

Utjecaj prizmatičkog koeficijenta i uzdužnog položaja težišta volumena istisnine na ukupni otpor putničkog broda

Borčić, Kornelija

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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:235:263913>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-03**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Kornelija Borčić

Zagreb, 2024. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Nastia Degiuli, dipl. ing.
Dr. sc. Ivana Martić, mag. ing. nav. arch.

Student:

Kornelija Borčić

Zagreb, 2024. godina.

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

Zahvaljujem se mentoricama prof. dr. sc. Nastii Degiuli i dr.sc. Ivani Martić te mag. ing. aeroing. Carlu Giorgiu Grlju na pruženoj pomoći, savjetima, odvojenom vremenu i prenesenom znanju.

Najveću zahvalu dugujem svojim roditeljima i bratu Mihaelu koji su mi bili najveća podrška, oslonac i vjetar u leđa. Omogućili ste mi daleko više od potrebnoga i bez Vas ništa od ovoga nebi imalo smisla. Zaslužni ste za svaki moj uspjeh i neizmjereno sam Vam zahvalna na nesebičnoj i bezuvjetnoj ljubavi.

Veliko hvala mojem Kreši na beskrajnoj podršci, vjeri u mene, razumijevanju i glasu razuma u najstresnijim trenucima. Bio si tu od prvog zajedničkog programskog zadatka do zadnjeg položenog ispita i period studiranja učinio posebnim. Hvala Ti.

Kornelija Borčić



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Kornelija Borčić** JMBAG: 0035219446

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj prizmatičkog koeficijenta i uzdužnog položaja težišta volumena istisnine na ukupni otpor putničkog broda**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Impact of the prismatic coefficient and the longitudinal center of buoyancy on the total resistance of a passenger ship**

Opis zadatka:

Postoje brojni načini modifikacije forme broda s ciljem smanjenja ukupnog otpora koje se koriste u preliminarnoj fazi projektiranja broda. Neke od mogućnosti su promjena prizmatičkog koeficijenta uz zadržavanje početnog položaja težišta volumena istisnine te promjena uzdužnog položaja težišta volumena istisnine uz zadržavanje početnog prizmatičkog koeficijenta.

U diplomskom radu potrebno je, uz pomoć programskog paketa za računalnu dinamiku fluida, numerički simulirati pokus otpora putničkog broda te istražiti utjecaj prizmatičkog koeficijenta i uzdužnog položaja težišta volumena istisnine na ukupni otpor. Pri tome treba koristiti model trodimenzijskog strujanja viskozno fluida sa slobodnom površinom.

U radu je potrebno:

1. Dati pregled literature vezane uz modifikacije forme broda i numeričke simulacije pokusa otpora.
2. Modificirati formu putničkog broda promjenom prizmatičkog koeficijenta te uzdužnog položaja težišta volumena istisnine.
3. Dati matematičku osnovu numeričkih metoda za simulaciju viskozno strujanja fluida sa slobodnom površinom.
4. Pripremiti proračunsku mrežu, početne i rubne uvjete te izvršiti numeričku simulaciju pokusa otpora broda koristeći programski paket za računalnu dinamiku fluida.
5. Provesti postupak verifikacije te odrediti numeričku nesigurnost dobivenih numeričkih rezultata.
6. Dati preporuku najpovoljnijih parametara forme putničkog broda s obzirom na ukupni otpor.

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: Datum predaje rada: Predviđeni datum obrane:
9. svibnja 2024. 11. srpnja 2024. 15. - 19. srpnja 2024.

Zadatak zadao: Predsjednik Povjerenstva:

Nastia Degiuli
Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

Martić
Dr. sc. Ivana Martić

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović

Čatipović

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD	1
2. PREGLED LITERATURE	3
3. OTPOR BRODA	6
3.1. Otpor broda	6
3.2. Podjela otpora	7
4. UTJECAJ PRIZMATIČKOG KOEFICIJENTA I UZDUŽNOG POLOŽAJA TEŽIŠTA VOLUMENA ISTISNINE NA UKUPNI OTPOR	10
5. MATEMATIČKI MODEL	13
5.1. Reynoldsove osrednjene Navier – Stokesove jednadžbe	13
5.2. Model turbulencije	15
5.3. Metoda konačnih volumena	15
5.4. Metoda udjela fluida u volumenu	16
5.5. Zidne funkcije	17
5.6. Verifikacija rezultata	19
6. PRIPREMA NUMERIČKIH SIMULACIJA	21
6.1. Pregled osnovnih geometrijskih značajki putničkog broda	21
6.2. Proračunska domena	22
6.3. Rubni uvjeti	23
6.4. Generiranje geometrijske mreže	24
6.5. Diskretizacija proračunske domene	26
6.5.1. Granični sloj	26
6.5.2. Slobodna površina	28
6.5.3. Kelvinov kut	29
6.6. Fizikalni model numeričke simulacije	30
6.7. Parametar rješavača	31
7. ANALIZA REZULTATA	32
7.1. Verifikacija rezultata	32
7.2. Usporedba rezultata ukupnog otpora, urona i kuta trima	34
7.3. Usporedba ukupnog otpora, urona i kuta trima najpovoljnije forme broda sa stajališta ukupnog otpora za tri brzine	41
7.4. Položaj slobodne površine duž trupa putničkog broda	41
7.5. Slika valova	43
7.6. Hidrodinamički tlak	46

7.7. Tangencijalna naprezanja.....	48
8. ZAKLJUČAK.....	51
LITERATURA.....	53

POPIS SLIKA

Slika 1. Podjela ukupnog otpora broda [24].....	9
Slika 2. Optimalna vrijednost prizmatičkog koeficijenta u ovisnosti o F_n [26].....	10
Slika 3. Optimalne vrijednosti uzdužnog položaja težišta volumena istisnine ovisnosti o F_n [26]	11
Slika 4. Dio diskretiziranog područja proračunske domene [27].....	16
Slika 5. Granični sloj pri strujanju fluida uz krutu stijenku [33].....	17
Slika 6. 3D model putničkog broda.....	22
Slika 7. Dimenzije proračunske domene.....	23
Slika 8. Rubni uvjeti proračunske domene.....	24
Slika 9. Dobra i loša diskretizacija graničnog sloja [27].....	25
Slika 10. Diskretizacija graničnog sloja na krmenom dijelu trupa broda	27
Slika 11. Diskretizacija graničnog sloja uz trup broda.....	27
Slika 12. Diskretizacija graničnog sloja na pramčanom dijelu trupa broda.....	28
Slika 13. Diskretizacija slobodne površine	29
Slika 14. Diskretizacija područja Kelvinovog kuta.....	29
Slika 15. Odabrani fizikalni model numeričke simulacije	30
Slika 16. Sučelje programskog paketa CAESES [14].....	35
Slika 17. Slobodna površina duž trupa početne forme putničkog broda.....	42
Slika 18. Slobodna površina duž trupa putničkog broda za $\Delta LCB = 0,4\%$ (gore lijevo), $\Delta LCB = 0,8\%$ (gore desno), $\Delta LCB = 1,2\%$ (dolje lijevo) i $\Delta LCB = 1,6\%$ (dolje desno)	42
Slika 19. Slobodna površina duž trupa putničkog broda za $\Delta LCB = -0,4\%$ (gore lijevo), $\Delta LCB = -0,8\%$ (gore desno), $\Delta LCB = -1,2\%$ (dolje lijevo) i $\Delta LCB = -1,6\%$ (dolje desno)	42
Slika 20. Slobodna površina duž trupa putničkog broda za $\Delta C_p = 5\%$ (gore lijevo), $\Delta C_p = 10\%$ (gore desno), $\Delta C_p = -5\%$ (dolje lijevo) i $\Delta C_p = -10\%$ (dolje desno)	43
Slika 21. Slika valova oko početne forme putničkog broda.....	44
Slika 22. Slika valova oko trupa putničkog broda za $\Delta LCB = 0,4\%$ (gore lijevo), $\Delta LCB = 0,8\%$ (gore desno), $\Delta LCB = 1,2\%$ (dolje lijevo) i $\Delta LCB = 1,6\%$ (dolje desno)	44
Slika 23. Slika valova oko trupa putničkog broda za $\Delta LCB = -0,4\%$ (gore lijevo), $\Delta LCB = -0,8\%$ (gore desno), $\Delta LCB = -1,2\%$ (dolje lijevo) i $\Delta LCB = -1,6\%$ (dolje desno)	45
Slika 24. Slika valova oko trupa putničkog broda za $\Delta C_p = 5\%$ (gore lijevo), $\Delta C_p = 10\%$ (gore desno), $\Delta C_p = -5\%$ (dolje lijevo) i $\Delta C_p = -10\%$ (dolje desno).....	46
Slika 25. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka po trupu početne forme putničkog broda	46
Slika 26. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka po trupu putničkog broda za $\Delta LCB = 0,4\%$ (gore lijevo), $\Delta LCB = 0,8\%$ (gore desno), $\Delta LCB = 1,2\%$ (dolje lijevo) i $\Delta LCB = 1,6\%$ (dolje desno)	47
Slika 27. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka po trupu putničkog broda za $\Delta LCB = -0,4\%$ (gore lijevo), $\Delta LCB = -0,8\%$ (gore desno), $\Delta LCB = -1,2\%$ (dolje lijevo) i $\Delta LCB = -1,6\%$ (dolje desno)	47

Slika 28. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka po trupu putničkog broda za $\Delta C_p = 5\%$ (gore lijevo), $\Delta C_p = 10\%$ (gore desno), $\Delta C_p = -5\%$ (dolje lijevo) i $\Delta C_p = -10\%$ (dolje desno)	48
Slika 29. Raspodjela tangencijalnih naprezanja po trupu početne forme putničkog broda	48
Slika 30. Raspodjela tangencijalnih naprezanja po trupu putničkog broda za $\Delta LCB = 0,4\%$ (gore lijevo), $\Delta LCB = 0,8\%$ (gore desno), $\Delta LCB = 1,2\%$ (dolje lijevo) i $\Delta LCB = 1,6\%$ (dolje desno).....	49
Slika 31. Raspodjela tangencijalnih naprezanja po trupu putničkog broda za $\Delta LCB = -0,4\%$ (gore lijevo), $\Delta LCB = -0,8\%$ (gore desno), $\Delta LCB = -1,2\%$ (dolje lijevo) i $\Delta LCB = -1,6\%$ (dolje desno)	49
Slika 32. Raspodjela tangencijalnih naprezanja po trupu putničkog broda za $\Delta C_p = 5\%$ (gore lijevo), $\Delta C_p = 10\%$ (gore desno), $\Delta C_p = -5\%$ (dolje lijevo) i $\Delta C_p = -10\%$ (dolje desno)	50

POPIS TABLICA

Tablica 1. Optimalne vrijednosti za C_p , LCB i A_w pri velikim brzinama plovidbe [26].....	12
Tablica 2. Tipovi konvergencije.....	20
Tablica 3. Osnovne geometrijske značajke putničkog broda.....	21
Tablica 4. Osnovne veličine i broj ćelija za pojedinu mrežu pri projektnoj brzini.....	25
Tablica 5. Ukupan broj ćelija proračunskih domena za sve ispitane brzine.....	25
Tablica 6. Vrijednosti vremenskog koraka za projektnu brzinu.....	31
Tablica 7. Numerička nesigurnost ukupnog otpora dobivena primjenom različite gustoće mreže.....	32
Tablica 8. Numerička nesigurnost ukupnog otpora dobivena primjenom različitog vremenskog koraka.....	32
Tablica 9. Numerička nesigurnost urona dobivena primjenom različite gustoće mreže.....	33
Tablica 10. Numerička nesigurnost urona dobivena primjenom različitog vremenskog koraka.....	33
Tablica 11. Numerička nesigurnost kuta trima dobivena primjenom različite gustoće mreže.....	33
Tablica 12. Numerička nesigurnost kuta trima dobivena primjenom različitog vremenskog koraka.....	34
Tablica 13. Ukupna numerička nesigurnost ukupnog otpora, urona i kuta trima.....	34
Tablica 14. Utjecaj uzdužnog položaja težišta volumena istisnine na ukupni otpor.....	36
Tablica 15. Utjecaj uzdužnog položaja težišta volumena istisnine na otpor tlaka i otpor trenja.....	37
Tablica 16. Utjecaj prizmatičkog koeficijenta na ukupni otpor.....	37
Tablica 17. Utjecaj prizmatičkog koeficijenta na otpor tlaka i otpor trenja.....	38
Tablica 18. Utjecaj uzdužnog položaja težišta volumena istisnine na uron.....	39
Tablica 19. Utjecaj prizmatičkog koeficijenta na uron.....	39
Tablica 20. Utjecaj uzdužnog položaja težišta volumena istisnine na kut trima.....	40
Tablica 21. Utjecaj prizmatičkog koeficijenta na kut trima.....	40
Tablica 22. Ukupni otpor, uron i kut trima za tri ispitane brzine.....	41

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_M	m^2	Najveća površina poprečnog presjeka
B	m	Širina broda
C_B	/	Koeficijent punoće forme
C_P	/	Prizmatički koeficijent
C_F	/	Koeficijent otpora trenja
D_{ij}	s^{-1}	Tenzor brzine deformacije
Fn	/	Froudeov broj
g	m/s^2	Gravitacijska konstanta
\overline{KB}	m	Vertikalni položaj težišta volumena istisnine
\overline{KG}	m	Vertikalni položaj težišta mase
LCB	m	Uzdužni položaj težišta volumena istisnine
LCG	m	Uzdužni položaj težišta mase
L_{PP}	m	Duljina između okomica
p	N/m^2	Tlak
\bar{p}	N/m^2	Vremenski osrednjena komponenta polja tlaka
p'	N/m^2	Pulsirajuća komponenta polja tlaka
p_i	/	Red točnosti
R_F	N	Otpor trenja
Rn	/	Reynoldsov broj
R_i	/	Omjer konvergencije
R_P	N	Otpor tlaka
R_T	N	Ukupan otpor
S_L	/	Najmanja vrijednost numeričkog rješenja
S_U	/	Najveća vrijednost numeričkog rješenja
t	°	Kut trima
t	s	Vrijeme
T	m	Gaz
T	s	Period definiran kao omjer duljine i brzine broda
\bar{u}	m/s	Komponenta brzine strujanja paralelno sa stijenkom
u_τ	m/s	Brzina trenja
U_{SN}	/	Ukupna numerička nesigurnost
U_i	/	Numerička nesigurnost
U_I	/	Numerička nesigurnost broja iteracija
U_G	/	Numerička nesigurnost mreže
U_P	/	Numerička nesigurnost ostalih parametara

U_T	/	Numerička nesigurnost vremenskog koraka
v	m/s	Brzina broda
\bar{v}_i	m/s	Vremenski osrednjena komponenta polja brzine
v'_i	m/s	Pulsirajuća komponenta polja brzine
v_j	m/s	Vektor brzine
V	m ³	Volumen
Z	m	Geodetska visina
Z	m	Uron
y	m	Udaljenost od stijenke
y^+		Bezdimenzijska udaljenost od stijenke
ρ	kg/m ³	Gustoća fluida
Δ	kg	Masa istisnine
Δ_t	s	Vremenski korak
ε_i	/	Razlika rezultata
δ_{RE}^*	/	Numerička pogreška
τ	N/m ²	Tangencijalno naprezanje
τ_w	N/m ²	Tangencijalno naprezanje na stijenci
ν	m ² /s	Kinematički koeficijent viskoznosti
μ	Pas	Dinamički koeficijent viskoznosti
μ_t	Pas	Dinamički koeficijent turbulentne viskoznosti
ε_i	/	Razlika rezultata
σ_{ji}	N/m ²	Tenzor naprezanja
δ_{ij}	/	Kroneckerov simbol
Σ_{ij}	N/m ²	Devijatorski dio tenzora naprezanja
α_i	/	Volumni udio pojedinog fluida u kontrolnom volumenu

SAŽETAK

U radu je provedeno numeričko istraživanje utjecaja uzdužnog položaja težišta volumena istisnine te prizmatičkog koeficijenta na ukupni otpor putničkog broda primjenom programskog paketa STAR – CCM+ za računalnu dinamiku fluida. Modifikacija forme broda provedena je pomoću programskog paketa CAESES. Nestacionarno strujanje viskoznog fluida modelirano je Reynoldsovim osrednjenim Navier – Stokesovim (RANS) jednadžbama koje su diskretizirane metodom konačnih volumena. Primijenjen je $k - \omega$ SST model turbulencije, a položaj slobodne površine određen je metodom udjela fluida u volumenu. Granične vrijednosti pomaka uzdužnog položaja težišta volumena istisnine definirane su od strane tvrtke Flow Ship Design d.o.o., a granične vrijednosti prizmatičkog koeficijenta određene su prema Lackenbyjevoj metodi za geometrijsku modifikaciju forme broda. Proveden je postupak verifikacije rezultata te je proračunata ukupna numerička nesigurnost ukupnog otpora, urona i kuta trima početne forme putničkog broda. Provedena je detaljna analiza strujanja oko trupa broda što uključuje određivanje slike valova, položaja slobodne površine, raspodjelu hidrodinamičkog tlaka i tangencijalnih naprezanja duž trupa broda. Konačno, dana je usporedba dobivenih vrijednosti ukupnog otpora, urona i kuta trima za sve modificirane forme broda. Zaključeno je da je pomakom uzdužnog položaja težišta volumena istisnine za 0,4 % L_{pp} moguće postići smanjenje ukupnog otpora za 2,11 % u odnosu na ukupni otpor početne forme putničkog broda. Također, povećanjem prizmatičkog koeficijenta za 5 %, uz zadržavanje konstantnog gaza i uzdužnog položaja težišta volumena istisnine, a što je rezultiralo povećanjem volumena istisnine za 4,96 %, moguće je postići smanjenje ukupnog otpora za 1,43 %. S ciljem određivanja krivulje otpora provedene su numeričke simulacije pokusa otpora za najpovoljniju formu sa stajališta ukupnog otpora za dvije dodatne brzine. Rezultati provedenog istraživanja pokazuju kako je i jednostavnom modifikacijom forme broda moguće postići smanjenje ukupnog otpora broda bez primjene složenih optimizacijskih algoritama.

