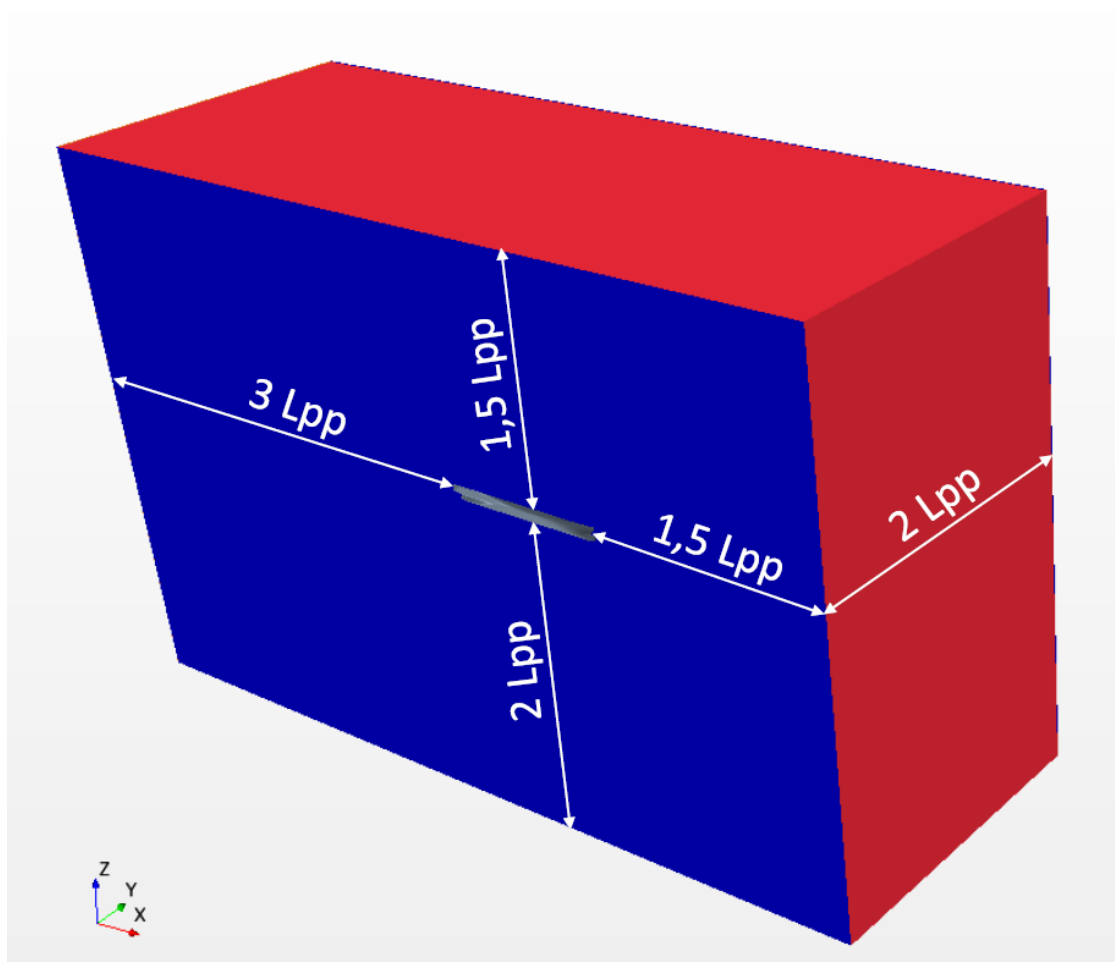
Slika 6. 3D model DTC broda

4.1. Proračunska domena

Za provedbu numeričkih simulacija potrebno je kreirati i definirati proračunsku domenu, odnosno virtualni tank (eng. *virtual towing tank*), koji bi predstavljao područje oko modela broda ili broda u naravi. Proračunska domena za pokus otpora se kreira u obliku kvadra, prema preporukama ITTC – a (eng. *International Towing Tank Conference*) [31]. Unutar proračunske domene definiraju se rubni uvjeti, koji su od velike važnosti za uspješnu provedbu simulacija i dobivanje željenog rješenja.

4.1.1. Neograničena dubina

Proračunska domena za model broda i brod u naravi za neograničenu dubinu, prikazana je na slici 7.



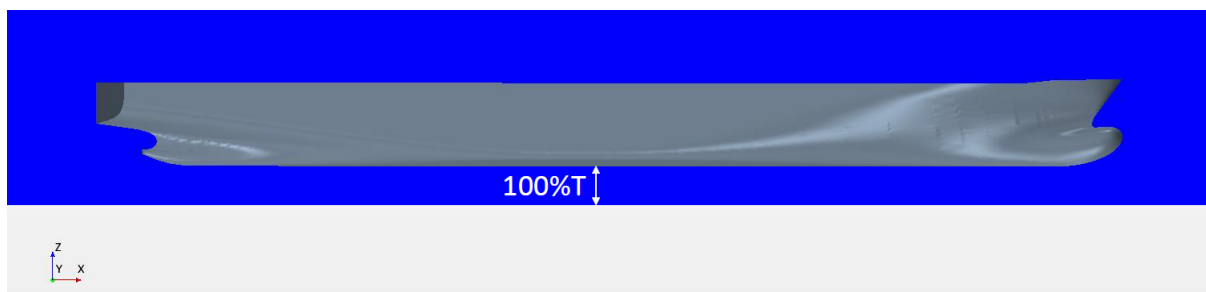
Slika 7. Proračunska domena za neograničenu dubinu

Na slici 7. prikazane su dimenzije proračunske domene. Granice domene u uzdužnom smjeru (os x) postavljene su na $3L_{PP}$ iza broda te $1,5L_{PP}$ ispred broda, a u vertikalnom smjeru (os z) na $1,5L_{PP}$ iznad broda te $2L_{PP}$ ispod broda. Model je simetričan stoga je kreirano pola

proračunske domene, a bočna granica udaljena je $2L_{PP}$ od broda u smjeru osi y . Operacijom „Boolean – subtract“ model se izrezuje iz kvadra te je proračunska domena definirana. Rubni uvjet simetrije uvelike ubrzava numerički postupak jer se simulacije provode za polovicu proračunske domene.

4.1.2. Plitka voda

Dimenzije proračunske domene modela broda i broda u naravi u plitkoj vodi, također su određene prema preporukama ITTC – a te odgovaraju dimenzijama u neograničenoj dubini osim za slučaj granice dna koja je postavljena na udaljenosti od 100% gaza od kobilice u vertikalnom smjeru. Na slici 8. prikazana je udaljenost između dna i kobilice broda.



Slika 8. Dio proračunske domene u plitkoj vodi

4.2. Rubni uvjeti

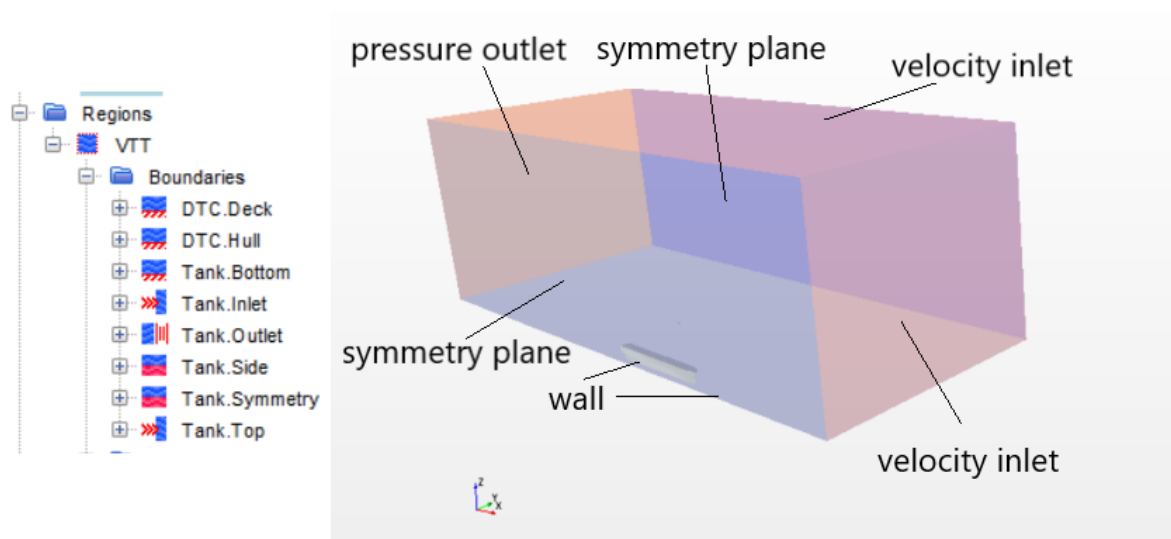
Rubni uvjeti postavljaju se na granicama proračunske domene [26]. Pri provedbi numeričkih simulacija omogućena su dva stupnja slobode gibanja modela broda i broda u naravi: rotacijsko gibanje oko osi y odnosno posrtanje i translacijsko gibanje u smjeru osi z odnosno poniranje.

Na trupu broda zadaje se rubni uvjet zida (eng. *wall*). Na gornjoj i ulaznoj granici postavlja se rubni uvjet brzine strujanja (eng. *velocity inlet*). Smatra se da brod miruje, a fluid nastrujava na njega. Na bočnim granicama postavlja se već spomenuti rubni uvjet simetrije. Na izlaznoj granici definiran je rubni uvjet tlaka, dok je na dnu kao i na trupu definiran rubni uvjet zida zbog ograničenja dubine.

Za proračunsku domenu numeričkih simulacija za neograničenu dubinu postavljeni su isti rubni uvjeti kao i za plitku vodu, osim za dno gdje je kao i za gornju i ulaznu granicu postavljen rubni uvjet brzine strujanja.

Za numeričke simulacije u neograničenoj dubini, potrebno je proračunati debljinu graničnog sloja koji se formira oko trupa broda i na temelju toga generirati mrežu. Kod plitke vode granični sloj stvara se i na dnu što zahtijeva diskretizaciju područja graničnog sloja i uz dno.

Na slici 9. prikazani su postavljeni rubni uvjeti za numeričke simulacije u plitkoj vodi.



Slika 9. Rubni uvjeti proračunske domene za plitku vodu

4.3. Generiranje geometrijske mreže

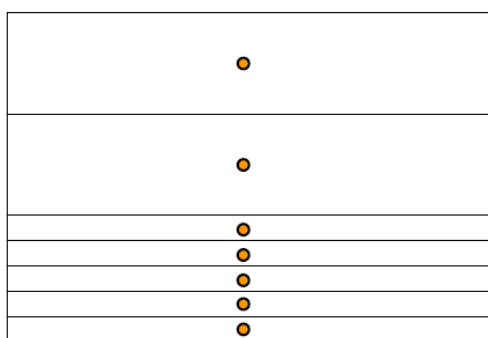
U poglavlju 3. spomenuto je da se proračunska domena diskretizira metodom konačnih volumena te se sastoji od heksaedarskih ćelija (eng. *cells*). U programskom paketu STAR – CCM+ korišten je alat za automatsku diskretizaciju mreže (eng. *automated mesh*). Unutar navedenog alata definirana su još četiri alata, koja služe za automatsko generiranje mreže, tablica 4. [26].

Tablica 4. Alati za automatsku diskretizaciju mreže

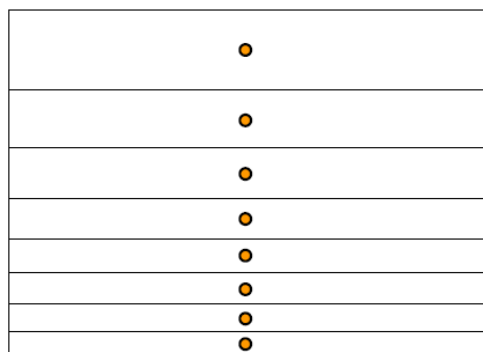
Alat	eng.
Alat za rediskretizaciju površina	<i>Surface Remesher</i>
Alat za automatski popravak površine	<i>Automatic Surface Repair</i>
Alat za diskretizaciju izrezanih ćelija	<i>Trimmed Cell Mesher</i>
Alat za diskretizaciju prizama unutar graničnog sloja	<i>Prism Layer Mesher</i>

Prije same diskretizacije potrebno je definirati određene postavke. Izrazito je važno ostvariti postepeni prijelaz između posljednje ćelije u graničnom sloju i prve ćelije okolne mreže. Na slici 10. prikazana su dva primjera diskretizacije graničnog sloja [23]. Na desnoj slici vidi se kontinuirani prijelaz kakav bi trebalo ostvariti prilikom modeliranja graničnog sloja uz trup

broda. Granični sloj uz trup modela broda i brod u naravi te uz dno za slučaj plitke vode diskretizira se pomoću sloja prizama.



Loše: skokovita promjena
veličine ćelija



Dobro: kontinuirana promjena
veličine ćelija

Slika 10. Diskretizacija graničnog sloja [23]

4.3.1. Diskretizacija proračunske domene za model broda u neograničenoj dubini

U tablici 5. dan je prikaz osnovnih postavki za diskretizaciju graničnog sloja fine mreže za model broda.

Postavke koje je potrebno definirati su:

- osnovna veličina ćelije (eng. *base size*),
- broj slojeva prizama (eng. *number of prism layers*),
- faktor rastezanja (eng. *prism layer stretching*),
- ukupna debljina graničnog sloja (eng. *prism layer total thickness*).

Ostale postavke kao što su ciljana veličina površine (eng. *target surface size*), minimalna veličina površine (eng. *minimum surface size*), zakrivljenost površine (eng. *surface curvature*), automatski popravak površine (eng. *auto – repair minimum proximity*), stope rasta (eng. *growth rate*) i maksimalna veličina površine (eng. *maximum surface size*) jednake su za sve slučajeve provedenih numeričkih simulacija, odnosno za neograničenu i plitku vodu za model broda i brod u naravi.

Na temelju osnovne veličine ćelije razlikuju se tri gustoće mreže: gruba, srednja i fina. Omjer profinjenja, koji određuje odnos između osnovnih veličina ćelija fine i srednje, odnosno srednje i grube mreže iznosi $\sqrt{2}$. U tablici 6. prikazane su osnovne veličine ćelija pojedinih mreža te ukupni broj ćelija. Vidljivo je da fina mreža ima oko četiri puta više ćelija od grube mreže.

Tablica 5. Osnovne postavke diskretizacije proračunske domene za finu mrežu modela broda

Postavka	Opcija	Vrijednost
Osnovna veličina ćelije	Vrijednost	0,03 m
Ciljana veličina površine	Postotak osnovne veličine	50%
Minimalna veličina površine	Postotak osnovne veličine	6,25%
Zakrivljenost površine	Broj točaka u krugu	36
Automatski popravak površine	Minimalna neposredna blizina	0,001
Broj slojeva prizama	Broj	11
Ukupna debljina sloja prizama	Apsolutna vrijednost	0,006933 m
Faktor rastezanja	Koeficijent	1,5
Stopa rasta	Zadana stopa rasta	Sporo
Stopa rasta	Stopa rasta granice	Sporo
Maksimalna veličina površine	Postotak osnovne veličine	1600%

Tablica 6. Osnovne veličine ćelija i ukupni broj ćelija pojedine mreže

Mreža	Osnovna veličina ćelije	Ukupni broj ćelija
Gruba mreža	0,06 m	620 094
Srednja mreža	0,0424 m	1 253 569
Fina mreža	0,03 m	2 626 213

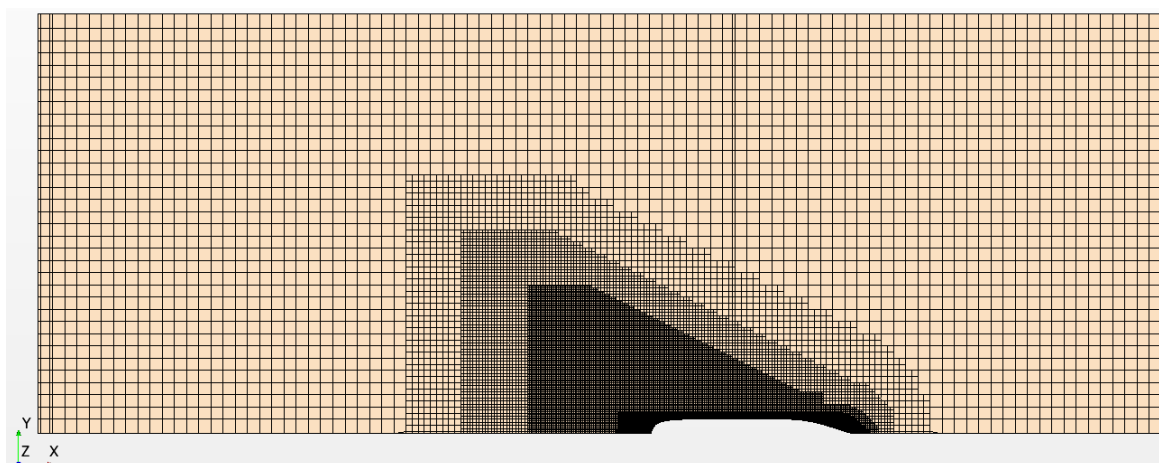
4.3.2. Diskretizacija proračunske domene za model broda u plitkoj vodi

Kao što je već spomenuto pri gibanju modela broda u plitkoj vodi formira se granični sloj na dnu. Postavke za modeliranje graničnog sloja uz trup i dno navedene su u tablici 7. Osnovna veličina ćelije jednaka je kao i za slučaj neograničene dubine. Ukupni broj ćelija svake mreže nešto je veći od ukupnog broja ćelija za slučaj neograničene dubine zbog dodatne diskretizacije graničnog sloja uz dno.

Tablica 7. Postavke za diskretizaciju graničnih slojeva za model broda u plitkoj vodi

Granični sloj	Broj slojeva prizama	Faktor rastezanja	Ukupna debljina graničnog sloja
trup	12	1,45	0,00795 m
dno	15	1,45	0,03349 m

Na slici 11. prikazan je presjek fine geometrijske mreže u razini vodne linije za model broda.



Slika 11. Presjek fine geometrijske mreže u razini vodne linije za model broda

4.3.3. Diskretizacija proračunske domene za brod u naravi u neograničenoj i plitkoj vodi

U numeričkim simulacijama za brod u naravi granični sloj se modelira pomoću zidnih funkcija za koje vrijedi $y^+ > 30$. Za slučaj plitke vode potrebno je kao i za model broda u plitkoj vodi modelirati granični sloj na dnu. U tablici 8. prikazane su postavke numeričkih simulacija strujanja oko broda u naravi u neograničenoj i plitkoj vodi. Osnovne veličine ćelija grube, srednje i fine mreže te ukupni broj ćelija za slučaj plitke vode prikazani su u tablici 9.

Tablica 8. Postavke za diskretizaciju graničnih slojeva za brod u naravi u neograničenoj i plitkoj vodi

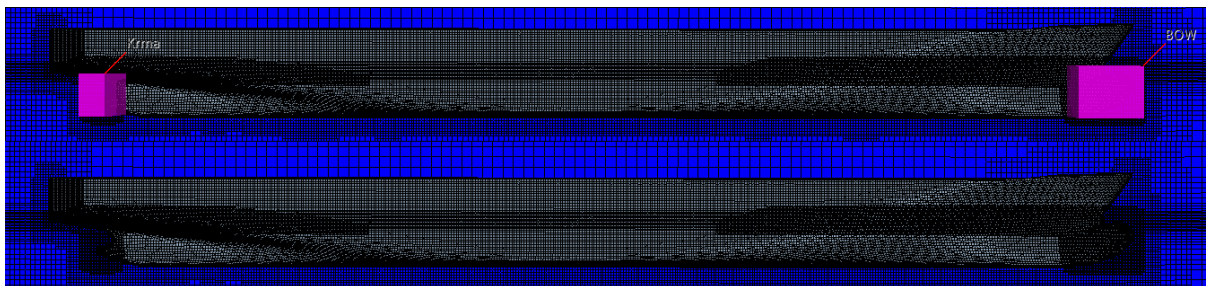
	Granični sloj	Broj slojeva prizama	Faktor rastezanja	Ukupna debljina graničnog sloja
Neograničena dubina	trup	13	1,5	0,8255 m
Plitka voda	trup	13	1,45	0,4838 m
	dno	19	1,5	2,265 m

Tablica 9. Osnovne veličine ćelija i ukupni broj ćelija pojedine mreže za brod u naravi u plitkoj vodi

Mreža	Osnovna veličina ćelije	Ukupni broj ćelija
Gruba mreža	5 m	833 262
Srednja mreža	3,54 m	1 593 575
Fina mreža	2,5 m	3 284 605

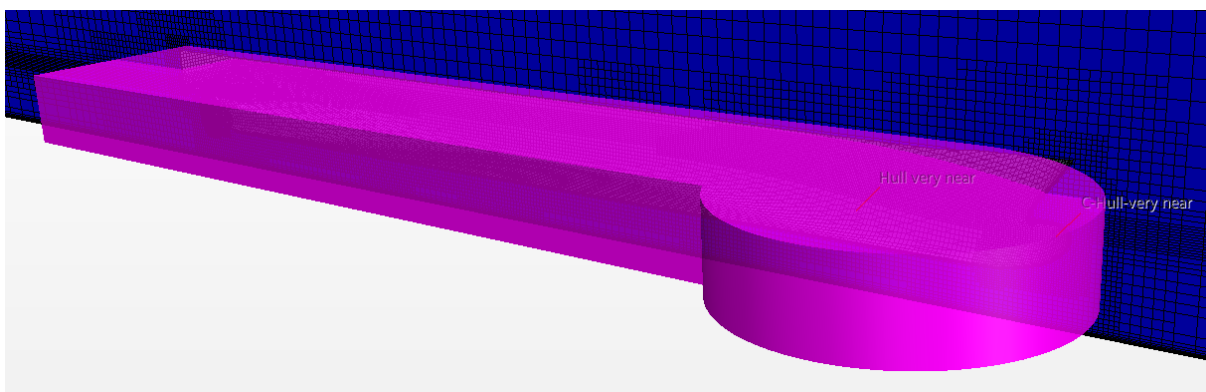
4.4. Volumetrijska profinjenja

Uz navedene postavke graničnog sloja, potrebno je definirati dodatna profinjenja u pojedinim područjima od većeg značaja. Mreža je profinjena u području krme i pramca s obzirom da se u tom području zakrivljenost trupa naglo mijenja. Veličina ćelije unutar definiranog kvadra iznosi 12,5% osnovne veličine ćelije. Na slici 12. prikazana su profinjenja oko krme i pramca.



Slika 12. Profinjenja mreže oko krme i pramca

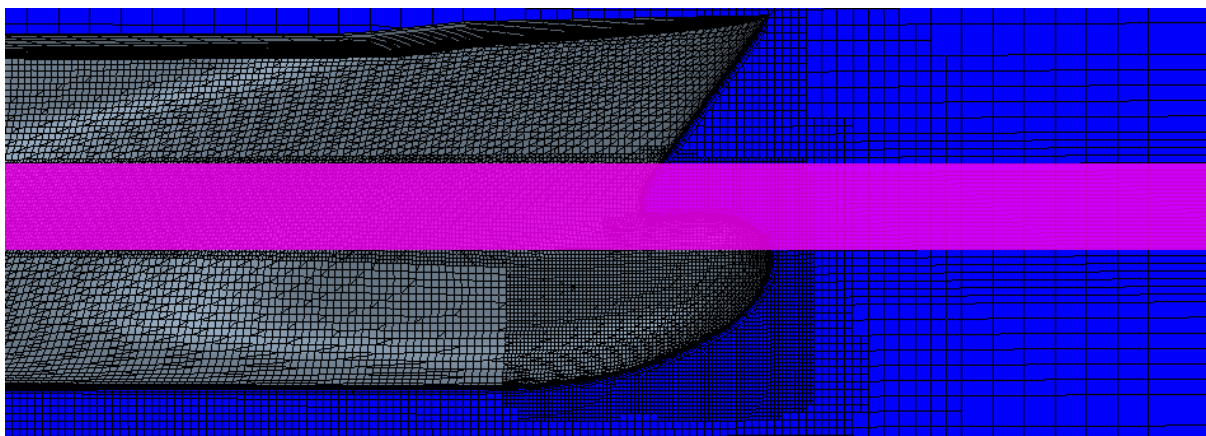
U području oko trupa broda potrebno je također dodatno profiniti mrežu kako bi se obuhvatilo strujanje oko trupa, slika 13.



Slika 13. Profinjenje mreže oko trupa

Kako bi se opisalo strujanje na slobodnoj površini potrebno je definirati profinjenje u području očekivane slobodne površine. Kreirana su tri kvadra odnosno tri volumetrijska profinjenja u kojima se veličina ćelije mijenja u smjeru osi z, imajući na umu preporuku ITTC – a kako je potrebno generirati barem 20 ćelija po visini vala.

Veličina ćelije u profinjenju oko očekivane slobodne površine iznosi 12,5% osnovne veličine ćelije, a profinjenje sadrži 20 ćelija u smjeru osi z što je moguće vidjeti na slici 14.