Ključne riječi: putnički brod, uzdužni položaj težišta volumena istisnine, prizmatički koeficijent, računalna dinamika fluida, modifikacija forme broda, ukupni otpor

SUMMARY

In this paper, a numerical investigation of the impact of the longitudinal position of the center of buoyancy and the prismatic coefficient on the total resistance of the passenger ship is carried out using the software package STAR - CCM+ for computational fluid dynamics. Hull form modification is performed with the software package CAESES. The unsteady flow of a viscous fluid is modeled by the Reynolds averaged Navier–Stokes (RANS) equations, which are discretized by the finite volume method. The $k - \omega$ SST turbulence model is applied, and the position of the free surface is determined by the volume of fluid method. The limitations of the longitudinal position of the center of buoyancy are defined by the company Flow Ship Design d.o.o., and the limitations of the prismatic coefficient are determined according to Lackenby method for the hull form modification. The verification study is carried out and the total numerical uncertainty of the total resistance, sinkage, and trim angle of the initial hull form of the passenger ship is calculated. A detailed analysis of the flow around the ship hull is carried out, which includes the determination of the wave pattern, free surface position, hydrodynamic pressure distribution, and tangential stresses distribution along the ship hull. Finally, a comparison of the obtained values of total resistance, sinkage, and trim angle for all modified hull forms is given. It was concluded that by shifting the longitudinal position of the center of buoyancy by 0.4 % L_{pp} , it is possible to achieve a reduction in the total resistance of 2.11 % compared to the total resistance of the initial hull form. In addition, by increasing the prismatic coefficient by 5 %, while maintaining a constant draft and the longitudinal position of the center of buoyancy, resulting in an increase in the displacement volume by 4.96 %, it is possible to achieve a reduction in the total resistance of 1.43 %. To determine the resistance curve, numerical simulations of the resistance test are carried out for two additional speeds for the most favorable hull form from the total resistance point of view. The results of the conducted research pointed out that even by simple modifications of the hull form, it is possible to achieve a reduction in the total resistance of the ship without the need to apply complex optimization algorithms.

Key words: passenger ship, longitudinal center of buoyancy, prismatic coefficient, Computational Fluid Dynamics, hull form modification, total resistance

1. UVOD

Sukladno regulativama predloženim od strane Međunarodne pomorske organizacije, (eng. *International Maritime Organization, IMO*) svi novi brodovi trebaju udovoljiti zahtjevima minimalne razine energetske učinkovitosti sukladno Projektnom indeksu energetske učinkovitosti (EEDI). U posljednjih nekoliko godina razvoj i podizanje ekološke svijesti doveli su do ekspanzije zelenih tehnologija s ciljem očuvanja i zaštite okoliša. U skladu s tim, smanjenje potrošnje goriva ključni je parametar za budućnost brodograđevne industrije, ne samo sa stajališta brodovlasnika, već i s ekološkog stajališta s ciljem smanjenja emisije štetnih plinova. Kako bi se poboljšala energetska učinkovitost brodova, jedna od mjera predloženih od strane IMO-a je optimizacija forme trupa broda. Uspješna optimizacija uključuje analizu niza geometrijskih modifikacija forme trupa broda s ciljem određivanja optimalne forme [1-3]. Forma trupa s minimalnim otporom je uobičajeni cilj prilikom projektiranja brodova. Tradicionalno se optimizacija forme trupa broda uglavnom temeljila na modelskim ispitivanjima. Budući da su projektanti uobičajeno modificirali forme broda na temelju osobnog iskustva, postupak optimizacije forme trupa broda često nije bio znanstveno utemeljen [4]. Uobičajeno projektanti raspolažu osnovnim formama brodova koje prilagođavaju kako bi projektirali formu broda sa željenim hidrostatskim i hidrodinamičkim značajkama [5]. Prilikom projektiranja trupa broda potrebno je voditi računa o nizu raznih projektnih ograničenja, koja se ne odnose samo na hidrodinamičke značajke, već i na prostorne zahtjeve vezane uz količinu tereta te ugradnju motora, strojeva, opreme itd. [6]. Postupak optimizacije je uglavnom višekriterijski te je potrebno voditi računa da se optimizacijom forme trupa broda sa stajališta jedne značajke ne naruše preostale značajke broda. Dvije od brojnih mogućnosti modifikacije forme s ciljem smanjenja ukupnog otpora su promjena prizmatičkog koeficijenta uz zadržavanje početnog uzdužnog položaja težišta volumena istisnine te promjena uzdužnog položaja težišta volumena istisnine uz zadržavanje početnog prizmatičkog koeficijenta. Računalna dinamika fluida (eng. *Computational Fluid Dynamics, CFD*) moćan je alat za predviđanje karakteristika otpora broda, no važno je odrediti numeričke pogreške kako bi se osigurala točnost rezultata [7].

U okviru ovog rada prikazana je analiza hidrodinamičkih značajki putničkog broda dobivenih provođenjem numeričkih simulacija temeljenih na računalnoj dinamici fluida u programskom paketu STAR – CCM+. Ispitan je utjecaj prizmatičkog koeficijenta i uzdužnog položaja težišta

volumena istisnine na ukupni otpor, uron i kut trima putničkog broda. Istraživanje je provedeno za putnički brod projektiran od strane tvrtke Flow Ship Design d.o.o. [8] pri projektnoj brzini od 11,5 čv. Nestacionarno strujanje viskoznog fluida modelirano je Reynoldsovim osrednjenim Navier – Stokesovim (eng. *Reynolds Averaged Navier – Stokes*, RANS) jednadžbama, koje su diskretizirane metodom konačnih volumena te je primijenjen $k - \omega$ SST (eng. *k - ω Shear Stress Transport*) model turbulencije.

Metoda udjela fluida u volumenu (eng. *Volume of Fluid*, VOF) korištena je za opis slobodne površine čiji je početni položaj definiran pomoću VOF valova (eng. *Flat VOF Waves*). Postupak verifikacije numeričkih rezultata proveden je s ciljem određivanja numeričke nesigurnosti gustoće mreže i vremenskog koraka. Prema preporukama Međunarodnog udruženja bazena za modelska ispitivanja (eng. *International Towing Tank Conference*, ITTC) određena je numerička nesigurnost ukupnog otpora, urona i kuta trima putničkog broda. U konačnici je provedena detaljna analiza strujanja oko trupa broda te utjecaja prizmatičkog koeficijenta i uzdužnog položaja težišta volumena istisnine na ukupni otpor, uron i kut trima putničkog broda.

2. PREGLED LITERATURE

Projektiranje trupa broda kontinuirani je proces koji uključuje provedbu proračuna i analizu dobivenih rezultata te modifikaciju forme sukladno dobivenim rezultatima, a često se temelji iskustvu projektanta. S ciljem određivanja optimalne forme trupa broda sa stajališta hidrodinamičkih značajki potrebno je primijeniti odgovarajuće metode optimizacije koje nerijetko uključuju računalnu dinamiku fluida. Optimizacija forme trupa broda pomoću računalne dinamike fluida sastoji se od tri procesa koji uključuju modifikaciju početne forme, analizu strujanja oko modificirane forme broda te odabir optimirane forme [9]. Poboljšanje hidrodinamičkih značajki broda omogućuje projektiranje brodova koji su energetski učinkovitiji. Istovremeno, pomorskoj industriji potrebna je platforma za višekriterijsku optimizaciju niskih troškova koja je primjenjiva u projektnoj spirali [10]. Otpor broda moguće je odrediti pomoću metoda temeljenih na potencijalnom i viskoznom strujanju fluida. Metode temeljene na teoriji potencijalnog strujanja fluida imaju široku primjenu za izračun otpora valova vitkog trupa, posebno za brodove koji plove pri relativno visokim brzinama. Glavna prednost ovog pristupa je mogućnost izračuna otpora valova u kratkom vremenu što je od velikog značaja u preliminarnoj fazi projektiranja broda. Metode temeljene na teoriji viskoznog strujanja fluida omogućuju detaljniji uvid u strujanje oko trupa broda te rezultate veće točnosti. Iako je računalna dinamika fluida temeljena na teoriji viskoznog strujanja fluida sve zastupljenija uslijed naglog razvoja računala, metode temeljene na teoriji potencijalnog strujanja fluida još uvijek se primjenjuju. Glavni razlog je taj što projektanti u preliminarnoj fazi projektiranja broda žele brzo i točno procijeniti hidrodinamičke značajke broda kako bi modificirali ili optimirali trup broda [11]. Odabrana metoda modifikacije trupa broda ima ključnu ulogu u optimizaciji hidrodinamičkih značajki broda i trebala bi zadovoljiti sljedeće kriterije [12]:

- Modifikacija trupa broda trebala bi se postići koristeći mali broj projektnih parametara, a s ciljem uštede vremena.
- Raspon modifikacije forme trupa trebao bi biti dovoljno širok.
- Lokalno modificirana forma broda trebala bi biti smisleno povezana s ostatkom forme trupa.
- Optimalna forma trupa trebala bi biti pogodna sa stajališta tehnološke izvedbe.

Zbog kompleksne geometrije forme trupa broda postupak modeliranja vrlo je zahtjevan. Iz tog razloga forma trupa se često modificira na način da se mijenja njezin osnovni dizajn. H. Lackenby je 1950. godine razvio metodu modifikacije trupa broda temeljenu na promjeni areale

rebara. Od tada Lackenbyeva metoda ima široku primjenu u modifikaciji forme trupa broda [13]. Lackenbyeva metoda dio je programskog paketa CAESES, koji omogućuje inženjerima brodogradnje modifikaciju postojećeg trupa broda na temelju početne krivulje površina presjeka, uz ulazne podatke vezane za željenu promjenu istisnine kao i položaja težišta volumena istisnine. Volumen istisnine se mijenja primjenom glatke funkcije pomaka u određenom rasponu, koja se određuje automatski unutar programskog paketa. Ulazni podaci se mogu definirati posebno za pramčani i krmeni dio trupa broda [14].

Tran et al. [15] predstavili su strategiju za optimizaciju otpora gliserske forme trupa broda koja se sastoji od dimenzijske analize za određivanje funkcije cilja ovisne o tri bezdimenzijska parametra forme, primjene računalne dinamike fluida ili Savitskyjeve metode predviđanja otpora za svaku varijantu forme trupa broda i određivanja optimalne varijante forme s minimalnim otporom na temelju kombinacije Krigingovog zamjenskog modela i Neldel-Meadovog optimizacijskog algoritma.

Zha et al. [16] predstavili su višekriterijski alat za optimizaciju hidrodinamičkih značajki broda te ga primijenili za optimizaciju prototipa DTMB 5512 s ciljem smanjenja ukupnog otpora u mirnoj vodi i poboljšanja vertikalnih gibanja na stanju mora 4. Kao funkcije cilja autori su definirali ukupni otpor i amplitude spektra odziva vertikalnog gibanja. Ukupni otpor u mirnoj vodi odredili su na temelju Neumann-Michellove teorije, dok su spektre odziva vertikalnih gibanja uslijed nepravilnih valova izračunali pomoću rješavača trodimenzijskog potencijalnog strujanja fluida.

Fitriadhy et al. [17] proveli su optimizaciju forme trupa katamarana s ciljem smanjenja ukupnog otpora pri konstantnom volumenu istisnine na temelju genetskog algoritma (eng. *Genetic Algorithm*, GA) primjenom programskog paketa CAESES. Modificirane forme broda su evaluirali korištenjem računalne dinamike fluida s ciljem određivanja optimalne forme trupa koja zadovoljava tražene hidrodinamičke značajke.

Miao et al. [18] proveli su optimizaciju forme i razmaka između trupova S60 katamarana s ciljem smanjenja ukupnog otpora primjenom razvijenog rješavača OPTShip-SJTU za višekriterijsku optimizaciju temeljenu na računalnoj dinamici fluida. Primijenili su metodu slobodne deformacije (eng. *Free Form Deformation*, FFD) kako bi modificirali površinu trupa broda definiranu neuniformnim racionalnim B-splajnovima (NURBS) te automatski rekonstruirali novu formu trupa broda. Rješavač naoe – FOAM – SJTU temeljen na RANS jednadžbama autori su primijenili za procjenu hidrodinamičkih značajki broda. Za pretraživanje globalnog optimalnog skupa (nazvanog Pareto fronta) u aproksimacijskim modelima

konstruiranim Krigingovom metodom koristili su NSGA – II algoritam (eng. *Non - Dominated Sorting Genetic Algorithm - II*).

Zhao et al. [19] predložili su metodu optimizacije preookeanskih koćarskih brodova s ciljem smanjenja ukupnog otpora. Proces optimizacije proveli su sintezom računalne dinamike fluida i računalom potpomognutog dizajna u programskom paketu CAESES. Numeričke simulacije pokusa otpora proveli su primjenom programskog paketa STAR – CCM+. Trup broda modificirali su korištenjem Lackenbyeve metode, a optimizaciju su proveli pomoću NSGA – II algoritma i Sobol + Tsearch algoritma.

Zhang et al. [20] razvili su postupak optimizacije forme trupa broda temeljen na računalnoj dinamici fluida i metodi za optimizaciju forme trupa broda s ciljem smanjenja ukupnog otpora u mirnoj vodi. U okviru svog istraživanja autori su predloženi postupak optimizacije primijenili za optimizaciju DTMB5512 i WIGLEY III brodova čije su forme modificirali tehnikom proizvoljne deformacije forme (eng. *Arbitrary Shape Deformation, ASD*). Dobiveni rezultati pokazuju da se predloženi postupak optimizacije može primijeniti za optimizaciju forme trupa broda uz značajno smanjenje zahtijevanih računalnih resursa.

Xhaferaj [21] je predstavio metodologiju za određivanje utjecaja uzdužnog položaja težišta volumena istisnine na ukupni otpor u ranim fazama projektiranja broda. Učinkovitost predložene metodologije temeljene na Holtropovoj metodi određivanja ukupnog otpora unutar programskog paketa Ship Power V 1.0 autor je prikazao na primjeru ribarskog broda.

Choi et al. [22] dali su prijedlog automatskog algoritma za kontrolu forme trupa broda tijekom procesa optimizacije na temelju Gaussove distribucijske funkcije. Predloženi algoritam primijenili su za optimizaciju putničkog broda te su pokazali da je isti učinkovit za kontrolu i identificiranje forme trupa broda s minimalnim otporom valova.

Hou et al. [23] predložili su metodu za optimizaciju forme trupa malog podvodnog vozila koristeći Krigingovu metodu odzivne površine (eng. *Response Surface Method, RSM*) i algoritam za višekriterijsku optimizaciju. U okviru optimizaciju forme trupa autori su koristili programske pakete SolidWorks i ANSYS te su omogućili teorijsku podlogu i tehničku podršku za optimizaciju sličnih podvodnih vozila.

3. OTPOR BRODA

3.1. Otpor broda

Otpor broda je sila kojom tekućina djeluje na brod u suprotnom smjeru od smjera gibanja broda. Brod tijekom plovidbe uzrokuje poremećaje u medijima kroz koje prolazi, a to su zrak i voda. Ukupni otpor broda moguće je podijeliti na nekoliko komponenti, što olakšava teorijsko i eksperimentalno određivanje otpora [24].

Bezdimenzijski prikaz ukupnog otpora odgovara koeficijentu ukupnog otpora, koji je ovisan o Reynoldsovom i Froudeovom broju:

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

gdje je:

R_T – ukupni otpor,

ρ – gustoća fluida,

v – brzina broda,

S – oplakana površina.

Reynoldsov broj predstavlja odnos između inercijskih i viskoznih sila te je definiran izrazom:

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

gdje je:

L – duljina broda,

ν – kinematički koeficijent viskoznosti.

Froudeov broj predstavlja odnos između inercijskih i gravitacijskih sila i definiran je kao:

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

gdje je:

g – gravitacijska konstanta.

3.2. Podjela otpora

Na brod koji se giba kroz vodu djeluje hidrodinamička sila, čija je horizontalna komponenta jednaka ukupnom otporu. 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 naprezanja po površini određuju se otpor trenja i otpor tlaka, čiji zbroj predstavlja ukupni otpor. Ova vrsta podjele proizlazi iz pretpostavke da fluid djeluje na trup neprekidno raspodijeljenim površinskim silama [24]. U tom slučaju ukupni otpor broda izražava se na sljedeći način:

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

Ukupni otpor moguće je podijeliti i na viskozni otpor i otpor valova. Navedena podjela slijedi iz podjele strujanja oko trupa broda. Naime, viskoznost fluida ima dominantan utjecaj u graničnom sloju i hidrodinamičkom tragu, dok se izvan njih viskozni učinci smatraju zanemarivim te se navedeno područje naziva područje neviskoznog potencijalnog strujanja (idealna tekućina). Kako viskozni otpor ovisi o Reynoldsovom broju, a otpor valova 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.

Nadalje, viskozni otpor moguće je podijeliti na otpor trenja i viskozni otpor tlaka kako slijedi:

$$R_V = R_F + R_{PV} \quad (6)$$

gdje je:

R_F – otpor trenja,

R_{PV} – viskozni otpor tlaka.

Uslijed djelovanja tangencijalnih naprezanja po oplakanoj površini broda nastaje otpor trenja kao dio viskoznog otpora. Viskozni otpor tlaka ne može se izravno mjeriti te se određuje integracijom normalnih naprezanja uslijed viskoznosti te turbulencije, a naziva se i otpor forme.