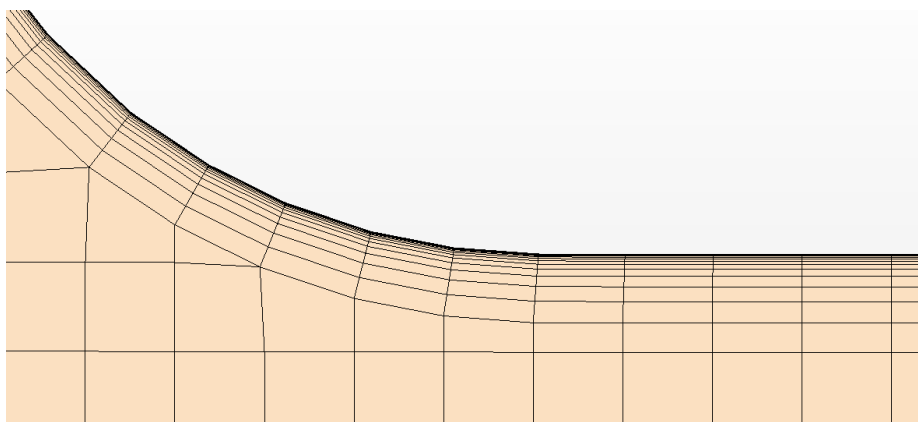
Slika 14. Profinjenje slobodne površine

Kod modela broda u neograničenoj i plitkoj vodi profil brzine nije bilo moguće opisati logaritamski te je granični sloj modeliran tako da vrijedi $y^+ < 1$. Kod broda u naravi korištene su zidne funkcije te je profil brzine opisan logaritamski. Visina prve ćelije graničnog sloja određuje se na temelju Reynoldsovog broja i pretpostavljene vrijednosti y^+ :

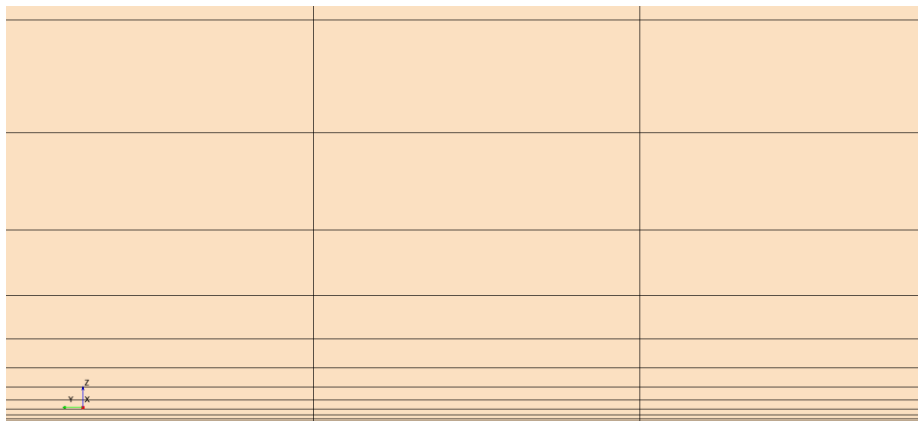
$$y^+ = 0,172 \left(\frac{y}{L} \right) Re^{0,9} \quad (76)$$

gdje je y polovina visine prve ćelije graničnog sloja [32].

Na temelju faktora rastezanja i broja slojeva prizama određuje se debljina graničnog sloja uz definiranu visinu prve ćelije graničnog sloja. Cilj je ostvariti postepeni prijelaz između mreže graničnog sloja i okolne mreže. Granični sloj na dnu u numeričkim simulacijama pokusa otpora u plitkoj vodi modelira se na isti način kao i za trup. Na slici 15. prikazana je diskretizacija graničnog sloja fine mreže za brod u naravi, a na slici 16. prikazan je granični sloj na dnu.



Slika 15. Granični sloj uz trup broda



Slika 16. Granični sloj na dnu

Da bi se što bolje opisala slika valova i Kelvinov kut kreirane su volumetrijske kontrole u obliku cilindra i kvadra, što je moguće primijetiti na slici 11.

4.5. Odabir fizikalnog modela

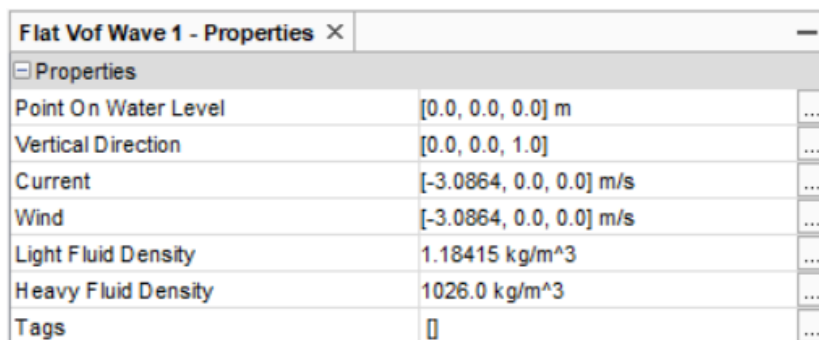
Nakon generiranja mreže sa svim definiranim profinjenjima, slijedi odabir fizikalnog modela pomoću kojeg se opisuje strujanje fluida oko trupa modela broda i broda u naravi.

Najvažniji fizikalni modeli primijenjeni u ovom radu su:

- Eulerov multifazni model (eng. *Eulerian Multiphase*),
- $k - \omega$ SST model turbulencije,
- model VOF valova (eng. *flat VOF waves*),
- metoda udjela fluida u volumenu.

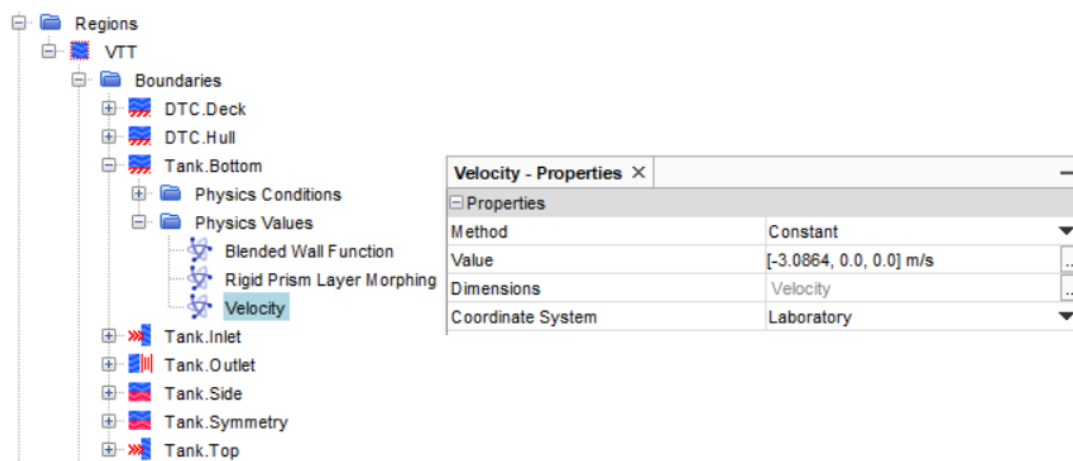
Eulerov multifazni model omogućuje određivanje položaja slobodne površine. Pritom je potrebno definirati odgovarajuće vrijednosti gustoće i dinamičkog koeficijenta viskoznosti za svaku fazu [26]. Numeričke simulacije provedene su za dva Froudeova broja te je u postavkama VOF valova potrebno definirati brzinu strujanja za svaku pojedinu numeričku simulaciju.

Na slici 17. prikazane su postavke VOF valova za brzinu broda u naravi od 6 čv, odnosno $Fn = 0,052$.



Slika 17. Postavke VOF valova za $Fn = 0,052$

U numeričkim simulacijama u plitkoj vodi, potrebno je postaviti i brzinu pomicanja dna s obzirom da brod miruje, a fluid nastrujava, slika 18.



Slika 18. Postavka brzine pomicanja granice dna u numeričkim simulacijama u plitkoj vodi

Kako bi se onemogućila refleksija valova od granica domene definirano je prigušivanje VOF valova (eng. *VOF wave damping*) na ulaznoj, izlaznoj i bočnoj granici domene. Prema preporuci ITTC – a duljina prigušenja VOF valova (eng. *VOF wave damping length*) postavlja se kao jedna duljina broda. Također je potrebno definirati model dinamičke interakcije fluida i tijela (eng. *DFBI – Dynamic Fluid Body Interaction*) pomoću kojeg se određuje dinamička ravnoteža broda na temelju sila koje djeluju na brod pri nastrujavanju fluida. Unutar DFBI modela unosi se težište modela (broda), masa polovine modela (broda), momenti tromosti te stupnjevi slobode gibanja, odnosno poniranje i posrtanje.

4.6. Parametri rješavača

Unutar postavki numeričkih simulacija potrebno je definirati parametre rješavača. Pod opcijom „*Solvers – Implicit Unsteady*“ postavlja se vrijednost vremenskog koraka (eng. *time step*) na temelju perioda koji se definira kao omjer duljine i brzine modela (broda):

$$T = \frac{L_{PP}}{v} \quad (77)$$

U ovom radu je provedena verifikacija vremenskog koraka i gustoće mreže za Froudeov broj $Fn = 0,139$. Grubi vremenski korak (eng. *coarse time step*) definiran je kao $T/50$, srednji vremenski korak (eng. *medium time step*) kao $T/100$ i fini vremenski korak (eng. *fine time step*) kao $T/200$. Za Froudeov broj $Fn = 0,052$ simulacije su provedene s finim vremenskim korakom $T/200$. U tablici 10. prikazani su vremenski koraci za model broda i brod u naravi.

Tablica 10. Vremenski koraci za model broda i brod u naravi pri $Fn = 0,139$

Vremenski korak	Model broda	Brod u naravi
Fini $T/200$	0,0228	0,216
Srednji $T/100$	0,0456	0,432
Grubi $T/50$	0,0912	0,864

Također je potrebno postaviti ukupno fizikalno vrijeme simulacije (eng. *Maximum Physical Time*), koje za $Fn = 0,139$ iznosi 91 sekundu za model broda te 863 sekundi za brod u naravi, a definirano je kao $20T$. Za $Fn = 0,052$ ukupno fizikalno vrijeme iznosi 243 sekunde za model broda te 2300 sekundi za brod u naravi.

Ukoliko numerička simulacija konvergira prije isteka zadanog fizikalnog vremena, moguće je zaustaviti simulaciju i osrednjiti rezultate na temelju posljednjih 20% ukupnog fizikalnog vremena. Za slučaj plitke vode, fizikalno vrijeme je povećano s obzirom da unutar definiranog fizikalnog vremena numeričko rješenje nije konvergiralo.

Kako bi se pospješila konvergencija koriste se podrelaksacijski faktori, koji iznose 0,4 za tlak i 0,7 za brzinu. Maksimalni broj unutarnjih iteracija definiran je kao pet iteracija po vremenskom koraku.

5. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA

U nastavku su dani rezultati provedenih numeričkih simulacija za otpor, uron/izron i trim u neograničenoj i plitkoj vodi za model broda i brod u naravi. Proveden je postupak verifikacije za tri gustoće mreže i tri vremenska koraka te je izračunata ukupna numerička nesigurnost za model broda i brod u naravi u neograničenoj i plitkoj vodi pri $Fn = 0,139$. Također je provedena validacija za dva Froudeova broja za model broda u plitkoj vodi. Rezultati dobiveni numeričkim simulacijama za brod u naravi uspoređeni su s ekstrapoliranim vrijednostima modelskih ispitivanja.

5.1. Verifikacija numeričkih rezultata za model broda u neograničenoj dubini

Kao što je već spomenuto, postupak verifikacije proveden je primjenom tri gustoće mreže s omjerom profinjenja $\sqrt{2}$ i tri različita vremenska koraka s omjerom profinjenja 2. U tablicama 11. i 12. prikazani su dobiveni rezultati verifikacije za gustoću mreže i vremenski korak. Primjenom različite gustoće mreže dobivena je divergencija za ukupni otpor i trim, dok je za uron dobivena monotona konvergencija. Za vremenski korak dobivena je divergencija za ukupni otpor i trim, dok je za uron dobivena oscilatorna konvergencija.

Tablica 11. Rezultati verifikacije dobiveni primjenom različite gustoće mreže za model broda u neograničenoj dubini

	$\hat{S}_{i,3}$	$\hat{S}_{i,2}$	$\hat{S}_{i,1}$	R_i	U_i	$\bar{U}_G, \%$
Ukupni otpor, N	4,02	4,084	4,216	2,0625	0,196	4,65
Uron, mm	0,2276	0,3176	0,4025	0,943	-1,767	438,92
Trim, °	0,01973	0,01923	0,01598	6,5	0,00375	23,47

Tablica 12. Rezultati verifikacije dobiveni primjenom različitog vremenskog koraka za model broda u neograničenoj dubini

	$\hat{S}_{i,3}$	$\hat{S}_{i,2}$	$\hat{S}_{i,1}$	R_i	U_i	$\bar{U}_T, \%$
Ukupni otpor, N	4,412	4,346	4,216	1,97	0,196	4,65
Uron, mm	0,3942	0,4351	0,4025	-0,797	0,0204	5,08
Trim, °	0,01519	0,01506	0,01598	-7,077	0,00092	5,74

Ukupna nesigurnost rezultata numeričke simulacije određuje se prema jednadžbi (73) te je prikazana u tablici 13.

Tablica 13. Ukupna nesigurnost rezultata numeričke simulacije za model broda u neograničenoj dubini

	$\bar{U}_G$ %	$\bar{U}_T$ %	$\bar{U}_{SN}$ %
Ukupni otpor, N	4,65	4,65	6,58
Uron, mm	438,92	5,08	438,95
Trim, °	23,47	5,74	24,16

Iz tablice 13. jasno je vidljivo da je dobivena prihvatljiva numerička nesigurnost za ukupni otpor, dok je za trim i uron dobivena izrazito velika numerička nesigurnost. Važno je napomenuti kako su dobivene numeričke vrijednosti urona i trima izrazito male što dodatno utječe na nesigurnost rezultata.

5.2. Verifikacija numeričkih rezultata za model broda u plitkoj vodi

U tablicama 14. i 15. prikazani su rezultati verifikacije za model broda u plitkoj vodi. Primjenom različite gustoće mreže dobivena je divergencija za ukupni otpor, uron i trim, dok je primjenom različitog vremenskog koraka dobivena divergencija za ukupni otpor i uron, a oscilatorna konvergencija za trim.

Tablica 14. Rezultati verifikacije dobiveni primjenom različite gustoće mreže za model broda u plitkoj vodi

	$\hat{S}_{i,3}$	$\hat{S}_{i,2}$	$\hat{S}_{i,1}$	R_i	U_i	$\bar{U}_G$, %
Ukupni otpor, N	4,616	4,604	4,71	-8,833	0,094	2,25
Uron, mm	-3,45	-3,39	-3,57	-3	0,18	5,04
Trim, °	0,0381	0,03863	0,03566	-5,5	0,00297	8,31

Tablica 15. Rezultati verifikacije dobiveni primjenom različitog vremenskog koraka za model broda u plitkoj vodi

	$\hat{S}_{i,3}$	$\hat{S}_{i,2}$	$\hat{S}_{i,1}$	R_i	U_i	$\bar{U}_T$, %
Ukupni otpor, N	4,814	4,834	4,71	-6,2	0,124	2,63
Uron, mm	-3,548	-3,54	-3,57	-6,5	0,026	0,728
Trim, °	0,0361	0,03498	0,03566	-0,607	0,00056	1,57

Ukupna nesigurnost rezultata numeričke simulacije za model broda u plitkoj vodi prikazana je u tablici 16.

Tablica 16. Ukupna nesigurnost rezultata numeričke simulacije za model broda u plitkoj vodi

	$\bar{U}_G$ %	$\bar{U}_T$ %	$\bar{U}_{SN}$ %
Ukupni otpor, N	2,25	2,63	3,46
Uron, mm	5,04	0,728	5,092
Trim, °	8,31	1,57	8,46

Iz tablice 16. vidljivo je da je za sva tri slučaja dobivena prihvatljiva numerička nesigurnost. U odnosu na ukupni otpor, nešto veća numerička nesigurnost dobivena je za uron i trim što je očekivano jer se radi o vrlo malim vrijednostima.

5.3. Verifikacija numeričkih rezultata za brod u naravi u neograničenoj dubini

U tablicama 17. i 18. prikazani su rezultati verifikacije za brod u naravi u neograničenoj dubini. Primjenom različite gustoće mreže dobivena je oscilatorna konvergencija za ukupni otpor, dok je za uron i trim dobivena divergencija. Primjenom različitog vremenskog koraka dobivena je divergencija za ukupni otpor, dok je za uron i trim dobivena oscilatorna konvergencija.

Tablica 17. Rezultati verifikacije dobiveni primjenom različite gustoće mreže za brod u naravi u neograničenoj dubini

	$\hat{S}_{i,3}$	$\hat{S}_{i,2}$	$\hat{S}_{i,1}$	R_i	U_i	$\bar{U}_G$ %
Ukupni otpor, kN	1582,6	1538,4	1543,8	-0,1237	22,117	1,43
Uron, m	0,2186	0,2212	0,2279	2,578	0,0093	4,08
Trim, °	0,00127	0,00131	-0,00199	-82,5	0,00326	163,819

Tablica 18. Rezultati verifikacije dobiveni primjenom različitog vremenskog koraka za brod u naravi u neograničenoj dubini

	$\hat{S}_{i,3}$	$\hat{S}_{i,2}$	$\hat{S}_{i,1}$	R_i	U_i	$\bar{U}_T$ %
Ukupni otpor, kN	1515,8	1524,7	1543,8	2,14	28	1,81
Uron, m	0,2149	0,2297	0,2279	-0,1216	0,0074	3,25
Trim, °	-0,00067	-0,00207	-0,00199	-0,0565	0,0007	33,76

Ukupna nesigurnost rezultata numeričke simulacije za neograničenu dubinu prikazana je u tablici 19. Moguće je uočiti da je dobivena prihvatljiva ukupna numerička nesigurnost za ukupni otpor i uron, dok je za trim numerička nesigurnost izraženija.

Tablica 19. Ukupna nesigurnost rezultata numeričke simulacije za brod u naravi u neograničenoj dubini

	$\bar{U}_G$ %	$\bar{U}_T$ %	$\bar{U}_{SN}$ %
Ukupni otpor, kN	1,43	1,81	2,31
Uron, m	4,08	3,25	5,22
Trim, °	163,819	33,76	167,26

5.4. Verifikacija numeričkih rezultata za brod u naravi u plitkoj vodi

U tablicama 20. i 21. prikazani su rezultati verifikacije za brod u naravi u plitkoj vodi. Primjenom različite gustoće mreže dobivena je oscilatorna konvergencija za ukupni otpor i trim, dok je za uron dobivena divergencija. Primjenom različitog vremenskog koraka dobivena je divergencija za sve tri fizikalne veličine.

Tablica 20. Rezultati verifikacije dobiveni primjenom različite gustoće mreže za brod u naravi u plitkoj vodi

	$\hat{S}_{i,3}$	$\hat{S}_{i,2}$	$\hat{S}_{i,1}$	R_i	U_i	$\bar{U}_G$, %
Ukupni otpor, kN	1699,4	1590,17	1620,23	-0,275	54,615	3,37
Uron, m	-0,12383	-0,12163	-0,13987	-8,29	0,01824	13,04
Trim, °	0,021906	0,025279	0,02521	-0,0205	0,00169	6,69

Tablica 21. Rezultati verifikacije dobiveni primjenom različitog vremenskog koraka za brod u naravi u plitkoj vodi

	$\hat{S}_{i,3}$	$\hat{S}_{i,2}$	$\hat{S}_{i,1}$	R_i	U_i	$\bar{U}_T$, %
Ukupni otpor, kN	1191,61	1390,9	1620,23	1,15	428,62	26,45
Uron, m	-0,12568	-0,11778	-0,13987	-2,8	0,0221	15,79
Trim, °	0,03557	0,03078	0,02521	1,16	0,0104	41,1

Tablica 22. Ukupna nesigurnost rezultata numeričke simulacije za brod u naravi u plitkoj vodi

	$\bar{U}_G$ %	$\bar{U}_T$ %	$\bar{U}_{SN}$ %
Ukupni otpor, kN	3,37	26,45	26,66
Uron, m	13,04	15,79	20,48
Trim, °	6,69	41,1	41,64

Iz tablica 20. i 21. vidljivo je da je dobivena veća numerička nesigurnost rezultata primjenom različitog vremenskog koraka u odnosu na gustoću mreže. Ukupna nesigurnost rezultata

numeričke simulacije za brod u naravi u plitkoj vodi prikazana je u tablici 22. te je moguće uočiti da je ukupna numerička nesigurnost za sve tri fizikalne veličine dosta izražena.

5.5. Validacija i usporedba rezultata

U nastavku je dan prikaz rezultata dobivenih numeričkim simulacijama primjenom fine mreže i najfinijeg vremenskog koraka. Eksperimentalni podaci dostupni su za model broda u plitkoj vodi za dva Froudeova broja. Za model broda i brod u naravi u neograničenoj dubini numerički rezultati ekstrapolirani su metodom ITTC 1957 prema dostupnim podacima za model broda u mjerilu 1:100 [30]. Također su uspoređeni rezultati ukupnog otpora u neograničenoj i plitkoj vodi za model broda i brod u naravi.

5.5.1. Validacija rezultata za model broda u plitkoj vodi

U tablici 23. dan je prikaz numeričkih rezultata za model broda u plitkoj vodi, dobivenih primjenom fine mreže i finog vremenskog koraka za $Fn = 0,139$. Rezultati su uspoređeni s dostupnim rezultatima modelskih ispitivanja [30], tablica 24.

Tablica 23. Ukupni otpor, uron i trim dobiveni primjenom fine mreže i finog vremenskog koraka pri $Fn = 0,139$

Ukupni otpor, N	Uron, mm	Trim, °
4,71	-3,57	0,03566

Tablica 24. Rezultati modelskih ispitivanja u plitkoj vodi pri $Fn = 0,139$

Ukupni otpor, N	Uron, mm	Trim, °
5,51	-6,435	0,0482

U tablici 25. prikazana su relativne devijacije za ukupni otpor, uron i trim pri $Fn = 0,139$. Relativna devijacija izračunata je prema izrazu (64). Za ukupni otpor je dobivena relativna devijacija od -14,51%, dok su za trim i uron dobivene značajne relativne devijacije. Potencijalni uzrok ovako velikih odstupanja su vrlo male izmjerene vrijednosti.

Tablica 25. Relativna devijacija rezultata za model broda u plitkoj vodi pri $Fn = 0,139$

	Ukupni otpor, N	Uron, mm	Trim, °
RD, %	-14,51	-44,52	-26

U tablicama 26. – 28. prikazani su numerički i eksperimentalni rezultati te relativna devijacija za Froudeov broj $Fn = 0,052$. Prikazani su rezultati dobiveni numeričkim simulacijama za dubinu ispod kobilice jednaku 100% gaza pri brzini od 0,327 m/s što odgovara Froudeovom broju $Fn = 0,052$. Kao i za slučaj većeg Fn moguće je uočiti izraženije relativne devijacije.

Tablica 26. Ukupni otpor, uron i trim dobiveni primjenom fine mreže i finog vremenskog koraka pri $Fn = 0,052$

Ukupni otpor , N	Uron, mm	Trim, °
0,7	-0,651	0,00256

Tablica 27. Rezultati modelskih ispitivanja u plitkoj vodi pri $Fn = 0,052$

Ukupni otpor , N	Uron, mm	Trim, °
0,81	-0,73	0,004304

Tablica 28. Relativna devijacija rezultata za model broda u plitkoj vodi pri $Fn = 0,052$

	Ukupni otpor, N	Uron	Trim
<i>RD</i> ,%	-13,58	-10,82	-40,5

5.5.2. Validacija rezultata numeričkih simulacija u neograničenoj dubini

Ukupni otpor određen numeričkim simulacijama za model broda i brod u naravi uspoređen je s eksperimentalnim podacima ekstrapoliranim metodom ITTC 1957 [33].

U tablici 29. prikazana je relativna devijacija ukupnog otpora za model broda i brod u naravi u neograničenoj dubini pri $Fn = 0,139$. Iz tablice je vidljivo kako je dobivena relativna devijacija za model broda veća od one za brod u naravi.

Tablica 29. Relativna devijacija ukupnog otpora za model broda i brod u neograničenoj dubini pri $Fn = 0,139$

	Ukupni otpor, N		<i>RD</i> ,%
	STAR – CCM+	Ekstrapolirani rezultati	
Model broda	4,216	4,74	-11,05%
Brod u naravi	1543,8	1645,32	-6,17%

5.5.3. Usporedba ukupnog otpora modela broda i broda u naravi u neograničenoj i plitkoj vodi

Prilikom plovidbe u plitkoj vodi dolazi do povećanja ukupnog otpora. U tablici 30. prikazani su rezultati ukupnog otpora za model broda u neograničenoj i plitkoj vodi dobiveni primjenom

fine mreže i finog vremenskog koraka te postotno povećanje otpora. Pri brzini modela koja odgovara 16 čv za brod u naravi, odnosno Froudeovom broju $Fn = 0,139$ dobiveno je postotno povećanje od 11,7%, dok je za $Fn = 0,052$ dobiveno postotno povećanje od 3,7%. U tablici 31. prikazano je postotno povećanje ukupnog otpora za brod u naravi pri istim Froudeovim brojevima.