Mjerenja su pokazala da je nemoguće unutar viskozne tekućine postići tlak koji bi postojao u idealnoj tekućini bez stvaranja valova na površini. Stoga je vektor hidrodinamičkog tlaka moguće izraziti na temelju normalnog naprezanja uslijed viskoznosti i normalnog naprezanja uslijed valova prema izrazu:

$$\vec{p} = \vec{p}_{pV} + \vec{p}_W \quad (7)$$

gdje je:

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

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

Sukladno tome, otpor tlaka moguće je odrediti na sljedeći način:

$$R_p = \int_S p_{pV} \cos(p, x_1) dS + \int_S p_W \cos(p, x_1) dS \quad (8)$$

U konačnici, izraz za ukupni otpor glasi:

$$R_T = \frac{1}{2} (C_F + C_{pV} + C_W + C_A) \rho v^2 S \quad (9)$$

gdje je:

C_F – koeficijent otpora trenja,

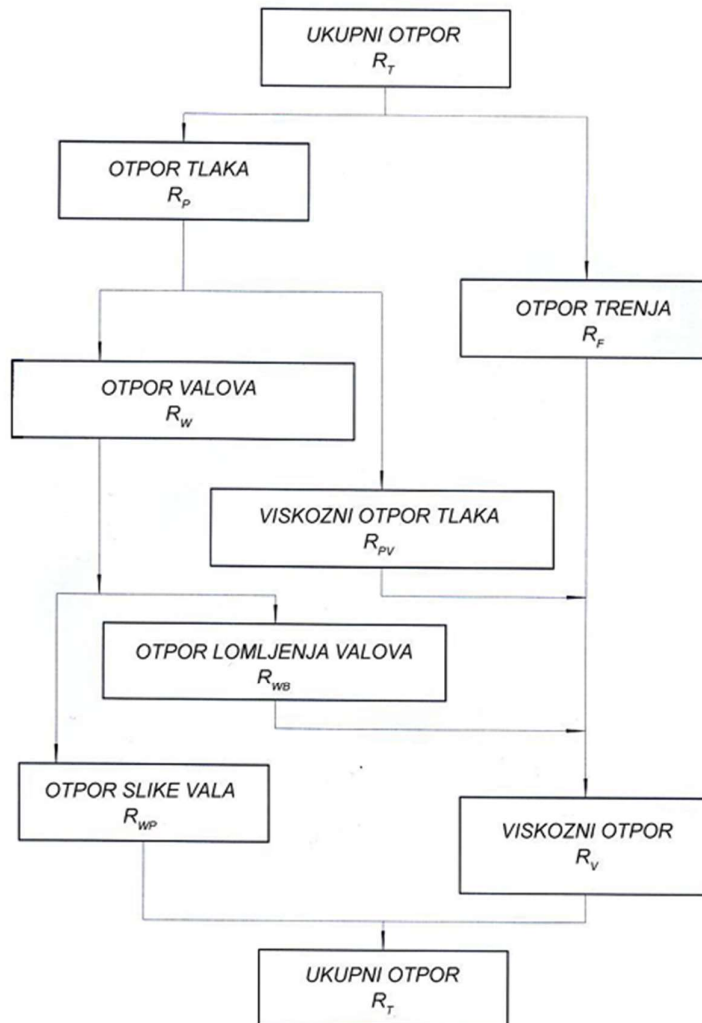
C_{pV} – koeficijent viskoznog otpora tlaka,

C_W – koeficijent otpora valova,

C_A – koeficijent dodatnog otpora.

Na slici 1. dan je prikaz podjele ukupnog otpora broda.

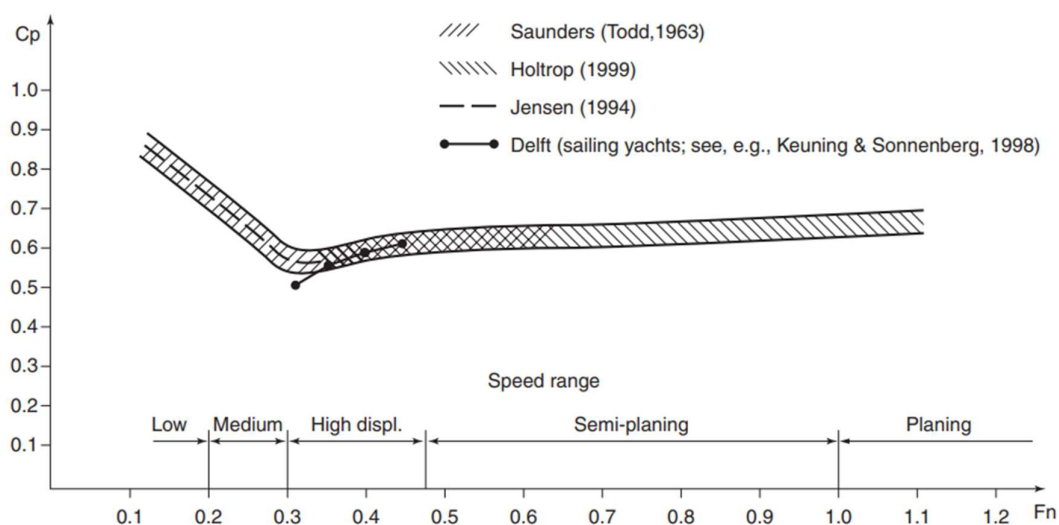
KOMPONENTE OTPORA (ITTC)



Slika 1. Podjela ukupnog otpora broda [24]

4. UTJECAJ PRIZMATIČKOG KOEFICIJENTA I UZDUŽNOG POLOŽAJA TEŽIŠTA VOLUMENA ISTISNINE NA UKUPNI OTPOR

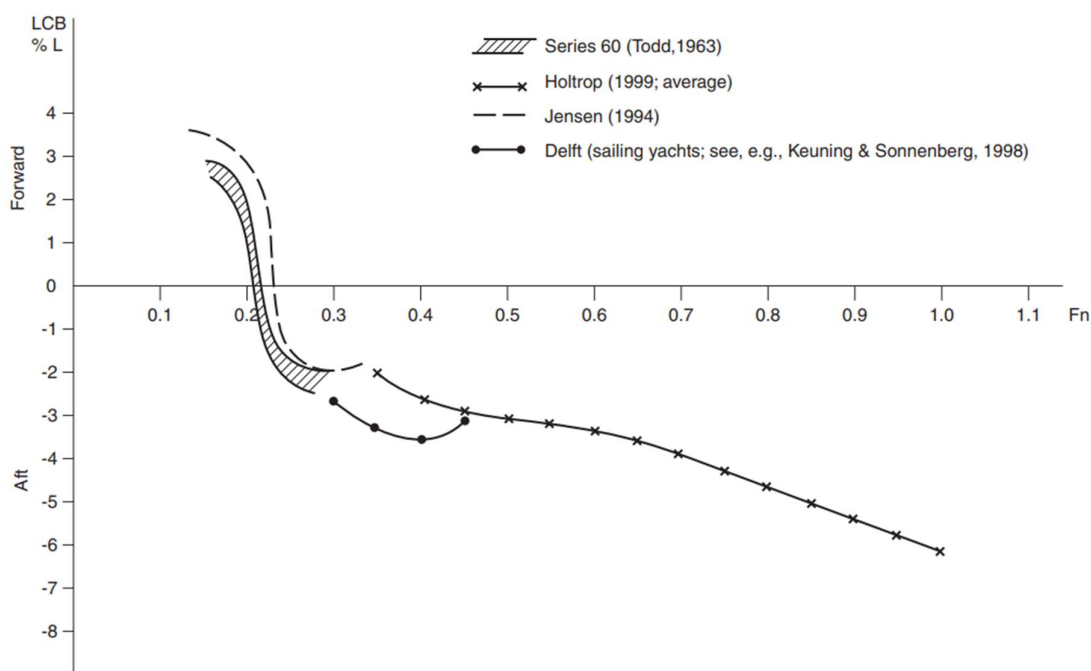
Od osnovnih bezdimenzijskih koeficijenata forme broda najveći utjecaj na ukupni otpor broda imaju koeficijent punoće forme C_B i prizmatički koeficijent C_p . Prizmatičkim koeficijentom izražena je raspodjela volumena istisnine po duljini broda te se smanjenjem istog volumen istisnine koncentrira oko glavnog rebra broda, a pramac i krma se zaoštavaju. Nadalje, uz konstantne vrijednosti koeficijenta punoće i prizmatičkog koeficijenta pomakom uzdužnog položaja težišta volumena istisnine (LCB) mijenja se zaoštrenje pramca ili krme [24]. Uzdužni položaj težišta volumena istisnine ovisi o raspodjeli volumena istisnine duž broda te zajedno s prizmatičkim koeficijentom i koeficijentom vitkosti forme broda direktno utječe na generiranje i intenzitet valnog sustava pramčanog i krmenog ramena [25]. Navedeni parametri ovisni su o Froudeovom broju, a forma broda trebala bi biti projektirana na način da su optimalne vrijednosti istih postignute. Promjena prizmatičkog koeficijenta i uzdužnog položaja težišta volumena istisnine povezana je s promjenom viskoznog otpora i otpora valova. Pri nižim brzinama otpor trenja je dominantan, dok mu se značaj smanjuje pri većim brzinama. Na slici 2. dan je prikaz optimalnih vrijednosti prizmatičkog koeficijenta u ovisnosti o Froudeovom broju [26].



Slika 2. Optimalna vrijednost prizmatičkog koeficijenta u ovisnosti o F_n [26]

Očito je da pomak uzdužnog položaja težišta volumena istisnine prema pramčanom dijelu broda dovodi do generiranja izraženijih valova u području pramčanog ramena. S druge strane, pomak uzdužnog položaja težišta volumena istisnine prema krmenom dijelu broda povećava rizik pojave odvajanja strujanja i stvaranja vrtloga ispred brodskog vijka što ima negativan utjecaj na propulzijske značajke broda. Prema tome, pomakom uzdužnog položaja težišta volumena istisnine nastoji se regulirati superpozicija lokalno generiranog sekundarnog sustava valova, a osobito pramčanog sustava valova te sustava valova pramčanog i krmenog ramena. Navedeno se prvenstveno odnosi na brodove koji plove pri velikim brzinama povezanim s razmjerno visokim vrijednostima otpora valova [25].

Na slici 3. dan je prikaz optimalnih vrijednosti uzdužnog položaja težišta volumena istisnine u ovisnosti o Froudeovom broju.



Slika 3. Optimalne vrijednosti uzdužnog položaja težišta volumena istisnine ovisnosti o F_n [26]

Za brodove koji plove u rasponu Froudeovih brojeva ($0,3 < F_n < 0,5$) postoje razlozi iz kojih se prilikom projektiranja broda izbjegavaju zaoštrenja pramca i krme. Zaoštrenjem pramca i krme promjene tlaka se smanjuju, ali se područje maksimalne vrijednosti tlaka pomiče prema središnjem dijelu trupa broda. Također, zaoštavanjem pramca i krme, veliki dio volumena koncentriran je u središnjem dijelu trupa broda, što može uzrokovati nepotrebno naglu promjenu zakrivljenosti vodne linije u navedenom području te rezultirati stvaranjem valnog dola. Ovaj takozvani „dijamantni efekt“ rezultira povećanjem otpora valova.

Nadalje, postoji dodatna prednost nešto punije krme pri ovim vrijednostima Froudeovog broja koja se očituje u smanjenju kuta trima. Iako punija krma neminovno povećava viskozni otpor tlaka, istovremeno smanjuje visinu krmenih valova. U navedenom rasponu Froudeovog broja umjereno zaoštrenje pramca i punija krma rezultiraju većom vrijednosti prizmatičkog koeficijenta u odnosu na brodove koji plove pri nižim brzinama, kao i pomakom uzdužnog položaja težišta volumena istisnine prema krmenom dijelu broda. Punija krma znači i deblji granični sloj s mogućnošću odvajanja mjehurića što može biti povoljnije sa stajališta otpora valova.

Kao općenito pravilo, veličina optimalnog krmenog zrcala se povećava s brzinom broda, a sukladno tome krmeni dio forme postaje puniji. Rezultat je povećanje prizmatičkog koeficijenta i pomak uzdužnog položaja težišta volumena istisnine prema krmenom dijelu broda. U tablici 1. dan je prikaz optimalnih vrijednosti prizmatičkog koeficijenta, uzdužnog položaja težišta volumena istisnine (u postotku duljine broda na vodnoj liniji u odnosu na glavno rebro) i veličine uronjenog dijela krmenog zrcala A_r kada je brod u stanju mirovanja (gdje je A_M površina najvećeg poprečnog presjeka) za različite vrijednosti Froudeovog broja [26].

Tablica 1. Optimalne vrijednosti za C_p , LCB i A_r pri velikim brzinama plovidbe [26]

Fn	C_p	LCB (negativan u smjeru krme)	A_r / A_M
0,35	0,6	-1,5 ÷ -2,5	0,0
0,4	0,58 – 0,62	-2,0 ÷ -3,5	0,0 – 0,09
0,5	0,62	-3,0	0,14
0,6	0,63	-3,3	0,18
0,8	0,64 – 0,68	-4,7	0,28
1,0	0,68 – 0,70	-4,5 ÷ 7,0	0,4 – 0,5
>1	0,70 – 0,82	≈ -10	0,7 – 0,95

5. MATEMATIČKI MODEL

5.1. Reynoldsove osrednjene Navier – Stokesove jednadžbe

Matematički model strujanja viskoznog fluida prikazan je sustavom parcijalnih diferencijalnih jednadžbi [27]. Za opis strujanja nestlačivog viskoznog fluida koriste se Navier-Stokesove jednadžbe temeljene na jednadžbi kontinuiteta i jednadžbi količine gibanja te dopunske jednadžbe koje odgovaraju zakonima posebnih ponašanja fluida [28].

Jednadžba kontinuiteta za nestlačivi fluid glasi:

$$\nabla \cdot \vec{v} = \text{div} \vec{v} = \frac{\partial v_j}{\partial x_j} = 0 \quad (10)$$

gdje je:

v_j – vektor brzine.

Jednadžba količine gibanja ili Eulerova jednadžba za nestlačivi fluid glasi:

$$\rho \frac{Dv_i}{Dt} = \rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \rho v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \rho f_i + \frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j} \quad (11)$$

gdje je:

ρ – gustoća fluida,

f_i – gustoća masene sile,

σ_{ji} – tenzor naprezanja,

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

Zakoni posebnih ponašanja fluida odnosno konstitutivne jednadžbe definirane su sljedećim izrazima:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \Sigma_{ij} \quad (12)$$

$$p = -\frac{1}{3}\sigma_{kk} \quad (13)$$

$$\Sigma_{ij} = 2\mu D_{ij} - \frac{2}{3}\mu D_{kk}\delta_{ij} \quad (14)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (15)$$

gdje je:

p – tlak,

δ_{ij} – Kroneckerov delta simbol,

Σ_{ij} – devijatorski dio tenzora naprezanja,

μ – dinamički koeficijent viskoznosti,

D_{ij} – tenzor brzine deformacije.

Kombinacijom jednačbi (10)-(14) slijede Navier-Stokesove jednačbe:

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \rho v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \rho f_i - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(p + \frac{2}{3} \mu D_{kk} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu D_{ij}) \quad (16)$$

Uvođenje supstitucije $\nu = \frac{\mu}{\rho}$, gdje je ν kinematički koeficijent viskoznosti, jednačba (16)

glasi:

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \nabla^2 v_i \quad (17)$$

Skup vremenski osrednjenih jednačbi kontinuiteta i količine gibanja naziva se Reynoldsovim jednačbama ili Reynoldsovim osrednjenim Navier–Stokesovim jednačbama (RANS) koje se u računalnoj dinamici fluida koriste za opisivanje viskoznog strujanja fluida [27]. Prema jednačbama (10) i (11), uz zanemarenje masenih sila, vidljivo je da su nepoznate veličine tlak i brzina koje se mogu izraziti kao zbroj osrednjene vrijednosti i pulsirajuće komponente kako slijedi:

$$v_i = \bar{v}_i + v_i' \quad (18)$$

$$p = \bar{p} + p' \quad (19)$$

gdje je:

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

v_i' – pulsirajuća komponenta polja brzine,

\bar{p} – vremenski osrednjeno polje tlaka,

p' – pulsirajuće polje tlaka.

Uvrštavanjem jednadžbe (18) u jednadžbu (10) i osrednjavanjem slijedi:

$$\frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (20)$$

Uvrštavanjem jednadžbi (18) i (19) u jednadžbu (17) dobiju se Reynoldsove osrednjene Navier-Stokesove jednadžbe:

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho v_i v_j}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} - \overline{\rho v_i v_j} \right) \quad (21)$$

u kojima su nepoznanice komponente osrednjenog polja brzine \bar{v}_i i osrednjeno polje tlaka \bar{p} , dok član $\overline{\rho v_i v_j}$ označava turbulentnu difuziju količine gibanja te se naziva turbulentnim ili Reynoldsovim naprezanjima. Model turbulencije, čiji je zadatak usklađivanje broja jednadžbi s brojem nepoznanica, uvodi se obzirom da Reynoldsove jednadžbe sadrže više nepoznanica nego jednadžbi.

5.2. Model turbulencije

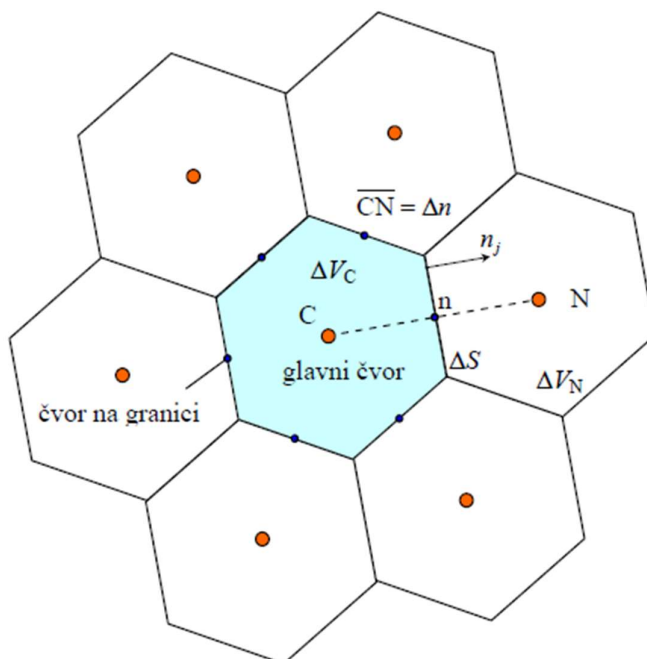
Za potrebe ovog rada primijenjen je $k - \omega$ SST model turbulencije u kojem se varijabla k odnosi na turbulentnu kinetičku energiju, dok varijabla ω predstavlja specifičnu disipaciju turbulentne kinetičke energije. $k - \omega$ SST model turbulencije, kao kombinacija $k - \omega$ i $k - \varepsilon$ modela turbulencije može se primijeniti pri niskim i visokim vrijednostima Reynoldsovog broja, odnosno uz stijenku gdje je utjecaj viskoznih sila dominantan te izvan graničnog sloja kada prelazi u $k - \varepsilon$ model turbulencije. Na taj način se izbjegavaju uobičajeni problemi $k - \omega$ modela turbulencije poput prevelike osjetljivosti modela na značajke turbulentnog strujanja [29].

5.3. Metoda konačnih volumena

Metoda konačnih volumena (eng. *Finite Volume Method*) integralna je metoda koja diskretizira parcijalne diferencijalne jednadžbe u sustav algebarskih jednadžbi [30]. Temelj navedene metode je integracija konzervativnog oblika transportnih jednadžbi po konačnim volumenima na koje je podijeljeno područje proračunske domene. Integral transportne jednadžbe po konačnom volumenu prikazanom na slici 4. glasi [27]:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Delta V} \rho \varphi dV = - \int_{\Sigma \Delta S} \left(\rho v_j \varphi - \Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) n_j dS + \int_{\Delta V} S_\varphi dV \quad (22)$$

Član s lijeve strane u izrazu (22) predstavlja promjenu sadržaja razmatranog fizikalnog svojstva φ u volumenu ΔV . Prvi član s desne strane predstavlja konvekcijski i difuzijski protok φ kroz granice volumena, a drugi član s desne strane jednadžbe predstavlja izvor fizikalnog svojstva.



Slika 4. Dio diskretiziranog područja proračunske domene [27]

5.4. Metoda udjela fluida u volumenu

Metoda udjela fluida u volumenu (eng. *Volume Of Fluid*, VOF) omogućuje simuliranje višefaznog strujanja fluida koji se ne miješaju s mogućnošću određivanja granice među njima [31] te se koristi za određivanje položaja slobodne površine između zraka i vode.

Izraz za definiranje volumnog udjela fluida unutar kontrolnog volumena glasi [31]:

$$\alpha_i = \frac{V_i}{V} \quad (23)$$

gdje je:

α_i – volumni udio pojedinog fluida u kontrolnom volumenu,

V – kontrolni volumen,

V_i – volumen i -tog fluida unutar kontrolnog volumena.

Gustoća ρ i dinamički koeficijent viskoznosti μ pojedinih faza računaju se prema sljedećim izrazima:

$$\rho = \sum_i \rho_i \alpha_i \quad (24)$$

$$\mu = \sum_i \mu_i \alpha_i \quad (25)$$

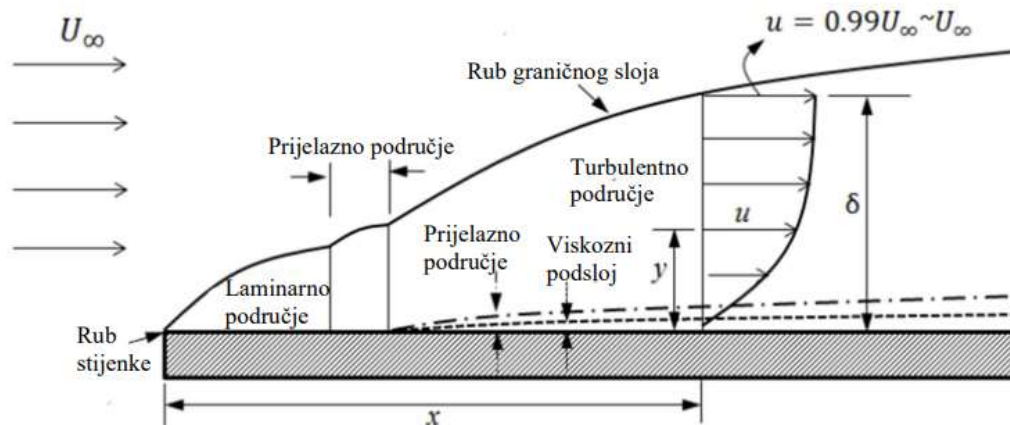
pri čemu je:

ρ_i – gustoća i -te faze unutar kontrolnog volumena,

μ_i – dinamički koeficijent viskoznosti i -te faze unutar kontrolnog volumena.

5.5. Zidne funkcije

Granični sloj je područje strujanja viskoznog fluida uz stijenku u kojem su viskozne i inercijske sile istog reda veličine, a dijeli se na laminarno, prijelazno i turbulentno područje [28]. 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 [32]. Na slici 5. dan je prikaz razvoja graničnog sloja pri strujanju fluida uz krutu stijenku [33].



Slika 5. Granični sloj pri strujanju fluida uz krutu stijenku [33]

Primjena zidnih funkcija (eng. *wall functions*) najčešće je rješenje za opis strujanja uz samu stijenku tj. u području s malim vrijednostima Reynoldsovog broja uslijed malih brzina strujanja.

Definiranjem unutarnjih rubnih uvjeta zidne funkcije premošćuju navedeno područje. U neposrednoj blizini stijenke, strujanje je paralelno sa stijenkom (\bar{u}), a komponenta brzine okomita na stijenku (y) je zanemarivo mala iz čega slijedi:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right] = \frac{\partial \tau}{\partial y} = 0 \quad (26)$$

gdje je ukupno tangencijalno naprezanje τ konstantno i jednako naprezanju na stijenci $\tau = \tau_w$, a μ_t je dinamički koeficijent turbulentne viskoznosti.

U viskoznom podsloju turbulentne pulsacije su prigušene, a molekularna viskoznost dominira pa se turbulentna viskoznost može zanemariti iz čega slijedi da je u tom području profil brzine linearan [27]:

$$\bar{u} = \frac{\tau}{\mu} y \quad (27)$$

odnosno u bezdimenzijskom zapisu:

$$u^+ = y^+ \quad (28)$$

Izraz za bezdimenzijsku udaljenost od stijenke glasi:

$$y^+ = u^+ = \frac{\rho u_\tau}{\mu} y \quad (29)$$

gdje su:

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (30)$$

$$y = \frac{y^+ L}{Rn \sqrt{\frac{C_f}{2}}} \quad (31)$$

$$C_f = \frac{0,075}{[\log_{10}(Rn) - 2]^2} \quad (32)$$

Parametar y predstavlja polovinu visine prve ćelije u graničnom sloju, u_τ brzinu trenja, a C_f koeficijent otpora trenja.

5.6. Verifikacija rezultata

Verifikacija je postupak određivanja nesigurnosti numeričkih rezultata te provjere konvergencije istih. Kako bi se proveo postupak verifikacije potrebno je provesti numeričke simulacije za minimalno tri mreže različite gustoće te minimalno tri različita vremenska koraka. Ukupna numerička nesigurnost definirana je na temelju broja iteracija, gustoće mreže, vremenskog koraka i ostalih parametara kako slijedi [34]:

$$U^2_{SN} = U^2_I + U^2_G + U^2_T + U^2_P \quad (33)$$

gdje je:

U_I – numerička nesigurnost broja iteracija,

U_G – numerička nesigurnost gustoće mreže,

U_T – numerička nesigurnost vremenskog koraka,

U_P – numerička nesigurnost ostalih parametara.

U ovom radu postupak verifikacije proveden je za ukupni otpor, uron i kuta trima broda primjenom različite gustoće mreže kao i vremenskog koraka. Nakon zanemarenja numeričke nesigurnosti broja iteracija i ostalih parametara izraz za ukupnu numeričku nesigurnost glasi:

$$U^2_{SN} = U^2_G + U^2_T \quad (34)$$

Omjer konvergencije određuje se na temelju razlika rješenja dobivenih primjenom različitih gustoća mreže i vremenskog koraka prema sljedećim izrazima:

$$\varepsilon_{i,21} = \hat{S}_{i,2} - \hat{S}_{i,1} \quad (35)$$

$$\varepsilon_{i,32} = \hat{S}_{i,3} - \hat{S}_{i,2} \quad (36)$$

$$R_i = \varepsilon_{i,21} / \varepsilon_{i,32} \quad (37)$$

gdje je:

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

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

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

ε_i – razlika rezultata,

R_i – omjer konvergencije.

Tipovi konvergencije s pripadajućim izrazima za određivanje numeričke nesigurnosti mreže i vremenskog koraka prikazani su u tablici 2., gdje je S_U najveća, a S_L najmanja vrijednosti numeričkog rezultata.

Tablica 2. Tipovi konvergencije

Omjer konvergencije	Tip konvergencije	Numerička nesigurnost
$-1 < R_i < 0$	Oscilatorna	$U_i = \frac{S_U - S_L}{2}$
$0 < R_i < 1$	Monotona	$U_i = 1,25 \left \delta_{RE}^* \right $
$ R_i > 1$	Divergencija	$U_i = S_U - S_L $

Generalizirana Richardsonova ekstrapolacija za procjenu numeričke nesigurnosti koristi se u slučaju monotone konvergencije. Pogreška δ_{RE}^* i red točnosti p_i određuju se prema sljedećim izrazima:

$$\delta_{RE}^* = \frac{\varepsilon_{i,21}}{r_i^{p_i} - 1} \quad (38)$$

$$p_i = \frac{\ln\left(\frac{\varepsilon_{i,32}}{\varepsilon_{i,21}}\right)}{\ln(r_i)} \quad (39)$$

gdje je r_i omjer profinjenja, koji za gustoću mreže iznosi $\sqrt{2}$, a za vremenski korak 2 [34].

6. PRIPREMA NUMERIČKIH SIMULACIJA

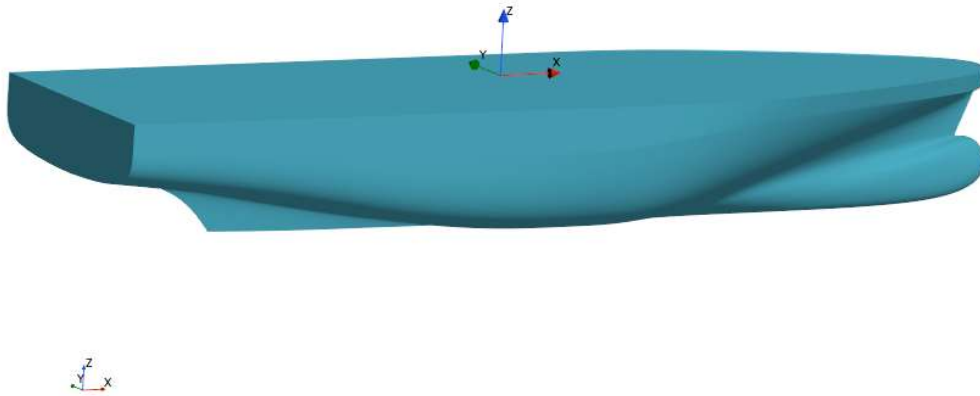
6.1. Pregled osnovnih geometrijskih značajki putničkog broda

U tablici 3. dan je prikaz osnovnih geometrijskih značajki putničkog broda za koji su provedene numeričke simulacije kako bi se istražio utjecaj prizmatičkog koeficijenta i uzdužnog položaja težišta volumena istisnine na ukupni otpor, uron i kut trima.

Tablica 3. Osnovne geometrijske značajke putničkog broda

Značajka	Oznaka	Vrijednost
Duljina između okomica	L_{PP}	23,73 m
Širina	B	7,072 m
Gaz	T	1,9 m
Masa istisnine	Δ	168 t
Vertikalni položaj težišta mase	\overline{KG}	3,69 m
Uzdužni položaj težišta mase	LCG	10,111 m
Vertikalni položaj težišta volumena istisnine	\overline{KB}	1,174 m
Uzdužni položaj težišta volumena istisnine	LCB	10,111 m
Prizmatički koeficijent	C_p	0,57
Froudeov broj	Fn	0,388

3D model putničkog broda prikazan je na slici 6. Koordinatni sustav definiran je na način da je ishodište postavljeno na simetralnoj ravnini broda u težištu mase prema podacima u tablici 3., a smjer osi definiran je kako slijedi: smjer osi x pozitivan je prema pramcu, osi y prema lijevoj strani, a osi z prema gore. Uron broda predstavlja pomak u negativnom smjeru osi z , pretega predstavlja negativan kut trima, a zatega pozitivan.



Slika 6. 3D model putničkog broda

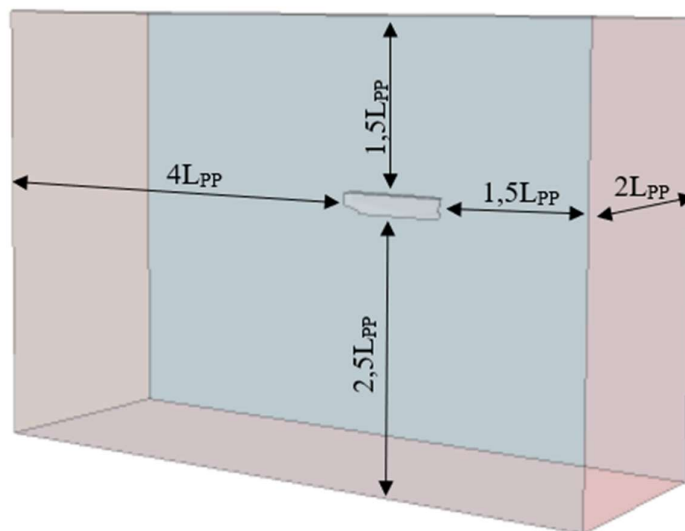
6.2. Proračunska domena

Prema [35] granice proračunske domene moraju biti smještene dovoljno daleko od trupa broda kako bi se minimizirao njihov utjecaj na dobiveno rješenje. Nadalje, proračunska domena u računalnoj dinamici fluida ograničena je površinama koje ne predstavljaju nužno stvarne fizičke granice [36]. Dimenzije proračunske domene prikazane su na slici 7.

Numeričke simulacije provedene su za polovinu trupa putničkog broda obzirom na simetričnost istog, a granice proračunske domene postavljene su kako slijedi:

- $1,5 L_{pp}$ ispred trupa broda,
- $4 L_{pp}$ iza trupa broda,
- $1,5 L_{pp}$ iznad trupa broda,
- $2,5 L_{pp}$ ispod trupa broda,
- $2 L_{pp}$ od simetralne ravnine broda,

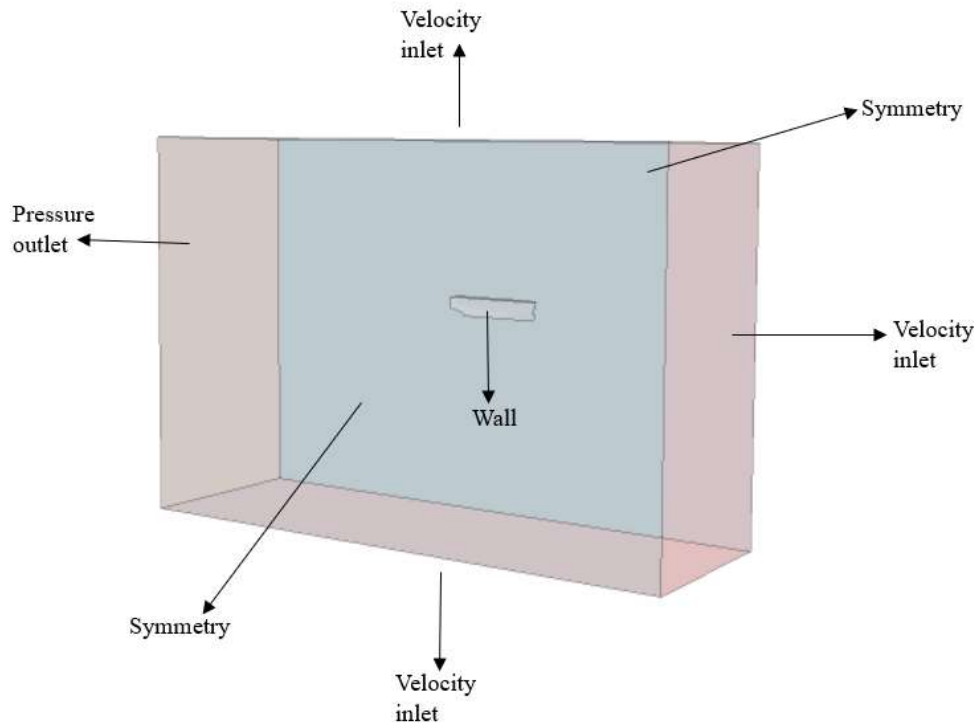
gdje L_{pp} predstavlja duljinu broda između okomica.



Slika 7. Dimenzije proračunske domene

6.3. Rubni uvjeti

Prilikom opisa strujanja računalnom dinamikom fluida, potrebno je definirati početne i rubne uvjete što je od presudne važnosti za ostvarivanje točnih rješenja [37]. Dopušteni stupnjevi slobode gibanja broda u numeričkim simulacijama provedenim s ciljem verifikacije rezultata su rotacijsko gibanje oko osi y , odnosno trim te translacijsko gibanje u smjeru osi z , odnosno uron [38]. U okviru ovog rada na ulaznoj, gornjoj i donjoj granici domene definiran je Dirichletov rubni uvjet koji se očituje u zadanoj brzini strujanja (eng. *velocity inlet*). Na izlaznoj granici definiran je von Neumannov rubni uvjet koji definira gradijent tlaka, a čiji je iznos jednak nuli (eng. *pressure outlet*). Rubni uvjet simetrije (eng. *symmetry*) definiran je na simetralnoj ravnini putničkog broda te na bočnoj granici. Rubni uvjet zida (eng. *Wall*) definiran je na trupu broda obzirom da kroz isti nema protoka fluida. Na slici 8. dan je prikaz navedenih rubnih uvjeta proračunske domene.