Tablica 30. Postotno povećanje ukupnog otpora modela broda u plitkoj vodi

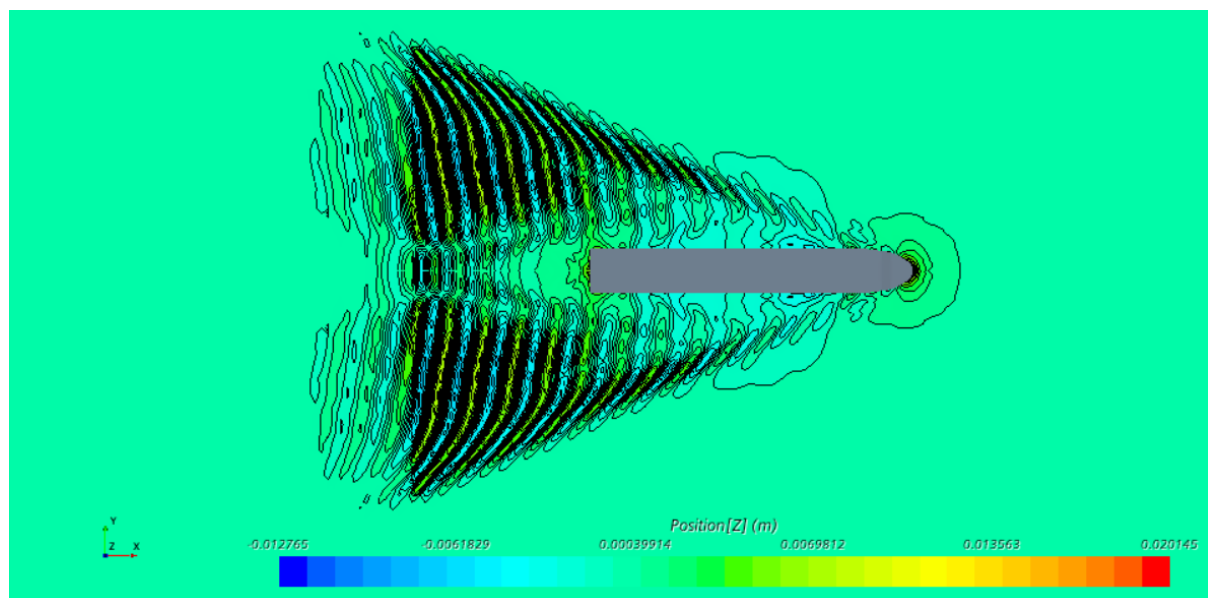
Froudeov broj Fn	Ukupni otpor, N		Postotna razlika
	Neograničena dubina	Plitka voda	
0,139	4,216 N	4,71 N	11,7%
0,052	0,675	0,7	3,7%

Tablica 31. Postotno povećanje ukupnog otpora broda u naravi u plitkoj vodi

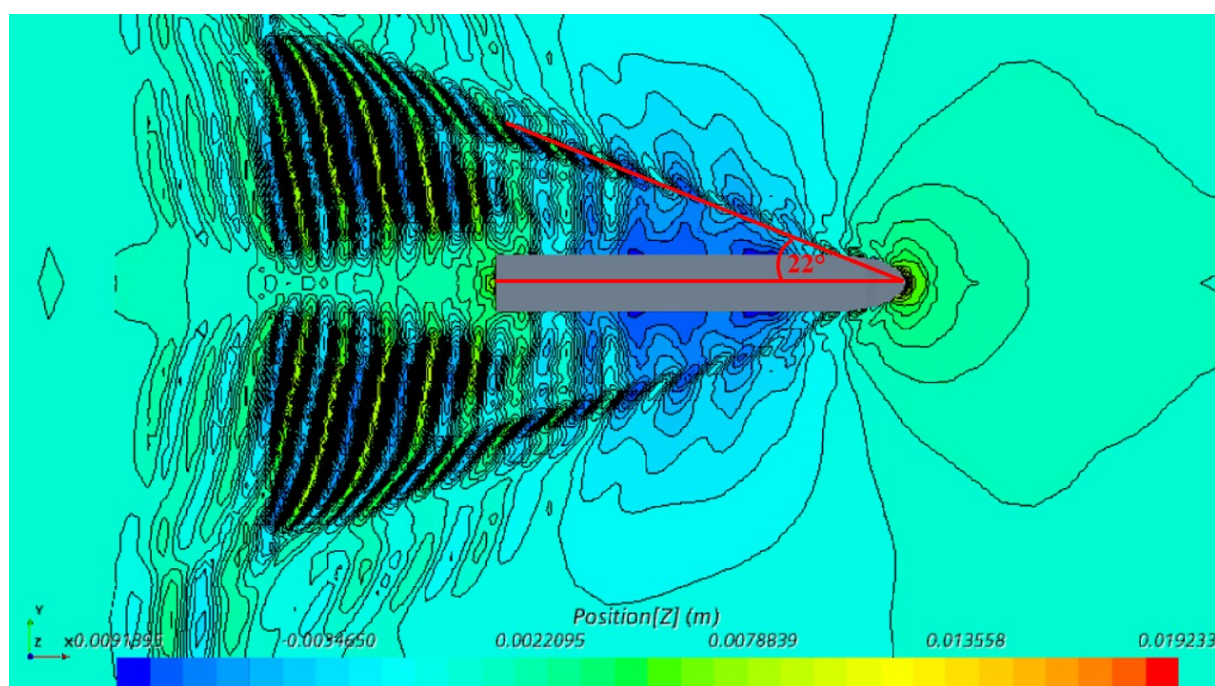
Froudeov broj Fn	Ukupni otpor, N		Postotna razlika
	Neograničena dubina	Plitka voda	
0,139	1543,8 N	1620,23 N	4,9%
0,052	228,583 N	237,95 N	4,1 %

5.6. Grafički prikaz rezultata

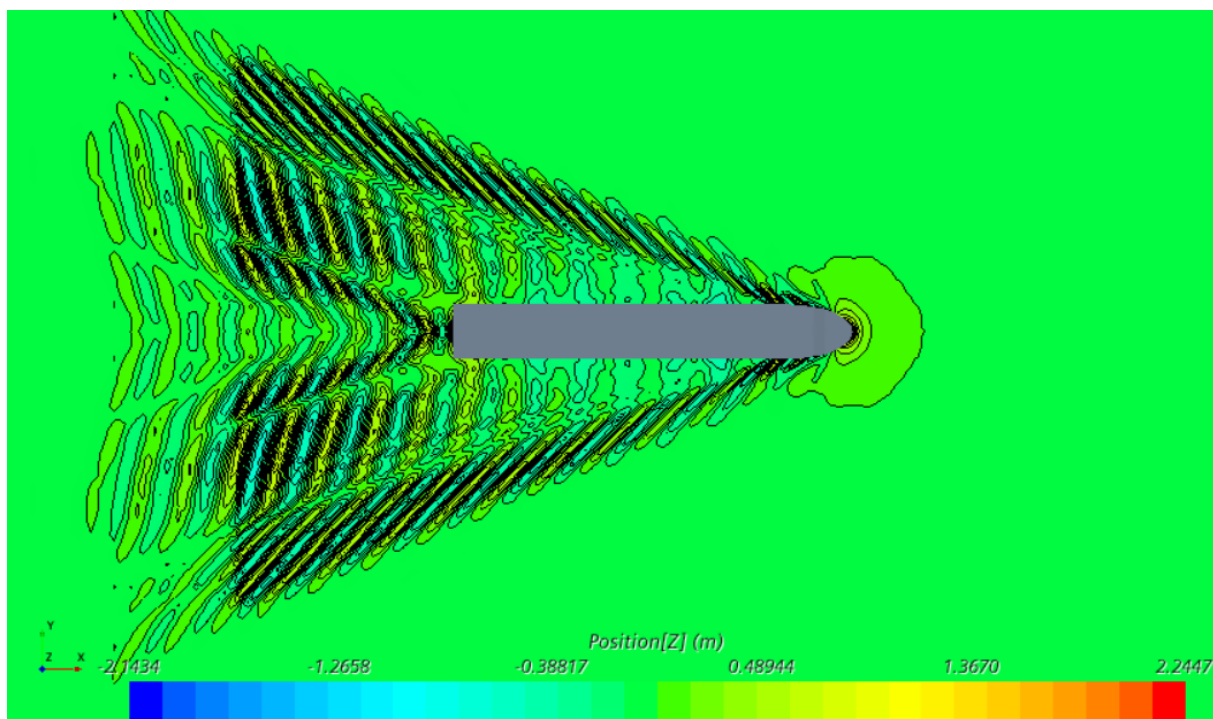
Na slikama 19. i 20. prikazane su dobivene slike valova za slučaj neograničene i plitke vode za model broda pri brzini od 0,872 m/s, odnosno $Fn = 0,139$. Na obje slike je vidljiv sustav poprečnih i razilaznih valova. Na slici 20. vidljivo je da je za slučaj plitke vode kut između razilaznih valova i simetrale broda veći od Kelvinovog kuta. Kao što je navedeno u poglavlju 2.3. pri brzinama $v \leq 0,4\sqrt{gh}$ razilazni valovi zatvaraju sa simetralom broda Kelvinov kut koji iznosi $19^\circ 28'$. Kako je dubina vode ispod kobilice jednaka 100% gaza, odnosno 0,163 m slijedi da je brzina modela broda veća od vrijednosti $0,4\sqrt{gh}$, a kut kojeg razilazni valovi zatvaraju sa simetralnom ravninom broda veći od Kelvinovog kuta. Slično je uočeno i za numeričke simulacije broda u naravi. Na slici 21. i 22. prikazane su slike valova za brod u neograničenoj i plitkoj vodi.



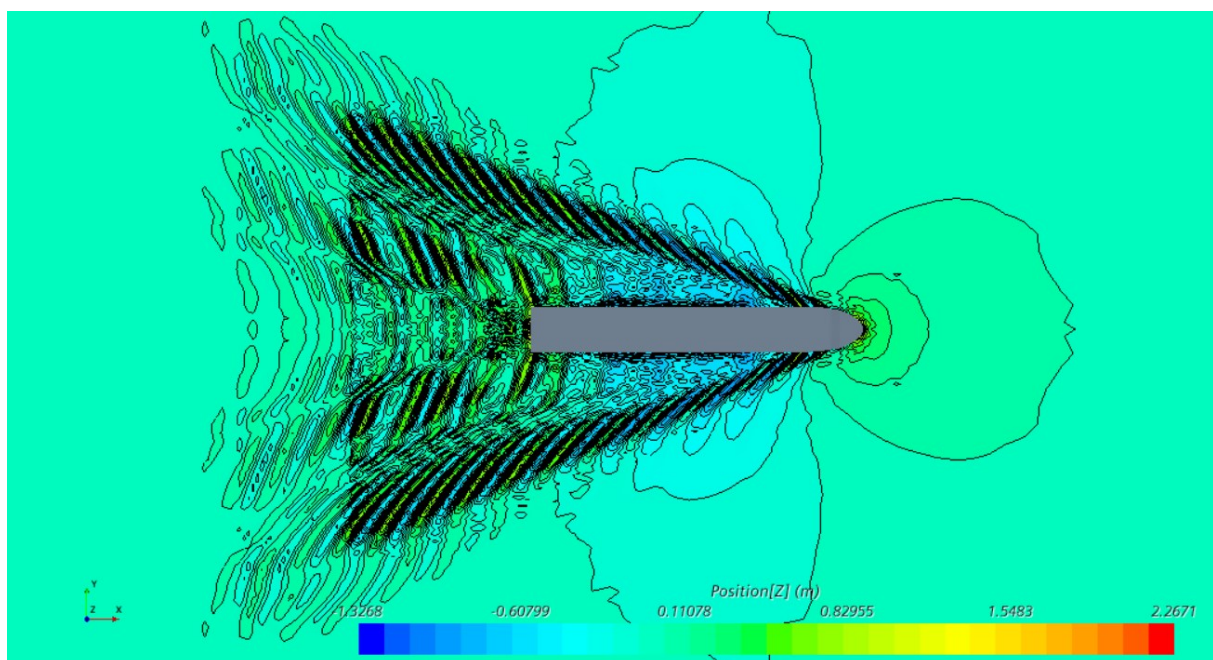
Slika 19. Slika valova oko modela broda u neograničenoj dubini za $Fn = 0,139$



Slika 20. Slika valova oko modela broda u plitkoj vodi za $Fn = 0,139$

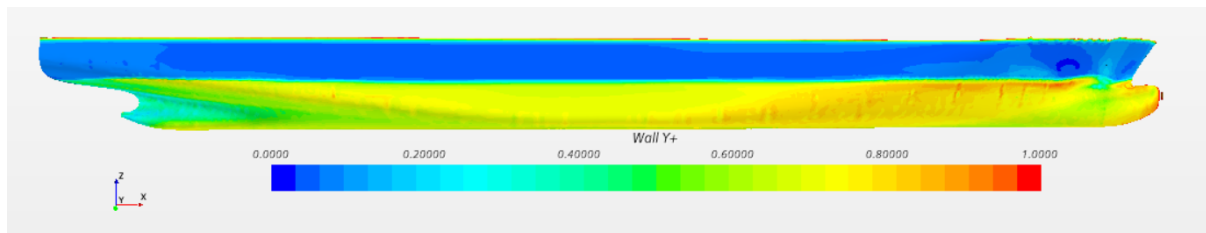


Slika 21. Slika valova oko broda u naravi u neograničenoj dubini za $Fn = 0,139$

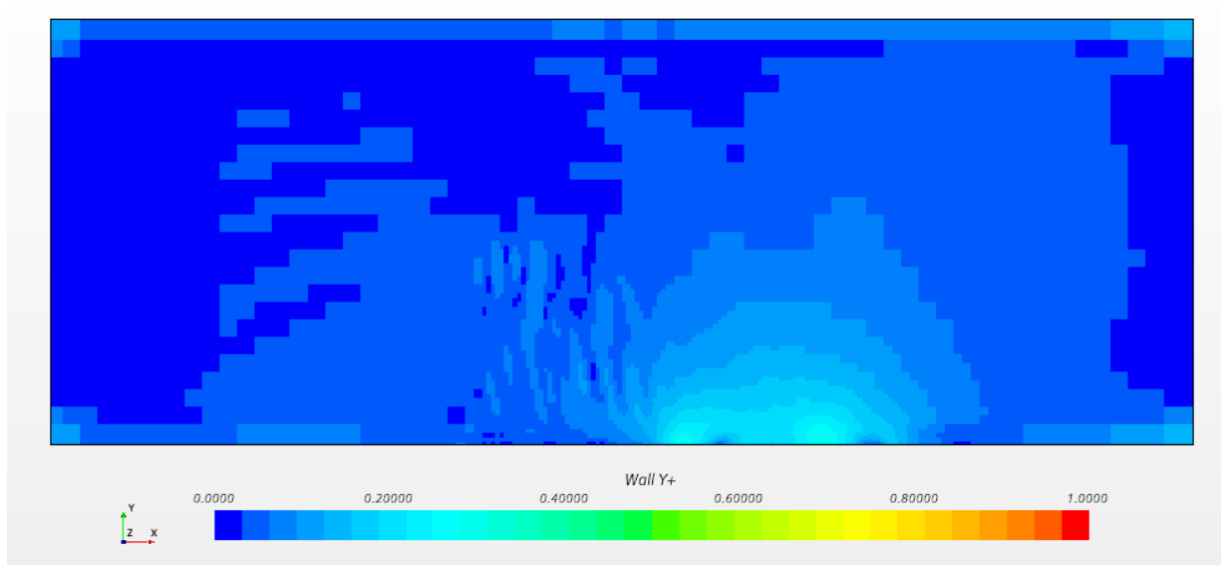


Slika 22. Slika valova oko broda u naravi u plitkoj vodi za $Fn = 0,139$

Prilikom provođenja numeričkih simulacija bitno je zadovoljiti parametar y^+ , koji je za model broda manji od 1. Na slikama 23. i 24. prikazana je raspodjela parametra y^+ po trupu odnosno na dnu u plitkoj vodi te je vidljivo da je vrijednost y^+ manja od 1.