Slika 8. Rubni uvjeti proračunske domene

6.4. Generiranje geometrijske mreže

Proračunska domena diskretizira se na temelju metode konačnih volumena te se najčešće sastoji od heksaedarskih ćelija. Uz alat za automatsku diskretizaciju mreže (eng. *automated mesh*) definirana su još četiri alata za automatsko generiranje mreže kako slijedi:

- alat za rediskretizaciju površina (eng. *Surface Remesher*),
- alat za automatski popravak površine (eng. *Automatic Surface Repair*),
- alat za diskretizaciju izrezanih ćelija (eng. *Trimmed Cell Mesher*),
- alat za diskretizaciju prizama unutar graničnog sloja (eng. *Prism Layer Mesher*).

Od iznimne je važnosti ostvariti postepeni prijelaz između posljednje ćelije graničnog sloja i prve ćelije okolne mreže, a primjer dobre i loše izvedbe diskretizacije graničnog sloja dan je na slici 9.



Slika 9. Dobra i loša diskretizacija graničnog sloja [27]

U svrhu verifikacije numeričkih simulacija za projektnu brzinu broda od 11,5 čv generirane su tri mreže različite gustoće, fina, srednja i gruba mreža te su njihove osnovne veličine ćelija kao i ukupni broj ćelija prikazani u tablici 4. U tablici 5. dan je prikaz ukupnog broja ćelija fine mreže proračunskih domena za najpovoljniju formu broda sa stajališta ukupnog otpora za dvije dodatno ispitane brzine.

Tablica 4. Osnovne veličine i broj ćelija za pojedinu mrežu pri projektnoj brzini

Mreža	Veličina osnovne ćelije	Ukupan broj ćelija
Fina	0,38 m	4218274
Srednja	0,54 m	2766275
Gruba	0,76 m	1554310

Tablica 5. Ukupan broj ćelija proračunskih domena za sve ispitane brzine

Brzina broda, čv	Broj ćelija
10	4502089
11,5	4482407
12	4484074

6.5. Diskretizacija proračunske domene

U okviru ovog rada primijenjene su dodatne volumetrijske kontrole s ciljem profinjenja pojedinih područja proračunske domene u kojima dolazi do značajnih promjena u strujanju ili gdje je strujanje potrebno detaljnije opisati tj. u području pramca, krme te oko trupa broda, u području očekivane slobodne površine te u svrhu opisivanja Kelvinovog kuta.

6.5.1. Granični sloj

Kao što je ranije spomenuto, treba voditi računa o formiranju graničnog sloja uz trup broda te je potrebno posebnu pažnju posvetiti diskretizaciji tog područja [27]. Visina prve ćelije graničnog sloja određuje se na temelju Reynoldsovog broja i pretpostavljene vrijednosti bezdimenzijskog parametra y^+ :

$$y^+ = 0,172 \left(\frac{y}{L} \right) Re^{0,9} \quad (40)$$

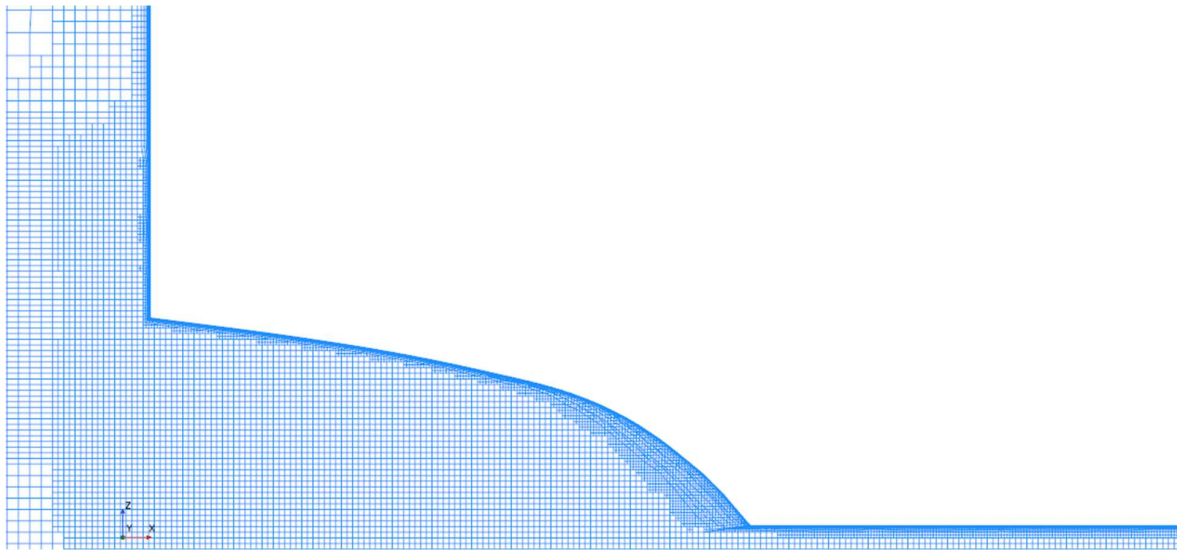
gdje je y polovina visine prve ćelije graničnog sloja [39].

Prema preporukama ITTC-a vrijednost parametra y^+ treba biti veća od 30 kako bi se strujanje opisalo logaritamskim profilom brzine [36] te manja od 1 kako bi se profil brzine opisao linearno što odgovara linearnom odnosno laminarnom podsloju.

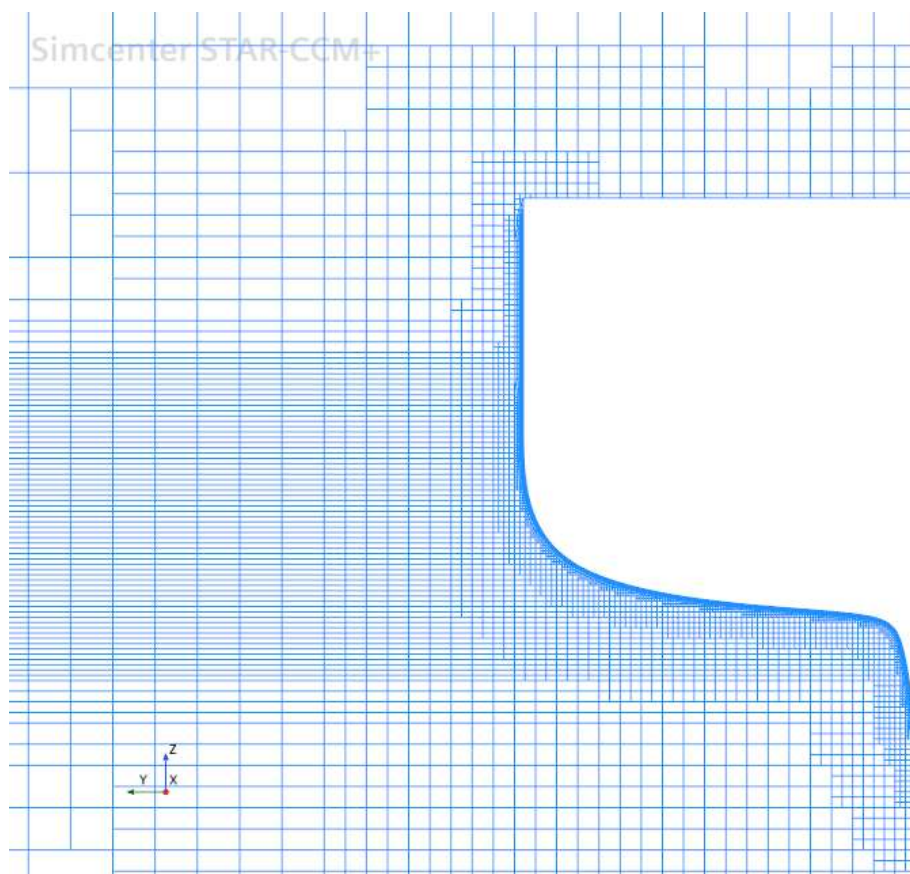
Za najpovoljniju formu broda sa stajališta ukupnog otpora, a s ciljem određivanja krivulje ukupnog otpora, numeričke simulacije provedene su za tri brzine putničkog broda, odnosno, uz projektnu brzinu od 11,5 čv dodatno su provedene numeričke simulacije za brzine od 10 i 12 čv.

Obzirom da visina prve ćelije u graničnom sloju ovisi o Reynoldsovom broju, a samim time i o brzini broda, kao što je vidljivo iz jednadžbe (31), nužno je prilagoditi sve parametre potrebne za diskretizaciju graničnog sloja ovisno o brzini. Parametri potrebni za diskretizaciju graničnog sloja oko trupa broda su debljina graničnog sloja, broj ćelija u graničnom sloju te faktor povećanja ćelija. Debljina graničnog sloja pri brzini od 10 čv iznosi 0,085 m, pri projektnoj brzini od 11,5 čv iznosi 0,0749 m, a pri brzini od 12 čv iznosi 0,0721 m. Broj ćelija u graničnom sloju jednak je za sve tri ispitane brzine te iznosi 11 kao i faktor povećanja ćelija koji iznosi 1,4.

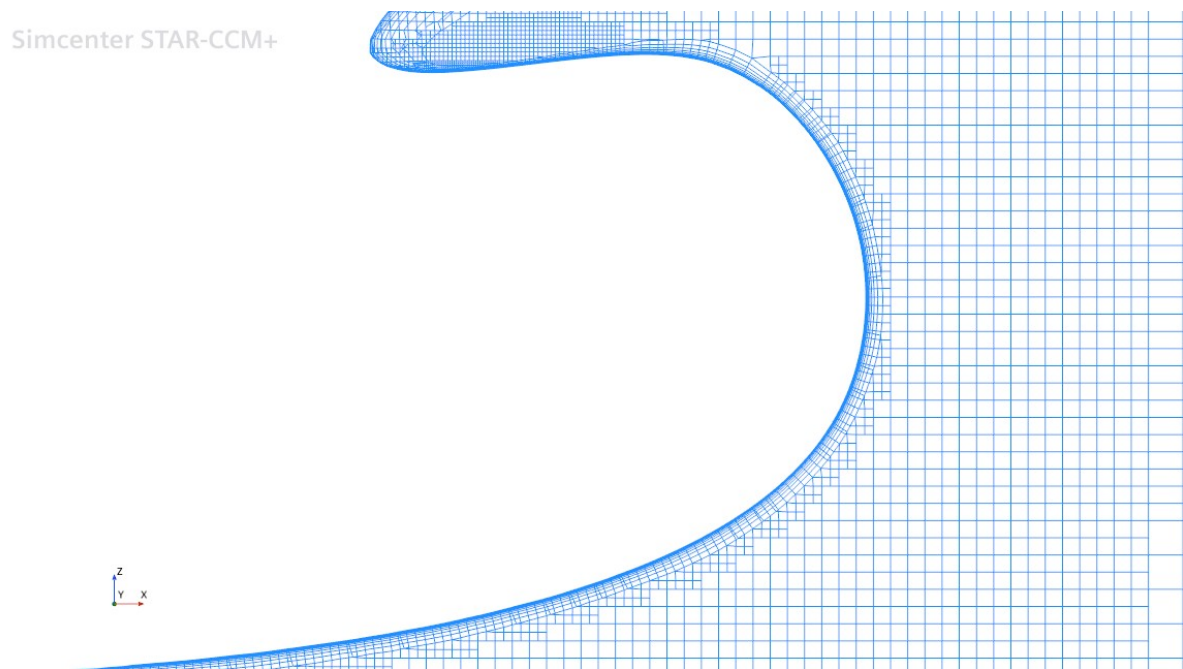
Prikaz diskretizacije graničnog sloja na pramčanom i krmenom dijelu broda pri projektnoj brzini od 11,5 čv dan je na slikama 10.-12.



Slika 10. Diskretizacija graničnog sloja na krmenom dijelu trupa broda



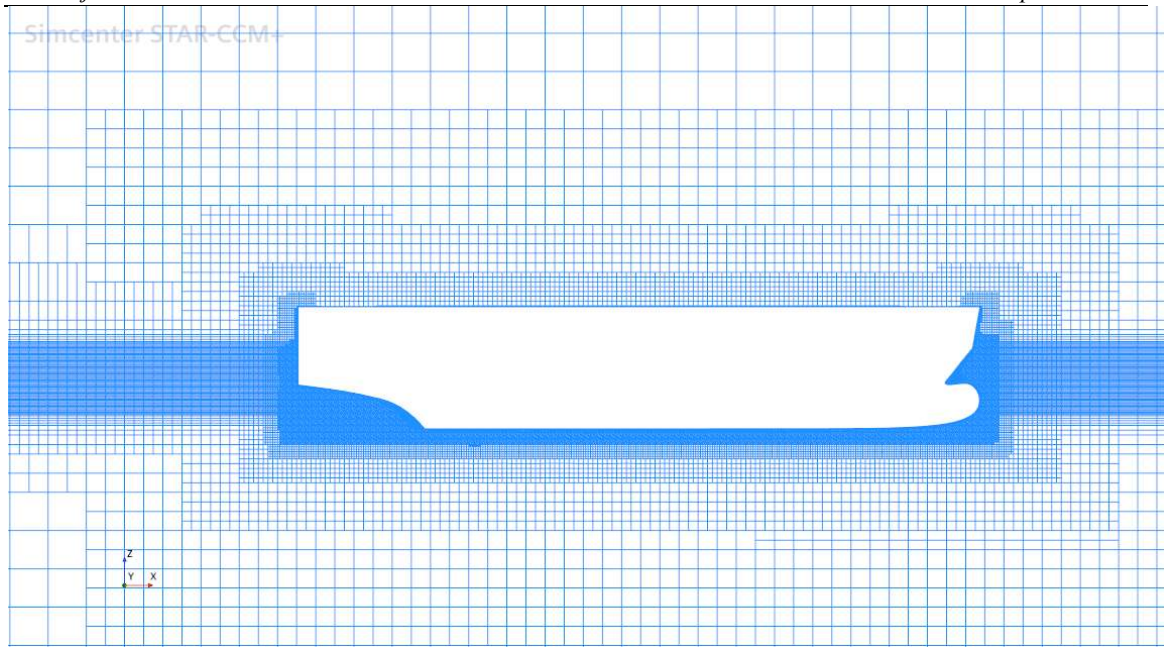
Slika 11. Diskretizacija graničnog sloja uz trup broda



Slika 12. Diskretizacija graničnog sloja na pramčanom dijelu trupa broda

6.5.2. Slobodna površina

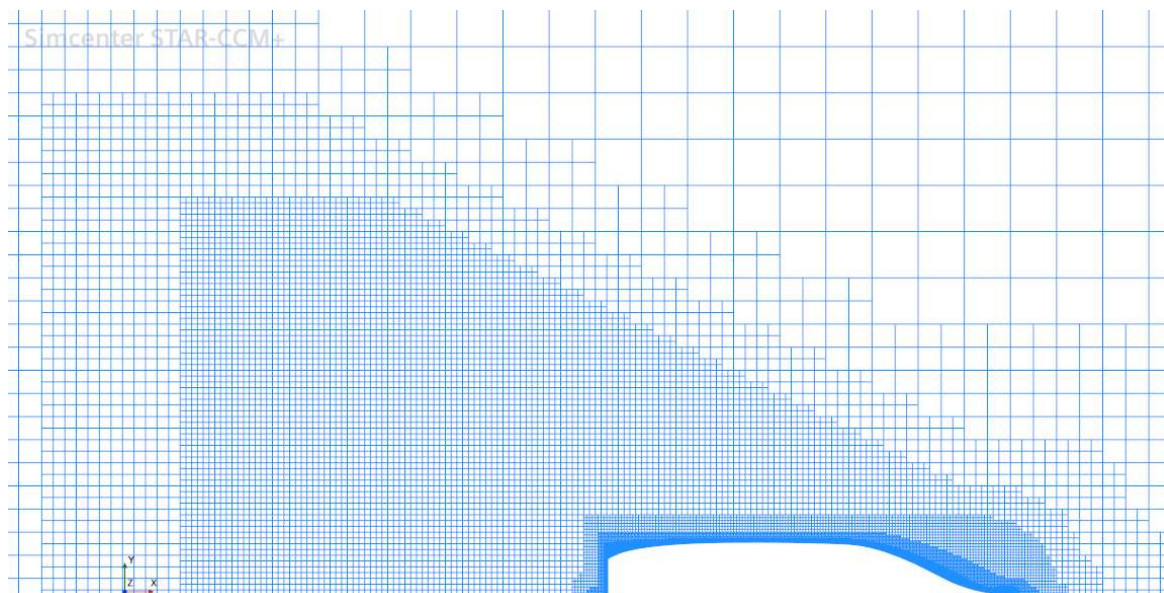
Slobodna površina, kao granično područje dvaju fluida, zahtjeva dodatno profinjenje. Obzirom da je slika valova rezultat promjene tlaka u blizini slobodne površine uslijed gibanja tijela kroz fluid dodatno profinjenje navedenog područja od iznimne je važnosti kako bi se dobila što točnija slika valova. Na slici 13. dan je prikaz diskretizacije slobodne površine.



Slika 13. Diskretizacija slobodne površine

6.5.3. Kelvinov kut

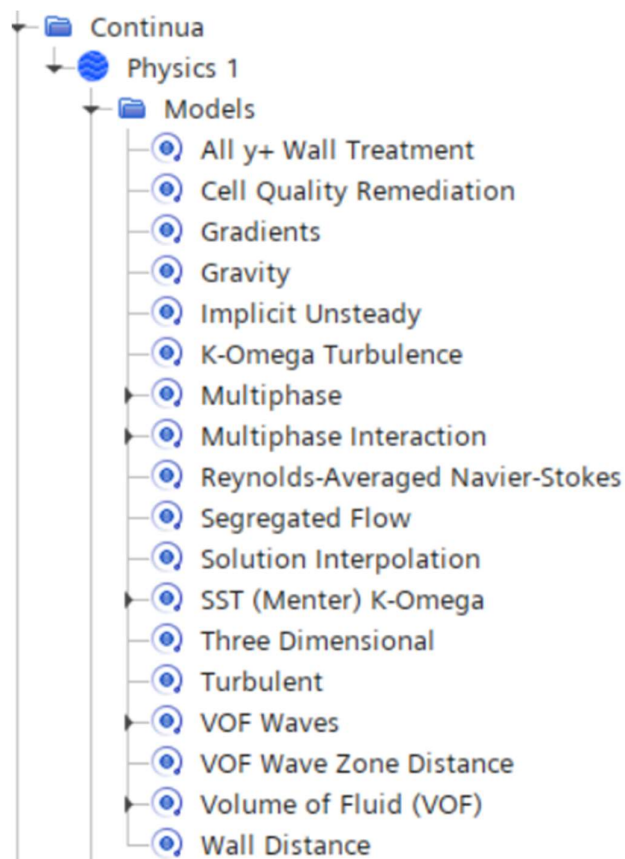
Sustav poprečnih i razilaznih valova stvara sliku valova omeđenu pravicima koji sa simetralnom ravninom broda zatvaraju kut θ koji iznosi $19^{\circ}28'$, a poznat je kao Kelvinov kut. Na slici 14. dan je prikaz diskretizacije područja Kelvinovog kuta.



Slika 14. Diskretizacija područja Kelvinovog kuta

6.6. Fizikalni model numeričke simulacije

Nakon diskretizacije proračunske domene potrebno je definirati fizikalni model numeričkih simulacija. Eulerovim višefaznim modelom (eng. *Eulerian Multiphase*) definirane su dvije faze, voda i zrak te su im pridružena svojstva konstantne gustoće i dinamičkog koeficijenta viskoznosti. Položaj slobodne površine definiran je pomoću VOF modela. Brzina nastrujavanja vode definirana je postavkama VOF valova (eng. *Flat VOF Waves*), a s ciljem sprječavanja refleksije valova o granice proračunske domene definirano je prigušenje VOF valova (eng. *Damping Wave Reflections*) s konstantnom vrijednosti duljine prigušenja (eng. *VOF wave damping length*) jednake duljini broda na ulaznoj, bočnoj i izlaznoj granici proračunske domene. Translacija u smjeru osi z i rotacija oko osi y , odnosno dva stupnja slobode gibanja, definirana su fizikalnim modelom dinamičke interakcije fluida i tijela (eng. *Dynamic Fluid Body Interaction*). Na slici 15. dan je prikaz odabranog fizikalnog modela.



Slika 15. Odabrani fizikalni model numeričke simulacije

6.7. Parametar rješavača

Za potrebe ovog rada, a prema [31], odabran je implicitni rješavač (eng. *Implicit Unsteady*) te je definiran vremenski korak kako slijedi:

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

gdje se period T određuje kao:

$$T = \frac{L_{PP}}{v} \quad (42)$$

Koeficijent c za fini vremenski korak iznosi 200, za srednji 100, a za grubi 50. Vidljivo je kako je vremenski korak ovisan o brzini. Sukladno tome, u tablici 6. dan je prikaz vrijednosti finog, srednjeg i grubog vremenskog koraka za projektnu brzinu broda.

Tablica 6. Vrijednosti vremenskog koraka za projektnu brzinu

Projektna brzina broda	Fini vremenski korak	Srednji vremenski korak	Grubi vremenski korak
11,5 čv	0,023 s	0,046 s	0,091 s

Podrelaksacijski faktori za brzinu i tlak definirani su s ciljem poboljšanja konvergencije rezultata te smanjivanja nestabilnosti rješenja uslijed značajnije promjene rješenja između koraka iteracije. Ako se u jednom koraku iterativnog postupka rješenje promjeni s φ_j^k na φ_j^{k+1} , tada se od ukupne promjene rješenja u trenutnom koraku iteracije uzima samo dio, tako da za vrijednost φ u čvoru C vrijedi [27]:

$$\varphi_C^{podr} = \varphi_C^k + \alpha(\varphi_C^{k+1} - \varphi_C^k) \quad (43)$$

gdje je α faktor podrelaksacije manji od 1. U ovom radu faktor podrelaksacije poprima vrijednost 0,5 za brzinu te 0,2 za tlak.

Kriterij zaustavljanja numeričke simulacije definiran je maksimalnim brojem unutarnjih iteracija koji iznosi 5, a fizikalno vrijeme ograničeno je na $20 T$.

7. ANALIZA REZULTATA

U ovom poglavlju dan je prikaz rezultata numeričkih simulacija viskoznog strujanja fluida oko trupa putničkog broda za početnu i modificirane forme broda u smislu promjene uzdužnog položaja težišta volumena istisnine te prizmatičkog koeficijenta. Procijenjena je numerička nesigurnost u određivanju ukupnog otpora, urona i kuta trima broda pri projektnoj brzini od 11,5 čv. Prikazane su vrijednosti ukupnog otpora, urona i kuta trima početne i modificiranih formi putničkog broda te je dan prikaz položaja slobodne površine duž trupa putničkog broda, slike valova, raspodjele hidrodinamičkog tlaka te tangencijalnih naprezanja po trupu broda.

7.1. Verifikacija rezultata

Postupak verifikacije numeričkih rezultata proveden je za projektnu brzinu broda od 11,5 čv na temelju različitih gustoća mreže i vremenskih koraka. U svrhu verifikacije rezultata dobivenih primjenom različitih gustoća mreže proračunske domene ispitane su tri mreže, fina, srednja i gruba mreža uz primjenu finog vremenskog koraka. S ciljem verifikacije rezultata dobivenih primjenom različitog vremenskog koraka ispitana su tri različita vremenska koraka, fini, srednji i grubi vremenski korak uz primjenu fine mreže. Ukupna numerička nesigurnost određena je na temelju numeričke nesigurnosti mreže i vremenskog koraka.

U tablicama 7. i 8. dan je prikaz vrijednosti ukupnog otpora dobivenih primjenom različitih vremenskih koraka i gustoće mreže kao i rezultati proračuna numeričke nesigurnosti. Proračuni su provedeni prema izrazima danim u potpoglavlju 5.6.

Tablica 7. Numerička nesigurnost ukupnog otpora dobivena primjenom različite gustoće mreže

$\hat{S}_{i,1}$, N	$\hat{S}_{i,2}$, N	$\hat{S}_{i,3}$, N	$\varepsilon_{i,21}$, N	$\varepsilon_{i,32}$, N	R_i	U_i	U_G , %
24739	24736	24736	-2,66	436,30	-0,0061	218,15	0,8818

Tablica 8. Numerička nesigurnost ukupnog otpora dobivena primjenom različitog vremenskog koraka

$\hat{S}_{i,1}$, N	$\hat{S}_{i,2}$, N	$\hat{S}_{i,3}$, N	$\varepsilon_{i,21}$, N	$\varepsilon_{i,32}$, N	R_i	U_i	U_T , %
24739	24575	24995	-163,67	419,83	-0,3899	209,91	0,8485

Prema podacima iz tablica 7. i 8. može se uočiti da je za ukupni otpor dobiven primjenom različite gustoće mreže i vremenskog koraka ostvarena oscilatorna konvergencija rezultata. Numeričke nesigurnosti iznose manje od 1 %.

U tablicama 9. i 10. dan je prikaz vrijednosti urona broda dobivenih primjenom različitih gustoća mreže i vremenskog koraka kao i rezultati proračuna numeričke nesigurnosti.

Tablica 9. Numerička nesigurnost urona dobivena primjenom različite gustoće mreže

$\hat{S}_{i,1}$, m	$\hat{S}_{i,2}$, m	$\hat{S}_{i,3}$, m	$\varepsilon_{i,21}$, m	$\varepsilon_{i,32}$, m	R_i	U_i	U_G , %
-0,1990	-0,1989	-0,1995	0,0001	-0,0006	-0,1771	0,0003	-0,1539

Tablica 10. Numerička nesigurnost urona dobivena primjenom različitog vremenskog koraka

$\hat{S}_{i,1}$, m	$\hat{S}_{i,2}$, m	$\hat{S}_{i,3}$, m	$\varepsilon_{i,21}$, m	$\varepsilon_{i,32}$, m	R_i	U_i	U_T , %
-0,1990	-0,1991	-0,2074	-0,0002	-0,0082	0,0197	0,0000	-0,0020

Prema podacima iz tablica 9. i 10. vidljivo je da je za uron broda dobiven primjenom različite gustoće mreže ostvarena oscilatorna konvergencija, dok je za različite vremenske korake dobivena monotona konvergencija rezultata. Numerička nesigurnost gustoće mreže veća je u odnosu na numeričku nesigurnost vremenskog koraka i iznosi oko 0,15 %.

U tablicama 11. i 12. dan je prikaz vrijednosti kuta trima broda dobivenih primjenom različitih gustoća mreže i vremenskih koraka kao i rezultati proračuna numeričke nesigurnosti te je vidljivo da je primjenom različite gustoće mreže i vremenskog koraka dobivena oscilatorna konvergencija. Numerička nesigurnost vremenskog koraka veća je u odnosu na numeričku nesigurnost gustoće mreže i iznosi oko 2,5 %.

Tablica 11. Numerička nesigurnost kuta trima dobivena primjenom različite gustoće mreže

$\hat{S}_{i,1}$, °	$\hat{S}_{i,2}$, °	$\hat{S}_{i,3}$, °	$\varepsilon_{i,21}$, °	$\varepsilon_{i,32}$, °	R_i	U_i	U_G , %
0,6267	0,6305	0,6238	0,0038	-0,0066	-0,5733	0,0033	0,5284

Tablica 12. Numerička nesigurnost kuta trima dobivena primjenom različitog vremenskog koraka

$\hat{S}_{i,1}, ^\circ$	$\hat{S}_{i,2}, ^\circ$	$\hat{S}_{i,3}, ^\circ$	$\varepsilon_{i,21}, ^\circ$	$\varepsilon_{i,32}, ^\circ$	R_i	U_i	$U_T, \%$
0,6267	0,6328	0,6017	0,0061	-0,0311	-0,1975	0,0156	2,4824

Ukupna numerička nesigurnost ukupnog otpora, urona i kuta trima broda izračunata je prema jednadžbi (34) te su vrijednosti prikazane u tablici 13. Može se primijetiti da je ukupna numerička nesigurnost kuta trima veća u odnosu na ukupne numeričke nesigurnosti ukupnog otpora i urona te iznosi oko 2,5 %. Vrijednost ukupne numeričke nesigurnosti za uron je najmanja te iznosi oko 0,15 %. Moguće je zaključiti kako su dobivene vrijednosti numeričkih nesigurnosti za sve tri fizikalne veličine zadovoljavajuće.

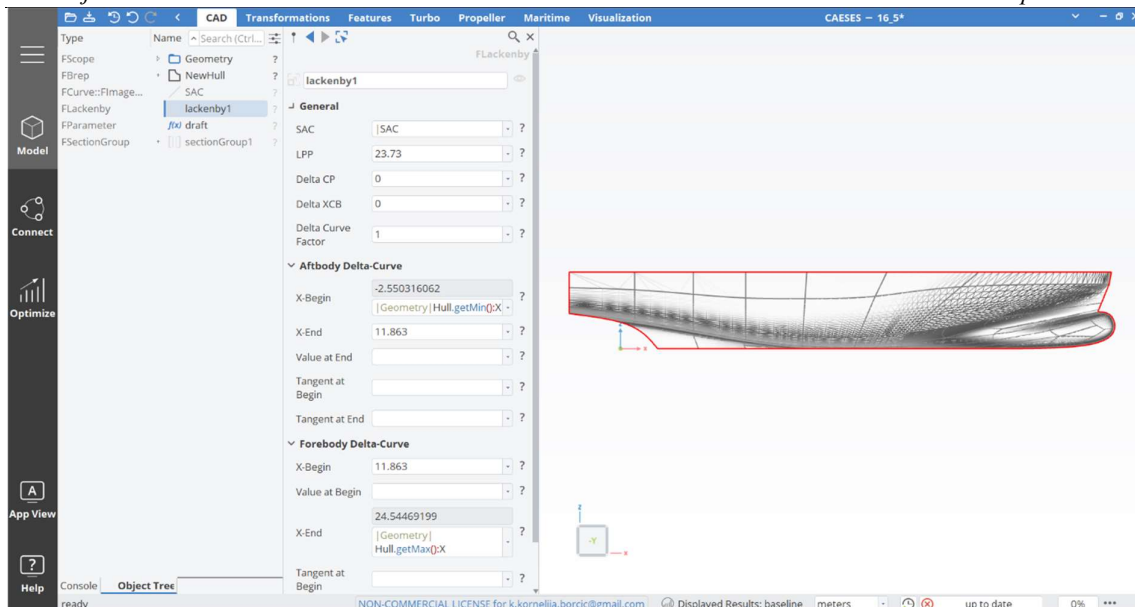
Tablica 13. Ukupna numerička nesigurnost ukupnog otpora, urona i kuta trima

	$U_G, \%$	$U_T, \%$	$U_{SN}, \%$
R_T, N	0,8818	0,8485	1,2238
Uron, m	-0,1539	-0,0020	0,1539
Kut trima, $^\circ$	0,5284	2,4824	2,5380

7.2. Usporedba rezultata ukupnog otpora, urona i kuta trima

CAESES (eng. *CAE System Empowering Simulation*) je računalno potpomognut inženjerski sustav čiji je krajnji cilj dizajniranje optimalnih proizvoda. Omogućuje automatizaciju postupaka, posebno u kontekstu generiranja geometrije. Neke od mogućnosti unutar programskog paketa CAESES su modeliranje geometrije, priprema modela za automatizirano generiranje mreže i CFD analizu, integracija programskih paketa za numeričke simulacije s ciljem optimizacije i slično [14].

Na slici 16. dan je prikaz sučelja programskog paketa CAESES s početnom formom putničkog broda.



Slika 16. Sučelje programskog paketa CAESES [14]

U okviru ovog rada korištena je verzija programskog paketa CAESES 5.2.6 unutar kojeg je promjena uzdužnog položaja težišta volumena istisnine izražena istisnine izražena postotnom duljinom između okomica, a ograničenja pomaka uzdužnog položaja težišta volumena istisnine definirana su od strane projektanta kao $\pm 1,6 \% L_{pp}$.

Promjena prizmatičkog koeficijenta unutar programskog paketa CAESES izražena je kao postotak u odnosu na početni prizmatički koeficijent, a ograničenja su određena prema Lackenbyjevoj metodi za geometrijsku modifikaciju forme broda [40] temeljim na određivanju ukupnog prizmatičkog koeficijenta kao aritmetičke sredine pramčanog i krmenog prizmatičkog koeficijenta.

Rezultati numeričkih simulacija provedenih za forme broda modificirane promjenom uzdužnog položaja težišta volumena istisnine i prizmatičkog koeficijenta uspoređeni su s rezultatima numeričkih simulacija za početnu formu broda, a relativna devijacija ukupnog otpora određena je na sljedeći način:

$$RD = \frac{R_{T_M} - R_{T_P}}{R_{T_P}} \cdot 100\% \quad (44)$$

gdje je:

RD – relativna devijacija,

R_{T_M} – ukupni otpor modificirane forme broda,

R_{T_p} – ukupni otpor početne forme broda.

Na isti način određene su i relativne devijacije za uron i kut trima. Usporedbom rezultata ukupnog otpora dobivenog za različite vrijednosti uzdužnog položaja težišta volumena istisnine moguće je uočiti da se smanjenje ukupnog otpora postiže za sve pomake uzdužnog položaja težišta volumena istisnine prema pramčanom dijelu broda osim za najveći ispitani pomak, tablica 14. Važno je napomenuti kako je prilikom promjene uzdužnog položaja težišta volumena istisnine zadržana početna vrijednost volumena istisnine. Najveće smanjenje ukupnog otpora od 2,11 % u odnosu na početnu formu dobiveno je za pomak uzdužnog položaja težišta volumena istisnine od 0,4 % L_{pp} . Najvećim pozitivnim pomakom (prema pramčanom dijelu broda) uzdužnog položaja težišta volumena istisnine unutar ograničenja, ukupni otpor se gotovo zanemarivo povećao za 0,57 %, dok je najveći pomak prema krmenom dijelu rezultirao povećanjem ukupnog otpora za 4,48 % u odnosu na ukupni otpor početne forme.

Tablica 14. Utjecaj uzdužnog položaja težišta volumena istisnine na ukupni otpor

$\Delta LCB, \%$	LCB, m	R_T, N	$RD, \%$
1,6	10,487	24879	0,57
1,2	10,393	24227	-2,07
0,8	10,299	24441	-1,20
0,4	10,205	24216	-2,11
0 (početni)	10,111	24739	/
-0,4	10,017	24787	0,20
-0,8	9,923	25301	2,27
-1,2	9,829	25523	3,17
-1,6	9,735	25847	4,48

U tablici 15. dana je usporedba utjecaja uzdužnog položaja težišta volumena istisnine na otpor tlaka R_p i otpor trenja R_f putničkog broda. Analizom prikazanih rezultata vidljivo je da pomakom uzdužnog položaja težišta volumena istisnine za 0,4 % L_{pp} dolazi do najvećeg smanjenja otpora tlaka za 2,94 % u odnosu na otpor tlaka početne forme. Također, moguće je uočiti da su promjene otpora trenja za sve ispitane pomake uzdužnog položaja težišta volumena istisnine zanemarivo male, odnosno manje su od dobivene numeričke nesigurnosti ukupnog

otpora. Nadalje, vidljivo je da uslijed najvećeg ispitanog pomaka uzdužnog položaja težišta volumena istisnine prema krmenom dijelu broda dolazi do najvećeg povećanja otpora tlaka za 6,52 % što je rezultiralo najvećim povećanjem ukupnog otpora kao što je vidljivo u tablici 14.