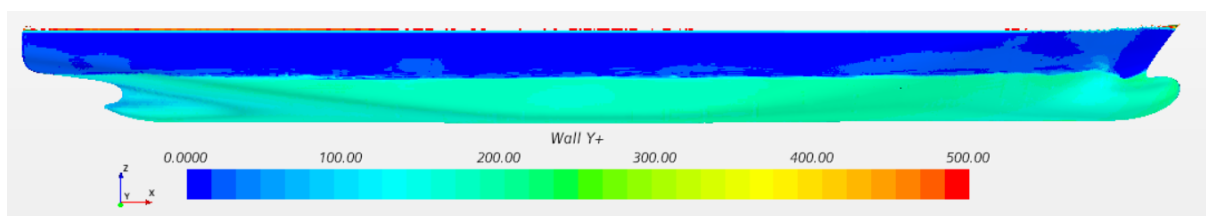


Slika 23. Raspodjela parametra y^+ na trupu modela broda u plitkoj vodi



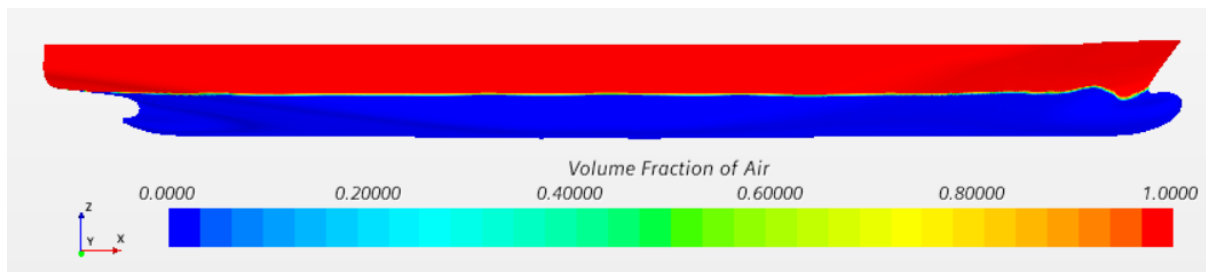
Slika 24. Raspodjela parametra y^+ na dnu proračunske domene za plitku vodu

U numeričkim simulacijama strujanja oko broda u naravi primijenjene su već spomenute zidne funkcije, a vrijednost y^+ veća je od 30. Na slici 25. prikazana je vrijednost parametra y^+ za brod u naravi u plitkoj vodi. Na slici je vidljivo da se vrijednost parametra y^+ duž trupa broda kreće između 150 i 200, dok je u području krme nešto niža.

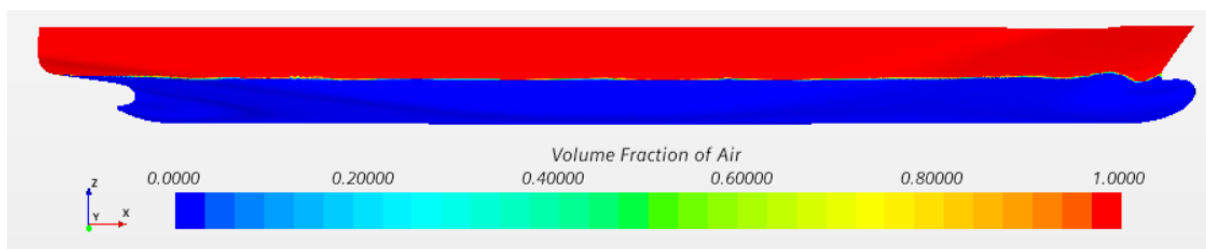


Slika 25. Raspodjela parametra y^+ na trupu broda u naravi u plitkoj vodi

Na slikama 26. i 27. dani su prikazi slobodnih površina uzduž modela broda i broda u naravi određeni na temelju volumnog udjela zraka u ćeliji. Ukoliko je vrijednost volumnog udjela zraka u ćeliji jednaka 1 volumen ispunjava zrak, a kada je vrijednost jednaka 0 volumen je ispunjen vodom. Na pramčanom dijelu moguće je primijetiti stvaranje valnog brijega i dola.



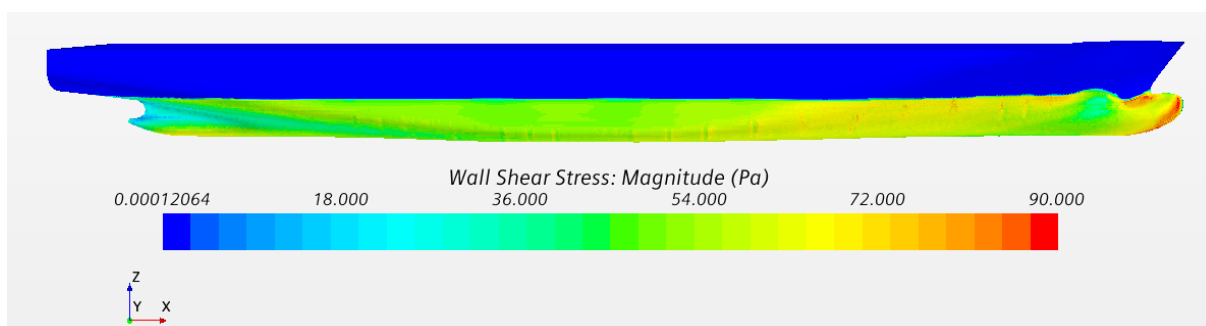
Slika 26. Slobodna površina duž trupa broda u naravi u neograničenoj dubini



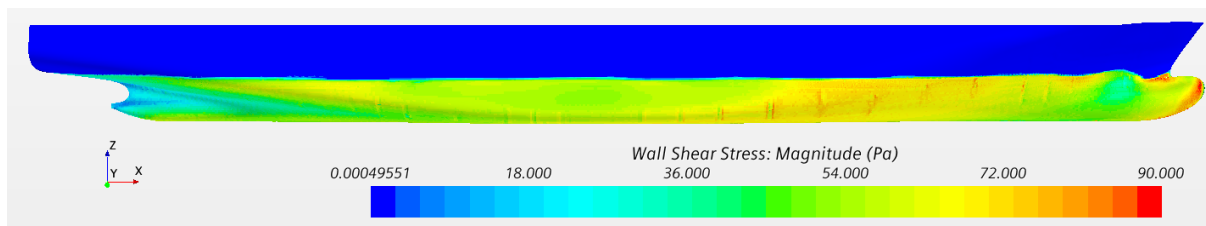
Slika 27. Slobodna površina duž trupa broda u naravi u plitkoj vodi

5.7. Tangencijalna naprezanja i hidrodinamički tlak

Ograničenje dubine odnosno plovidba u plitkoj vodi dovodi do povećanja ukupnog otpora. Točnije, dolazi do porasta tangencijalnih naprezanja po oplakanoj površini broda te samim time i do povećanja otpora trenja. Porastom otpora trenja, raste i ukupni otpor broda. Na slikama 28. i 29. prikazan je raspored tangencijalnih naprezanja na brodu u naravi za slučaj neograničene i plitke vode. Također se može primijetiti da su tangencijalna naprezanja najveća na bulbu broda.



Slika 28. Tangencijalna naprezanja po trupu broda u naravi u neograničenoj dubini

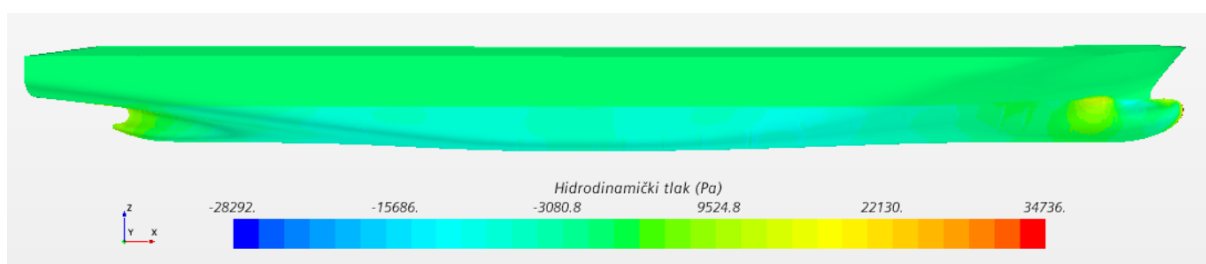


Slika 29. Tangencijalna naprežanja po trupu broda u naravi u plitkoj vodi

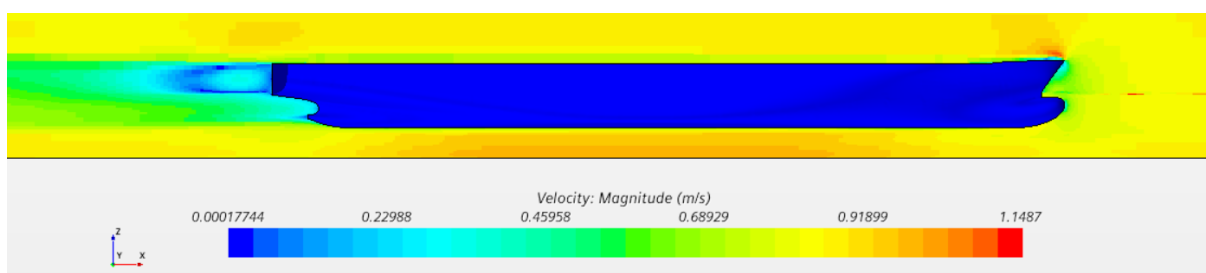
Na slikama 30. i 31. prikazana je raspodjela hidrodinamičkog tlaka po trupu broda u naravi u neograničenoj i plitkoj vodi. Za slučaj plitke vode, vidljiv je pad tlaka na središnjem dijelu trupa broda, što je uzrokovano povećanjem brzine strujanja između dna broda i dna plovnog puta. Na slikama 32. i 33. prikazana su polja brzina na simetralnoj ravnini za model broda i brod u naravi u plitkoj vodi. Vidljivo je povećanje brzine strujanja između trupa broda i dna proračunske domene što uzrokuje pad tlaka, a često rezultira paralelnim uronom, povećanjem otpora i trima.