Tablica 15. Utjecaj uzdužnog položaja težišta volumena istisnine na otpor tlaka i otpor trenja

$LCB, \%$	R_p, N	$RD, \%$	R_f, N	$RD, \%$
1,6	17463	1,12	7418	-0,60
1,2	16776	-2,86	7451	-0,17
0,8	16974	-1,71	7467	0,04
0,4	16762	-2,94	7456	-0,10
0 (početni)	17270	/	7463	/
-0,4	17306	0,20	7483	0,26
-0,8	17819	3,18	7484	0,27
-1,2	18032	4,41	7489	0,34
-1,6	18396	6,52	7452	-0,16

Promjena prizmatičkog koeficijenta provedena je uz zadržavanje početne vrijednosti gaza broda i uzdužnog položaja težišta volumena istisnine, što je rezultiralo promjenom volumena istisnine broda. U tablici 16. dan je prikaz rezultata ukupnog otpora kao i vrijednosti volumena istisnine broda dobivenih promjenom prizmatičkog koeficijenta.

Usporedbom rezultata ukupnog otpora dobivenih promjenom prizmatičkog koeficijenta moguće je uočiti da povećanje prizmatičkog koeficijenta za 5 % rezultira smanjenjem ukupnog otpora za 1,43 % uz povećanje volumena istisnine za 4,96 % u odnosu na početnu formu. Ostale ispitanе promjene prizmatičkog koeficijenta rezultirale su povećanjem ukupnog otpora te je vidljivo da je smanjenje prizmatičkog koeficijenta za 10 % rezultiralo najvećim povećanjem ukupnog otpora za 13,79 % uz smanjenje volumena istisnine za 9,91 % u odnosu na početnu formu.

Tablica 16. Utjecaj prizmatičkog koeficijenta na ukupni otpor

$CP, \%$	CP	R_T, N	$RD, \%$	∇, m^3
10	0,62	25411	2,72	179,17
5	0,60	24385	-1,43	171,10

0 (početni)	0,57	24739	/	163,02
-5	0,54	25706	3,91	154,93
-10	0,51	28151	13,79	146,85

U tablici 17. dana je usporedba utjecaja prizmatičkog koeficijenta na otpor tlaka i otpor trenja putničkog broda. Analizom prikazanih rezultata vidljivo je da sve ispitane promjene prizmatičkog koeficijenta rezultiraju povećanjem otpora tlaka osim promjene prizmatičkog koeficijenta za 5 % kojom je postignuto smanjenje otpora tlaka za 2,62 % u odnosu na početnu formu što je rezultiralo smanjenjem ukupnog otpora. Nadalje, moguće je uočiti da se povećanjem prizmatičkog koeficijenta otpor trenja povećava. Iako se smanjenjem prizmatičkog koeficijenta otpor trenja smanjuje, dolazi do značajnijeg povećanja otpora tlaka što rezultira povećanjem ukupnog otpora.

Tablica 17. Utjecaj prizmatičkog koeficijenta na otpor tlaka i otpor trenja

$CP, \%$	R_p, N	$RD, \%$	R_f, N	$RD, \%$
10	17774	2,92	7638	2,33
5	16817	-2,62	7567	1,39
0 (početni)	17270	/	7463	/
-5	18705	8,31	7379	-1,13
-10	20888	20,95	7261	-2,72

Analizom dobivenih rezultata urona prikazanih u tablici 18. vidljivo je da svi ispitani pomaci uzdužnog položaja težišta volumena istisnine prema pramčanom dijelu broda rezultiraju smanjenjem urona broda, dok svi ispitani pomaci uzdužnog položaja težišta volumena istisnine prema krmenom dijelu broda rezultiraju povećanim uronom. Najveći ispitani pomak uzdužnog položaja težišta volumena istisnine prema pramčanom dijelu broda rezultira smanjenjem urona za 2,65 %, dok najveći ispitani pomak prema krmenom dijelu broda rezultira povećanjem urona za 3,17 % u odnosu na početnu formu. Dodatnim uronom povećava se oplakana površina broda što doprinosi povećanju ukupnog otpora kao što je i vidljivo iz analize rezultata ukupnog otpora danih u tablici 14.

Tablica 18. Utjecaj uzdužnog položaja težišta volumena istisnine na uron

<i>LCB, %</i>	<i>z, m</i>	<i>RD, %</i>
1,6	-0,1937	-2,65
1,2	-0,1955	-1,73
0,8	-0,1965	-1,24
0,4	-0,1958	-1,61
0 (početni)	-0,1990	/
-0,4	-0,2004	0,72
-0,8	-0,2014	1,23
-1,2	-0,2036	2,31
-1,6	-0,2053	3,17

Nadalje, analizom rezultata urona dobivenih za forme modificirane promjenom prizmatičkog koeficijenta prikazanih u tablici 19. jasno je vidljivo da je povećanje prizmatičkog koeficijenta za 10 % rezultiralo najvećim smanjenjem urona za 2,68 %, dok je smanjenje prizmatičkog koeficijenta za 10 % rezultiralo najvećim povećanjem urona za 6,22 % u odnosu na početnu formu. Dodatnim uronom povećava se oplakana površina broda što doprinosi povećanju ukupnog otpora kao što je i vidljivo iz analize rezultata ukupnog otpora danih u tablici 16.

Tablica 19. Utjecaj prizmatičkog koeficijenta na uron

<i>CP, %</i>	<i>z, m</i>	<i>RD, %</i>
10	-0,1936	-2,68
5	-0,1953	-1,86
0 (početni)	-0,1990	/
-5	-0,2024	1,73
-10	-0,2113	6,22

U tablici 20. dan je prikaz utjecaja uzdužnog položaja težišta volumena istisnine na kut trima. Moguće je uočiti da se za sve ispitane pomake uzdužnog položaja težišta volumena istisnine prema pramčanom dijelu broda kut trima povećava, što je u skladu s očekivanjima obzirom na izražen kut trima pri početnom položaju težišta volumena istisnine koje se nalazi iza glavnog

rebra broda. U skladu s navedenim, pomakom uzdužnog položaja težišta volumena istisnine prema krmenom dijelu broda kut trima se smanjuje. Najveće smanjenje kuta trima od 30,36 % u odnosu na početnu formu postignuto je za najveći ispitani pomak uzdužnog položaja težišta volumena istisnine prema krmenom dijelu broda.

Tablica 20. Utjecaj uzdužnog položaja težišta volumena istisnine na kut trima

$LCB, \%$	$t, ^\circ$	$RD, \%$
1,6	0,77	22,71
1,2	0,75	20,42
0,8	0,70	11,86
0,4	0,67	7,68
0 (početni)	0,63	/
-0,4	0,59	-6,45
-0,8	0,53	-15,04
-1,2	0,50	-20,98
-1,6	0,44	-30,36

Analiza utjecaja prizmatičkog koeficijenta na kut trima pokazuje da su sva ispitana povećanja prizmatičkog koeficijenta rezultirala smanjenjem kuta trima te da je najveće smanjenje od 48,98 % postignuto povećanjem prizmatičkog koeficijenta za 10 %, tablica 21. Za sve ispitane vrijednosti prizmatičkog koeficijenta manje od početne kut trima se povećava te iznosi gotovo 0,92° za formu broda s 10 % manjim prizmatičkim koeficijentom u odnosu na početni.

Tablica 21. Utjecaj prizmatičkog koeficijenta na kut trima

$CP, \%$	$t, ^\circ$	$RD, \%$
10	0,32	-48,98
5	0,48	-22,80
0 (početni)	0,63	/
-5	0,79	26,55
-10	0,92	46,17

7.3. Usporedba ukupnog otpora, urona i kuta trima najpovoljnije forme broda sa stajališta ukupnog otpora za tri brzine

S ciljem određivanja krivulje otpora za najpovoljniju formu sa stajališta ukupnog otpora, provedene su dodatne numeričke simulacije pri brzinama od 10 i 12,5 čv. Dobiveni rezultati ukupnog otpora, urona i kuta trima prikazani su u tablici 22. te je moguće uočiti da se smanjenjem brzine na 10 čv postiže smanjenje ukupnog otpora za 52,82 % u odnosu na ukupni otpor za projektnu brzinu. Također, pri istoj brzini uron i kut trima putničkog broda manji su za 27,68 %, odnosno 9,71 % u odnosu na odgovarajuće vrijednosti za projektnu brzinu.

Nadalje, povećanjem brzine na 12 čv ukupni otpor broda povećava se za 35,3 %, uron za 10,97 %, a kut trima smanjuje se za 19,02 % u odnosu na odgovarajuće vrijednosti pri projektnoj brzini. Zanimljivo je uočiti da se pri obje brzine kut trima smanjuje u odnosu na kut trima pri projektnoj brzini.

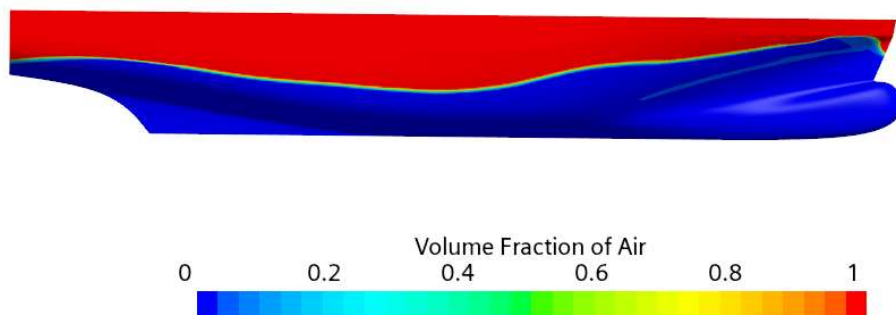
Tablica 22. Ukupni otpor, uron i kut trima za tri ispitane brzine

Brzina, čv	R_T , N	z , m	t , °
10	11425	-0,1416	0,6093
11,5	24216	-0,1958	0,6748
12	32765	-0,2173	0,5465

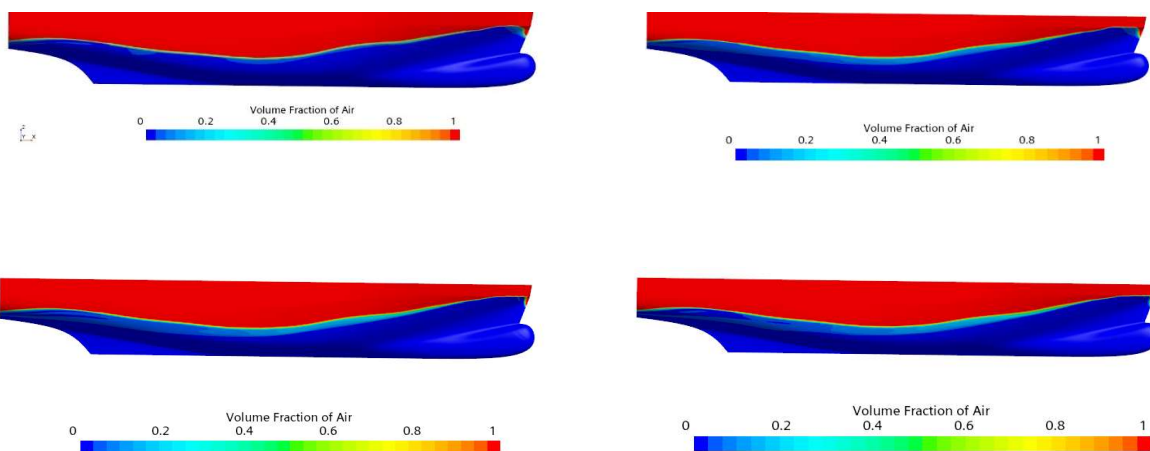
7.4. Položaj slobodne površine duž trupa putničkog broda

Na slikama 17.-20. dan je prikaz slobodne površine duž trupa početne forme putničkog broda te modificiranih formi broda s različitim vrijednostima uzdužnog položaja težišta volumena istisnine i prizmatičkog koeficijenta. Položaj slobodne površine duž trupa broda određen je na temelju volumnog udjela zraka u pojedinoj ćeliji. Ukoliko je vrijednost volumnog udjela zraka u ćeliji jednaka jedan volumen je ispunjen zrakom, što je na slikama prikazano crvenom bojom, a ukoliko je jednaka nuli volumen je ispunjen vodom, što je na slikama prikazano plavom bojom.

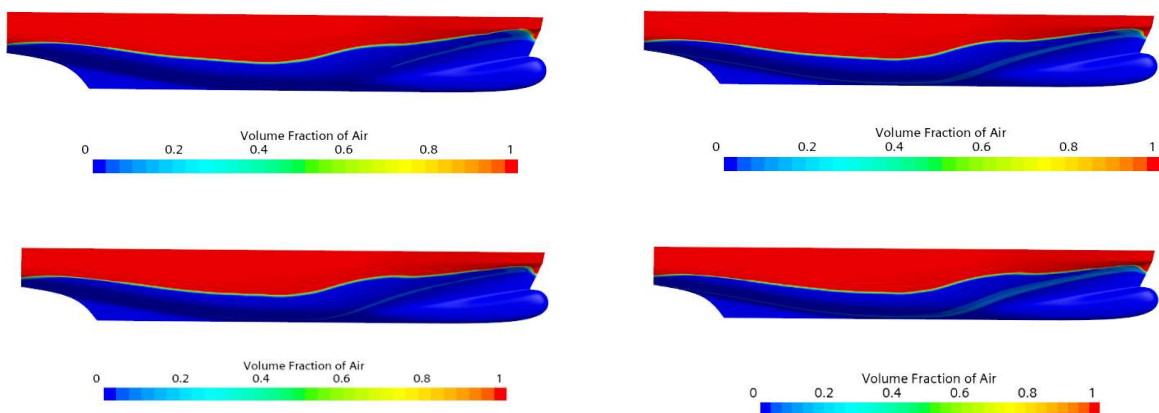
U odnosu na slobodnu površinu duž trupa početne forme broda, pomicanjem uzdužnog položaja težišta volumena istisnine prema pramcu povećava se valna elevacija pramčanog vala, posebice za pomake od 1,2 % L_{pp} i 1,6 % L_{pp} . Pomicanjem uzdužnog položaja težišta volumena istisnine prema krmi jasno je vidljiva promjena u sustavu valova pramčanog ramena, koja se očituje izraženim valnim brijegom.



Slika 17. Slobodna površina duž trupa početne forme putničkog broda

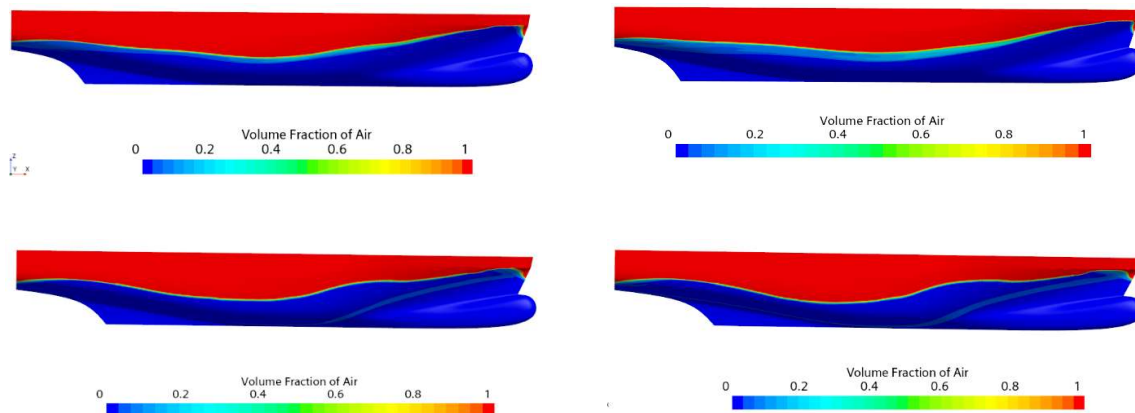


Slika 18. Slobodna površina duž trupa putničkog broda za $\Delta LCB = 0,4\%$ (gore lijevo), $\Delta LCB = 0,8\%$ (gore desno), $\Delta LCB = 1,2\%$ (dolje lijevo) i $\Delta LCB = 1,6\%$ (dolje desno)



Slika 19. Slobodna površina duž trupa putničkog broda za $\Delta LCB = -0,4\%$ (gore lijevo), $\Delta LCB = -0,8\%$ (gore desno), $\Delta LCB = -1,2\%$ (dolje lijevo) i $\Delta LCB = -1,6\%$ (dolje desno)

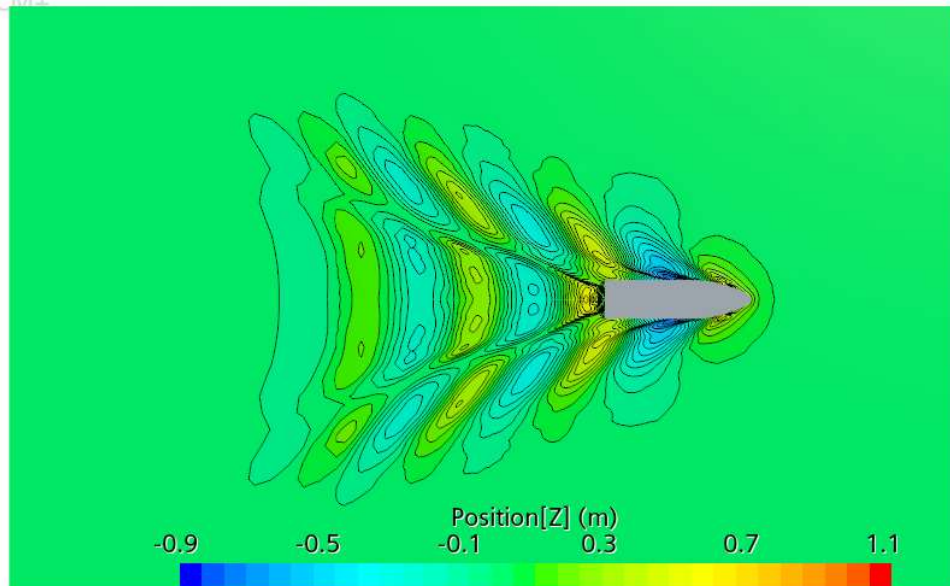
Izraženiji valni brijeg sustava valova pramčanog ramena moguće je uočiti i kod modificiranih formi broda s manjim vrijednostima prizmatičkog koeficijenta u odnosu na prizmatički koeficijent početne forme. Također je vidljivo pomicanje položaja valnog dola prema krmenom dijelu broda.