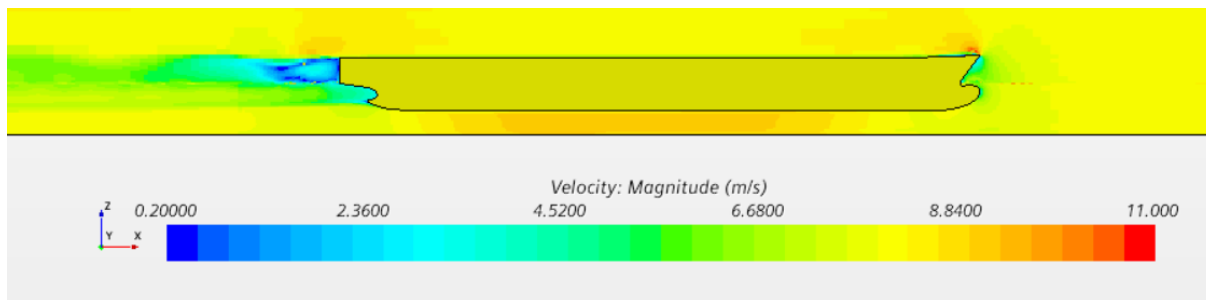
Slika 30. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka po trupu broda u naravi u neograničenoj dubini



Slika 31. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka po trupu broda u naravi u plitkoj vodi



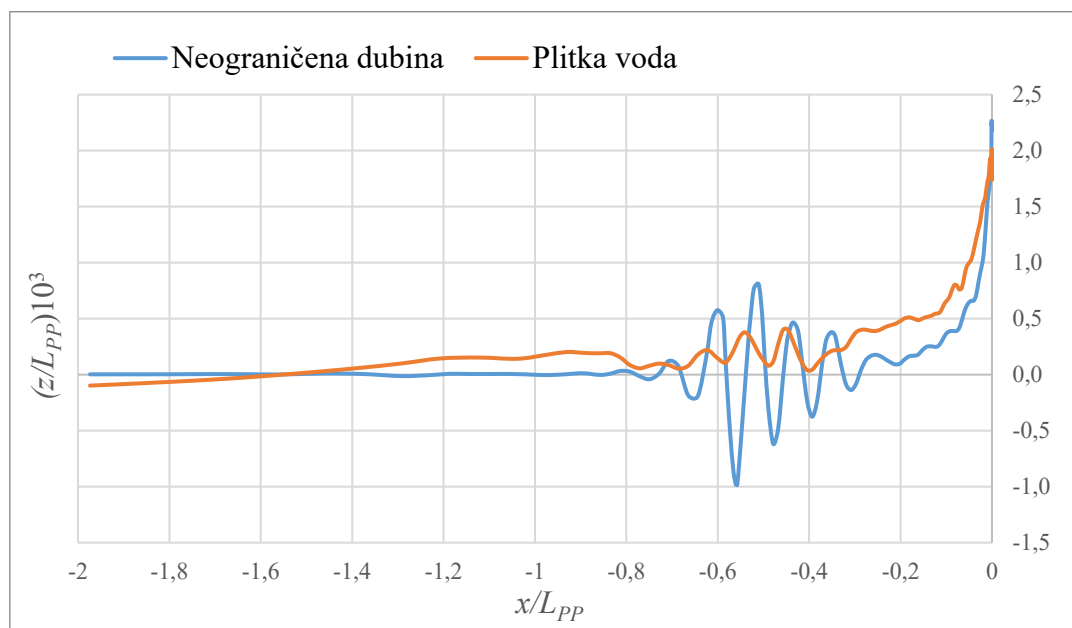
Slika 32. Polje brzine na simetralnoj ravnini modela broda u plitkoj vodi



Slika 33. Polje brzine na simetralnoj ravnini broda u naravi u plitkoj vodi

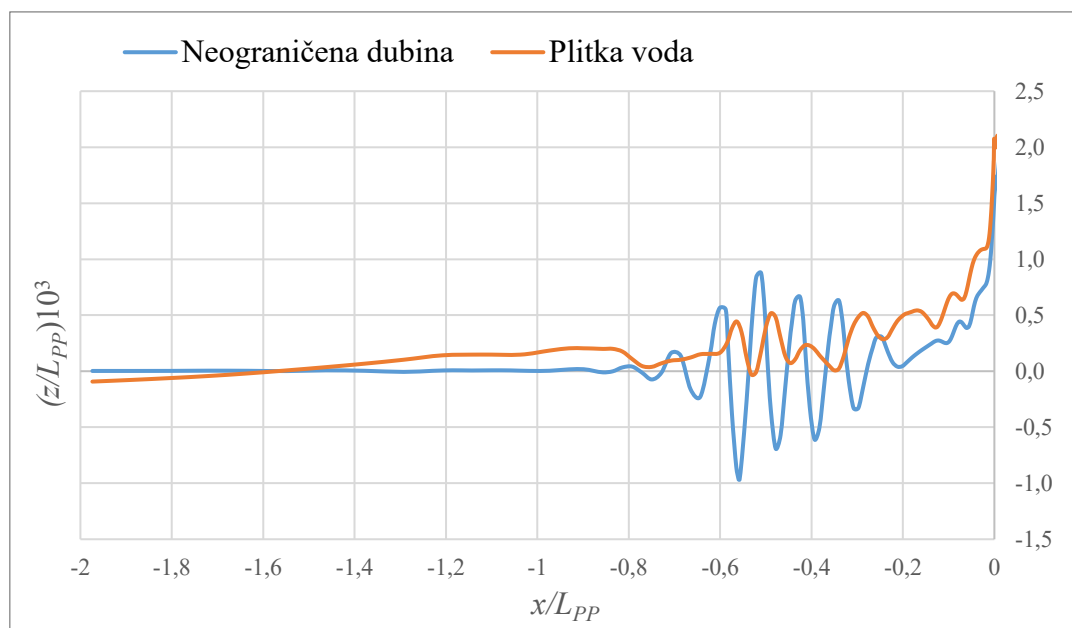
5.8. Valne elevacije

Valne elevacije iza krme broda uspoređene su za model broda i brod u naravi u neograničenoj dubini i plitkoj vodi na tri uzdužna presjeka. Prvi presjek nalazi se na simetralnoj ravnini, drugi se nalazi između simetralne ravnine i polovine širine modela (broda), a treći presjek na polovini širine modela (broda). Na slici 34. prikazane su valne elevacije iza modela broda u neograničenoj dubini i plitkoj vodi na simetralnoj ravnini $y = 0$. Moguće je uočiti kako su valne elevacije neposredno iza krme broda u plitkoj vodi veće od onih u neograničenoj dubini.

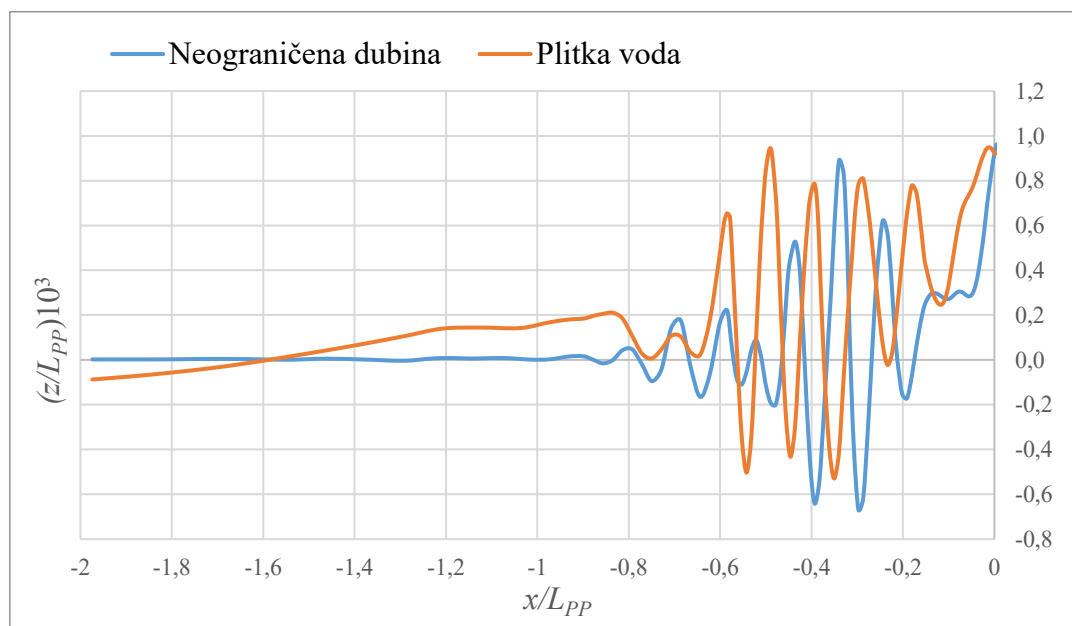


Slika 34. Valne elevacije iza modela broda u neograničenoj i plitkoj vodi na simetralnoj ravnini $y = 0$

Na slikama 35. i 36. prikazane su valne elevacije iza modela broda u neograničenoj i plitkoj vodi u ravninama $y = 0,145$ m i $y = 0,29$ m.



Slika 35. Valne elevacije iza modela broda u neograničenoj i plitkoj vodi na $y = 0,145$ m



Slika 36. Valne elevacije iza modela broda u neograničenoj i plitkoj vodi na $y = 0,29$ m

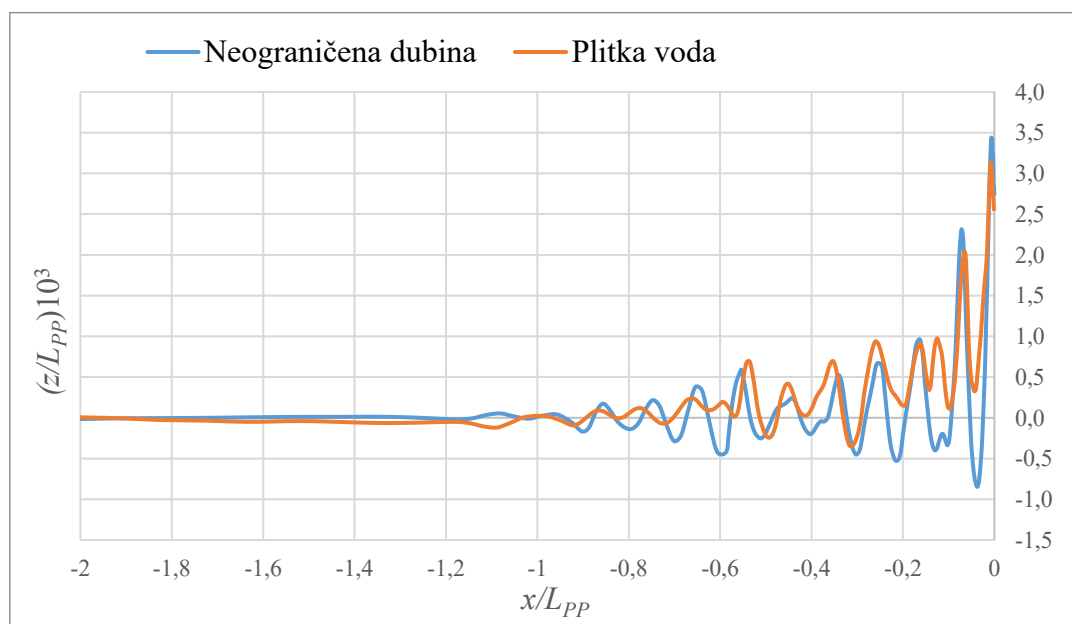
Valne elevacije u neograničenoj dubini veće su od valnih elevacija u plitkoj vodi u ravlini $y = 0,145$ m, dok su na $y = 0,29$ m valne elevacije u plitkoj vodi veće od valnih elevacija u neograničenoj dubini.

Na slici 37. prikazane su valne elevacije u neograničenoj i plitkoj vodi u ravlini $y = 0,29$ m duž trupa modela broda. Vidljivo je kako su valne elevacije u plitkoj vodi veće od onih u neograničenoj dubini.

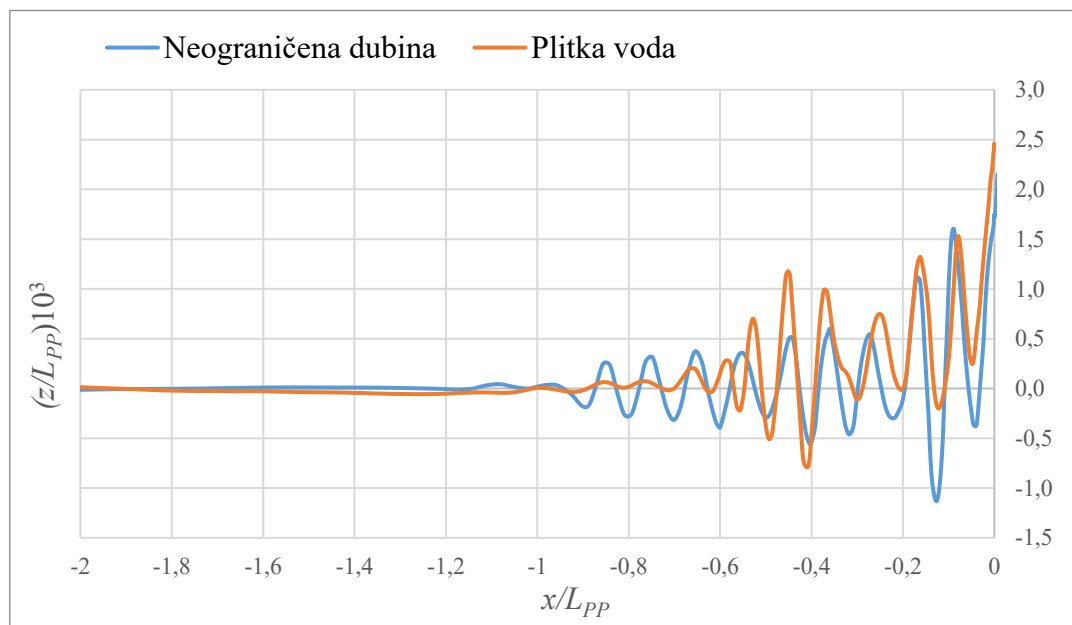


Slika 37. Valne elevacije u neograničenoj i plitkoj vodi na $y = 0,29$ m duž trupa modela broda

Na slikama 38. – 40. prikazana je usporedba valnih elevacija iza krme broda u naravi u neograničenoj i plitkoj vodi na presjecima koji odgovaraju onima za slučaj modela broda. Prvi presjek nalazi se na simetralnoj ravni broda, drugi na $y = 13$ m, a treći na $y = 25,5$ m.



Slika 38. Valne elevacije iza broda u naravi u neograničenoj i plitkoj vodi na $y = 0$



Slika 39. Valne elevacije iza broda u naravi u neograničenoj i plitkoj vodi na $y = 13$ m



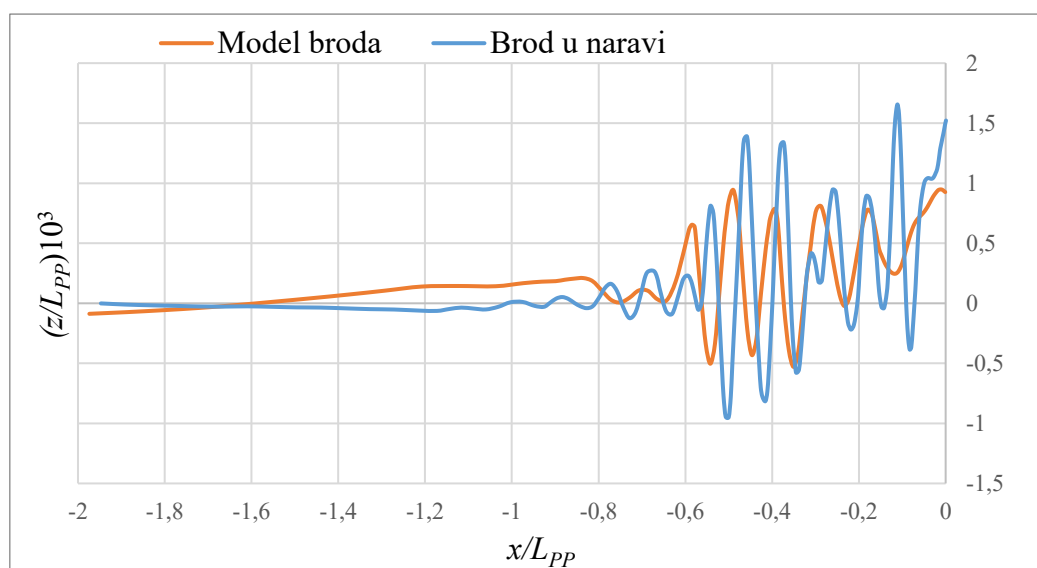
Slika 40. Valne elevacije iza broda u naravi u neograničenoj i plitkoj vodi na $y = 25,5$ m

Na slici 41. prikazane su valne elevacije duž trupa broda na $y = 25,5$ m te je moguće uočiti značajnu razliku u neograničenoj i plitkoj vodi pogotovo u području trupa broda.



Slika 41. Valne elevacije za slučaj neograničene i plitke vode na $y = 25,5$ m duž trupa broda u naravi

Na slici 42. prikazana je usporedba valnih elevacija odnosno utjecaj mjerila na valne elevacije na polovini širine modela broda i broda u naravi. Na slici je vidljivo da se valne elevacije znatno razlikuju i da mjerilo utječe na sliku valova. Vidljivo je kako su valne elevacije iza broda u naravi veće u odnosu na valne elevacije iza modela broda. Zeng et al. [3] također su ispitivali utjecaj mjerila te su dokazali utjecaj plitke vode na otpor valova modela broda i broda u naravi. Zaključili su da bi se povećanjem Reynoldsovog broja, odnosno ispitivanjem većeg modela smanjio utjecaj mjerila na otpor valova, a samim time i na ukupni otpor broda.



Slika 42. Utjecaj mjerila na valne elevacije

6. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu provedeno je numeričko istraživanje utjecaja plitke vode na ukupni otpor modela broda i broda u naravi. Provedene su numeričke simulacije pokusa otpora DTC modela broda i broda u naravi u neograničenoj i plitkoj vodi za dubinu ispod kobilice jednaku 100% gaza pri dva Froudeova broja. U radu je dana teorijska podloga računalne dinamike fluida te je prikazan primijenjeni matematički model temeljen na Reynoldsovim osrednjenim Navier – Stokesovim jednadžbama. Korišten je $k - \omega$ SST model turbulencije i metoda udjela fluida u volumenu (VOF). Dan je pregled dosadašnjih istraživanja vezanih uz provedbu numeričkih simulacija u plitkoj vodi na mjerilu modela i broda u naravi. Za dobivene numeričke rezultate otpora, urona/izrona te trima proveden je postupak verifikacije i validacije. U numeričkim simulacijama strujanja oko modela broda u neograničenoj dubini dobivena je ukupna numerička nesigurnost od 6,58% za ukupni otpor te nešto veća numerička nesigurnost za uron/izron i trim. Za model broda u plitkoj vodi dobivena je ukupna numerička nesigurnost od 3,46% za ukupni otpor, 5,092% za uron te 8,46% za trim. U numeričkim simulacijama strujanja oko broda u naravi dobivena je ukupna numerička nesigurnost od 2,31% za ukupni otpor te 5,22% za uron u neograničenoj dubini. Numerička nesigurnost trima nešto je izraženija. Za slučaj plitke vode dobivena je numerička nesigurnost od 26,66% za ukupni otpor, 20,48% za uron te 41,64% za trim za brod u naravi. Validacija odnosno usporedba numeričkih rezultata s eksperimentalnim podacima provedena je za model broda u plitkoj vodi za dva Fn . Za $Fn = 0,139$ dobivena je relativna devijacija od -14,51% za ukupni otpor, -44,52% za uron te -26% za trim. Za $Fn = 0,052$ dobivena je relativna devijacija od -13,58% za ukupni otpor, -10,82% za uron te -40,5% za trim. Također je provedena usporedba numeričkih rezultata za model broda i brod u naravi u neograničenoj dubini s ekstrapoliranim rezultatima modelskih ispitivanja te je dobivena relativna devijacija od -11,05% za model broda te relativna devijacija od -6,17% za brod u naravi. Postotno povećanje ukupnog otpora u plitkoj vodi u odnosu na neograničenu dubinu za mjerilo modela pri $Fn = 0,139$ iznosi 11,7%, dok za brod u naravi pri istom Fn iznosi 4,9%. Za $Fn = 0,052$ postotno povećanje ukupnog otpora modela broda u plitkoj vodi iznosi 3,7%, a za brod u naravi 4,1%. Također je uočeno kako su valne elevacije iza broda u naravi veće u odnosu na valne elevacije iza modela broda te da mjerilo utječe na sliku valova. U budućim istraživanjima od velikog značaja bilo bi ispitati utjecaj različitih modela turbulencije na dobivene numeričke rezultate, kao i parametara za diskretizaciju domene s ciljem smanjivanja ukupne numeričke nesigurnosti.

LITERATURA

- [1] Larsson, L., Raven, H. C. (2010). *Ship Resistance and Flow*, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, New Jersey
- [2] Dogrul, A., Song, S., Demirel, Y. K. (2020). *Scale effect on ship resistance components and form factor*, Ocean Engineering, 209, 107428.
- [3] Zeng, Q., Hekkenberg, R., Thill, C., Hopman, H. (2020). *Scale effects on the wave-making resistance of ships sailing in shallow water*, Ocean Engineering, 212, 107654.
- [4] Song, S., Terziev, M., Tezdogan, T., Demirel, Y. K., Muscat-Fenech, C. D. M., Incecik, A. (2023). *Investigating roughness effects on ship resistance in shallow waters*, Ocean Engineering, 270, 113643.
- [5] Grlj, C. G., Degiuli, N., Tuković, Ž., Farkas, A., Martić, I. (2023). *The effect of loading conditions and ship speed on the wind and air resistance of a containership*, Ocean Engineering, 273, 113991.
- [6] Tezdogan, T., Incecik, A., Turan, O. (2016). *Full-scale unsteady RANS simulations of vertical ship motions in shallow water*, Ocean Engineering, 123, 131–145.
- [7] Martić, I., Chillacce, G., Tello Ruiz, M., Ramirez, J., Degiuli, N., el Moctar, O. (2019). *Numerical assessment of added resistance in waves of the DTC container ship in finite water depths*, 5th International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water with non-exclusive focus on manoeuvring in waves, wind and current (MASHCON 2019), Ostend, Belgija, 19.05. – 23.05.2019., 274 – 283.
- [8] Chillacce, G., Martić, I., Tello Ruiz, M., Ramirez, J., Degiuli, N., el Moctar, O. (2019). *Rans evaluation of the DTC's vertical motion sailing in finite water depth waves*, 5th International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water with non-exclusive focus on manoeuvring in waves, wind and current (MASHCON 2019), Ostend, Belgija, 19.05. – 23.05. 2019., 62 – 71.
- [9] Niklas, K., Pruszko, H. (2019). *Full-scale CFD simulations for the determination of ship resistance as a rational, alternative method to towing tank experiments*, Ocean Engineering, 190, 106435.
- [10] Donatini, L., Tello Ruiz, M., Delefortrie, G., Villagómez, J. C., Vantorre, M., Lataire, E. (2019). *Experimental and numerical evaluation of the added wave resistance for an ultra large container ship in shallow water*, 11th International Workshop on Ship and Marine Hydrodynamics (IWSH2019), Hamburg, Germany, 22.09. – 25.09. 2019., 75.

- [11] Wang, J., Wan, D. (2019). *Numerical simulations of viscous flows around JBC ship using different turbulence models*, 11th International Workshop on Ship and Marine Hydrodynamics (IWSH2019), Hamburg, Germany, 22.09. – 25.09. 2019. , 1 – 7.
- [12] Ulgen, K., Dhanak, M. R. (2022.) *Hydrodynamic performance of a catamaran in shallow waters*, Journal of Marine Science and Engineering, 10(9), 1169.
- [13] Degiuli, N., Farkas, A., Martić, I., Zeman, I., Ruggiero, V., Vasiljević, V. (2021). *Numerical and experimental assessment of the total resistance of a yacht*, Brodogradnja, 72(3), 61 – 80.
- [14] Hoa, N. T. N., Vu, B. N., Tran, N. T., Chien, N. M., Le, T. H. (2019). *Numerical investigating the effect of water depth on ship resistance using RANS CFD Method*, Polish Maritime Research, 26(3), 56 – 64.
- [15] Farkas, A., Degiuli, N., Martić, I. (2017). *Numerical investigation into the interaction of resistance components for a series 60 catamaran*, Ocean Engineering, 146, 151 – 169.
- [16] Campbell, R., Terziev, M., Tezdogan, T., Incecik, A. (2022). *Computational fluid dynamics predictions of draught and trim variations on ship resistance in confined waters*, Applied Ocean Research, 126, 103301.
- [17] Degiuli, N., Martić, I., Farkas, A. (2019). *Environmental aspects of total resistance of container ship in the North Atlantic*, Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, 7(4), 641 – 655.
- [18] Degiuli, N., Martić, I., Farkas, A., Pedišić Buča, M., Dejhalla, R., Grlj, C. G. (2023). *Experimental assessment of the hydrodynamic characteristics of a bulk carrier in off-design conditions*, Ocean Engineering, 280, 114936.
- [19] Gamulin, A. (1997). *Otpor i propulzija broda* , interna skripta, FSB, Zagreb
- [20] Radan, D. (2004). *Uvod u hidrodinamiku broda*, Sveučilište u Dubrovniku, Dubrovnik
- [21] Degiuli, N. *Otpor i propulzija broda*, predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [22] ITTC (2017.) – *Recommended Procedures and Guidelines, 1978 ITTC Performance Prediction Method*, 7.5–02–03–01.4
- [23] Virag, Z., Džijan, I. (2014). *Računalna dinamika fluida*, skripta - predavanja, FSB, Zagreb
- [24] Werner, A., Degiuli, N. *Mehanika fluida IIB*, podloge za nastavu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [25] Ferziger, J. H., Perić, M., Street, R. L. (2019). *Computational Methods for fluid dynamics*, Springer

-
- [26] STAR-CCM+, User Guide.
- [27] <https://www.grasacoustics.com/blog/aerodynamic-measurements-components-of-the-boundary-layer>
- [28] ITTC (2008). – *Recommended Procedures and Guidelines, Uncertainty Analysis in CFD Verification and Validation, Methodology and Procedures*
- [29] Stern, F., Wilson, R. V., Coleman, H. W., Paterson, E. G (2001). *Comprehensive approach to verification and validation of CFD Simulations–Part 1: Methodology and Procedures*, Journal of Fluids Engineering, 123, 793 – 801.
- [30] Van Zwijnsvoorde, T., Tello Ruiz, M., Delefortrie, G., Lataire, E. (2019). *Sailing in shallow water waves with the DTC container carrier: open model test data for validation purposes*, 5th International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water with non-exclusive focus on manoeuvring in waves, wind and current (MASHCON 2019), Ostend, Belgija, 19.05. – 23.05. 2019., 411 – 422.
- [31] ITTC (2011). – *Recommended Procedures and Guidelines*, 7.5–03–02–03
- [32] Deng, R., Huang, D. B., Zhou, G. L., Sun, H. W., Chang, L., Ma, C. (2012). *Research on mesh generation effecting resistance calculation*, Applied Mechanics and Materials, 138, 886 – 893.
- [33] Kinaci, O. K., Gokce, M. K., Delen, C. (2020). *Resistance experiments and self-propulsion estimations of Duisburg Test Case at 1/100 scale*, Ship Technology Research, 67(2), 109 – 120.