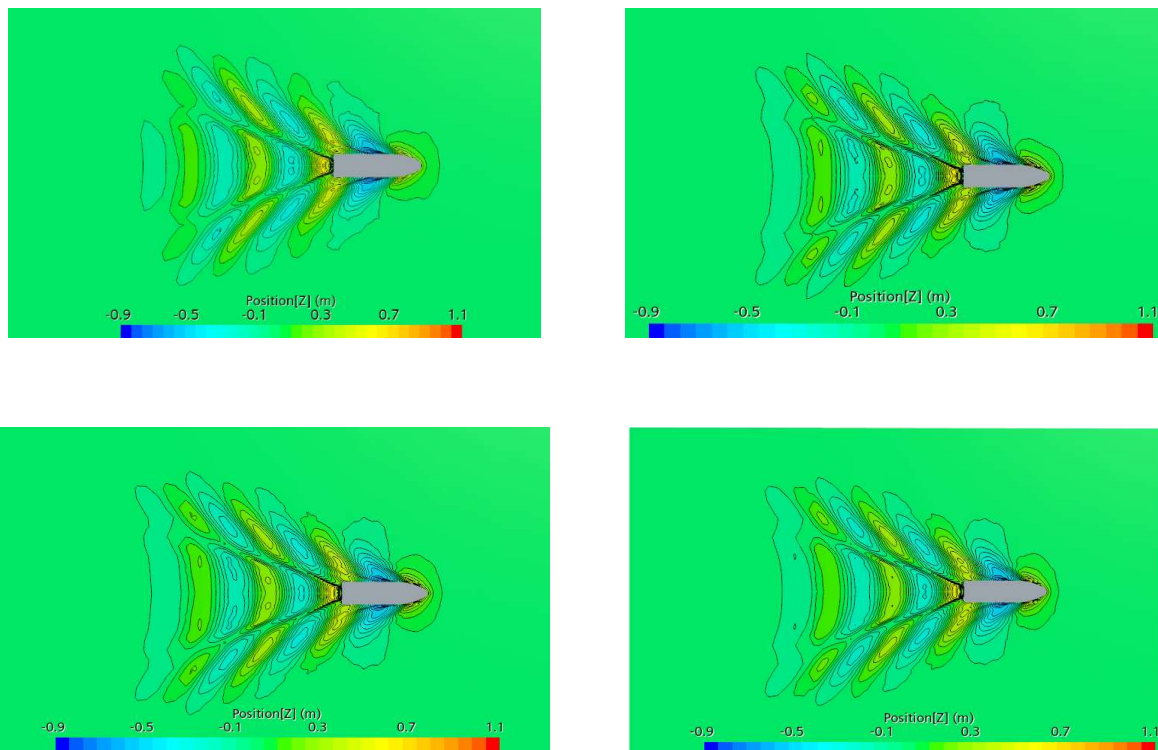
Slika 20. Slobodna površina duž trupa putničkog broda za $\Delta C_p = 5\%$ (gore lijevo), $\Delta C_p = 10\%$ (gore desno), $\Delta C_p = -5\%$ (dolje lijevo) i $\Delta C_p = -10\%$ (dolje desno)

7.5. Slika valova

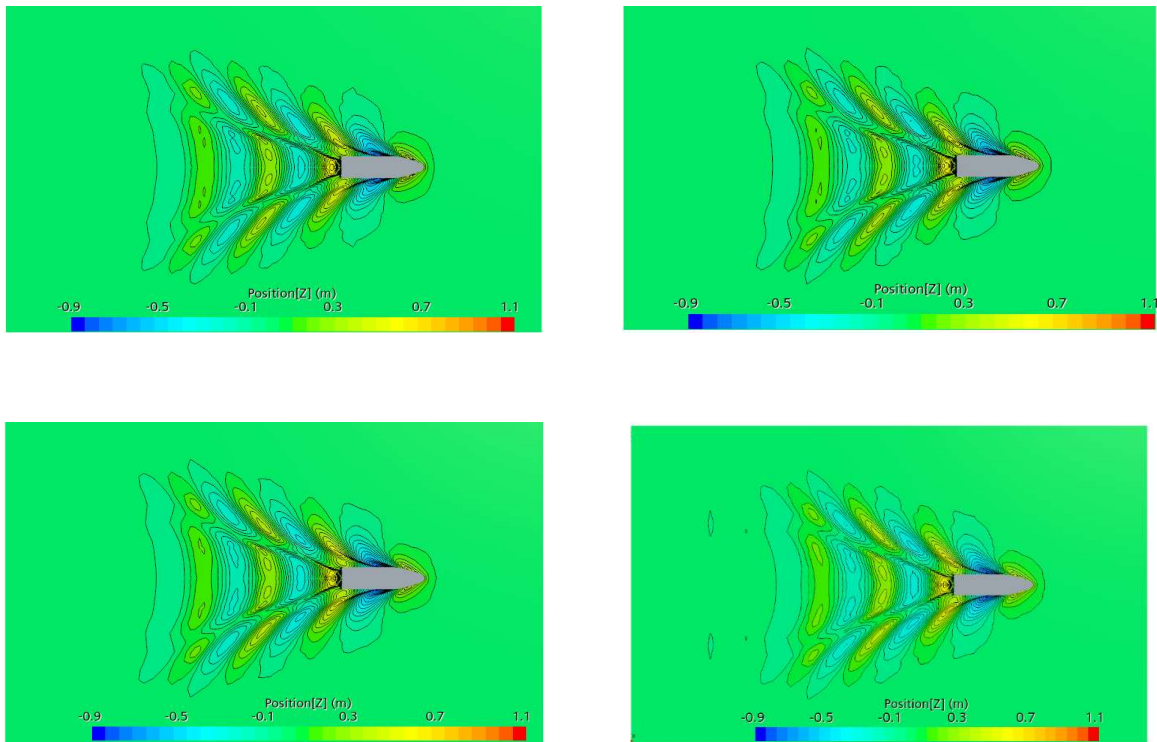
Slike valova oko početne forme putničkog broda te modificiranih formi broda s različitim vrijednostima uzdužnog položaja težišta volumena istisnine i prizmatičkog koeficijenta prikazane su na slikama 21.-24. Jasno je vidljiv sustav poprečnih i razilaznih valova kao i Kelvinov kut u iznosu od $19^{\circ}28'$. U odnosu na sliku valova oko početne forme putničkog broda pomicanje uzdužnog položaja težišta volumena istisnine nije uzrokovalo značajnije promjene u valnim elevacijama. S druge strane, smanjenjem prizmatičkog koeficijenta vidljive su veće valne elevacije u odnosu na valne elevacije početne forme broda, što je u konačnici rezultiralo povećanjem otpora tlaka kod tih formi broda.



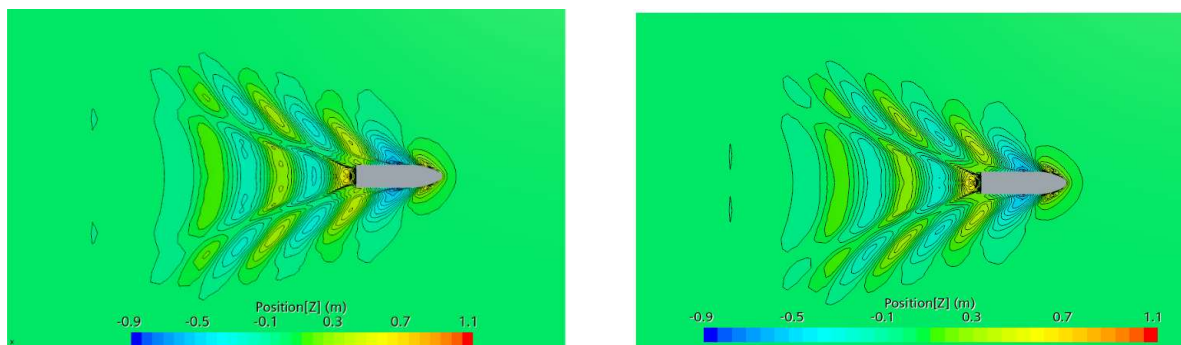
Slika 21. Slika valova oko početne forme putničkog broda

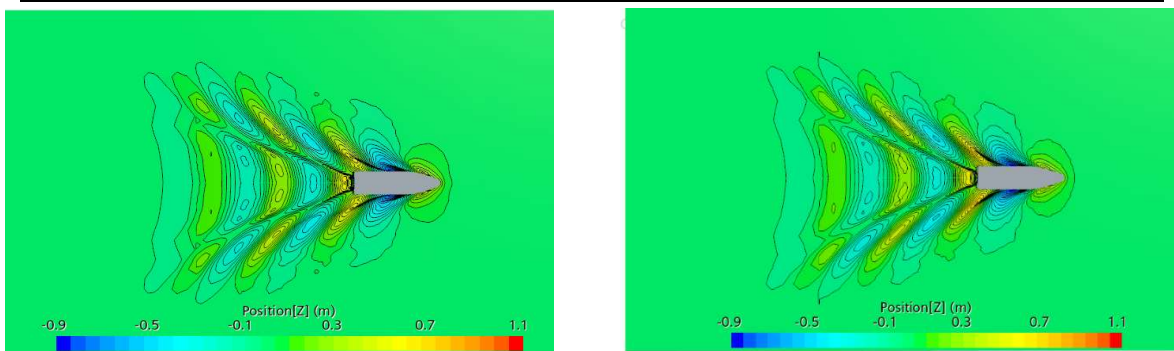


Slika 22. Slika valova oko trupa putničkog broda za $\Delta LCB = 0,4\%$ (gore lijevo), $\Delta LCB = 0,8\%$ (gore desno), $\Delta LCB = 1,2\%$ (dolje lijevo) i $\Delta LCB = 1,6\%$ (dolje desno)



Slika 23. Slika valova oko trupa putničkog broda za $\Delta LCB = -0,4\%$ (gore lijevo), $\Delta LCB = -0,8\%$ (gore desno), $\Delta LCB = -1,2\%$ (dolje lijevo) i $\Delta LCB = -1,6\%$ (dolje desno)

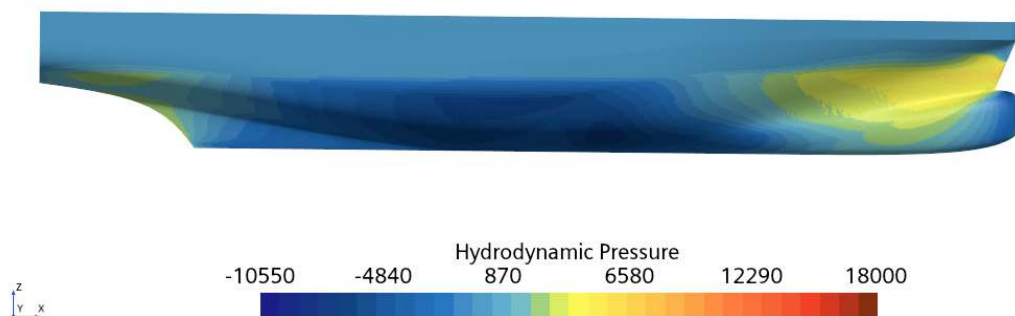




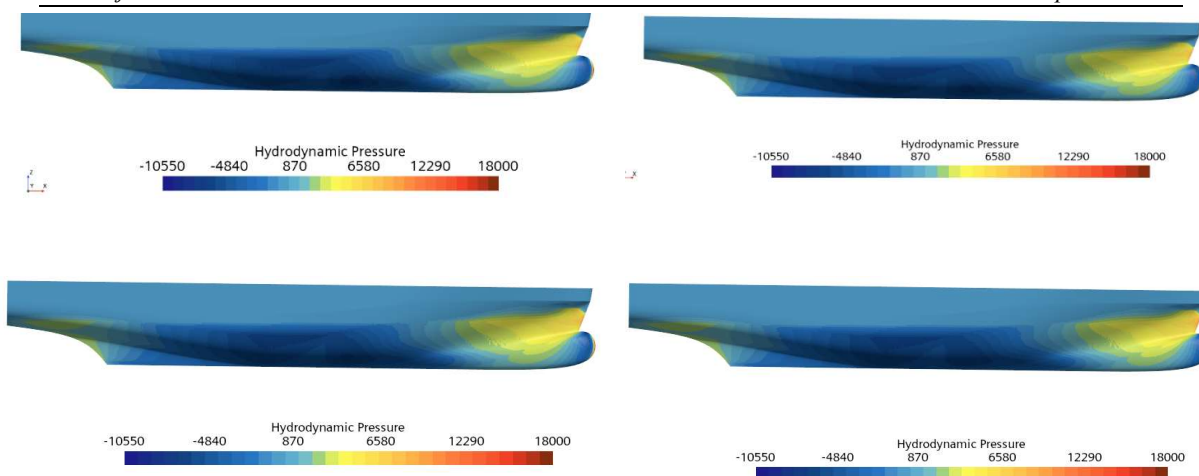
Slika 24. Slika valova oko trupa putničkog broda za $\Delta C_p = 5\%$ (gore lijevo), $\Delta C_p = 10\%$ (gore desno), $\Delta C_p = -5\%$ (dolje lijevo) i $\Delta C_p = -10\%$ (dolje desno)

7.6. Hidrodinamički tlak

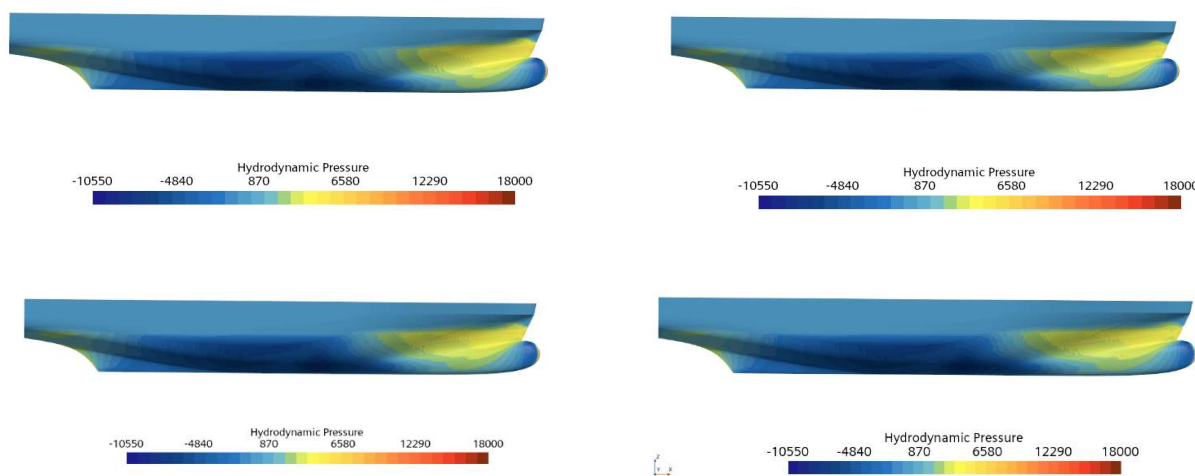
Na slikama 27.-29. dan je prikaz raspodjele hidrodinamičkog tlaka po trupu početne forme putničkog broda te modificiranih formi broda s različitim vrijednostima uzdužnog položaja težišta volumena istisnine. Područje visokog tlaka na pramčanom bulbu uzrokuje stvaranje pramčanog vala koji započinje valnim brijegom što je moguće uočiti na slikama danim u potpoglavljju 7.4. Također je vidljivo kako pomicanje uzdužnog položaja težišta volumena istisnine prema krmenom dijelu broda uzrokuje povećanje područja djelovanja pretlaka na pramčanom dijelu forme broda u odnosu na područje djelovanja pretlaka početne forme broda, slika 27., što u konačnici rezultira povećanjem otpora tlaka.



Slika 25. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka po trupu početne forme putničkog broda

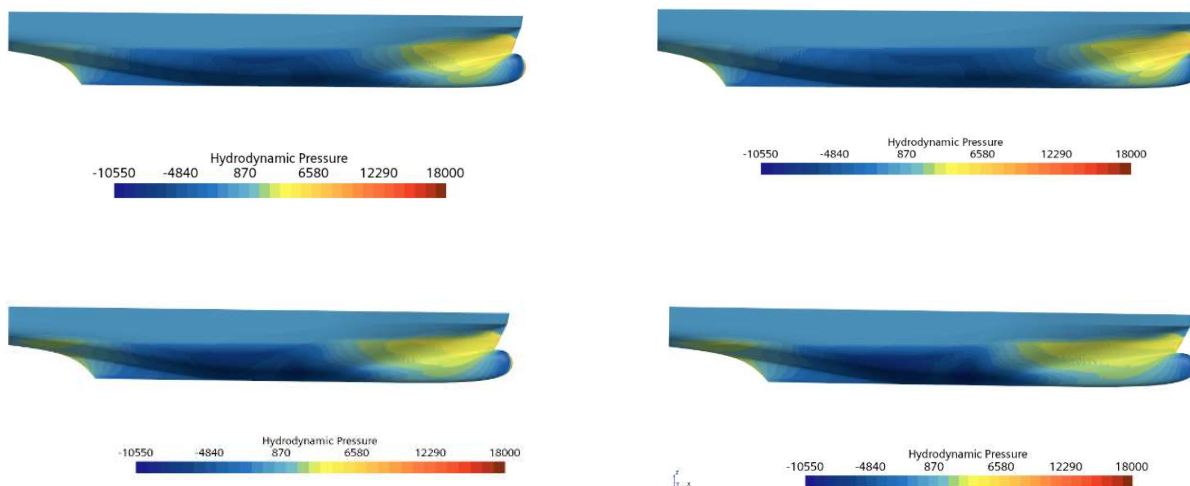


Slika 26. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka po trupu putničkog broda za $\Delta LCB = 0,4\%$ (gore lijevo), $\Delta LCB = 0,8\%$ (gore desno), $\Delta LCB = 1,2\%$ (dolje lijevo) i $\Delta LCB = 1,6\%$ (dolje desno)



Slika 27. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka po trupu putničkog broda za $\Delta LCB = -0,4\%$ (gore lijevo), $\Delta LCB = -0,8\%$ (gore desno), $\Delta LCB = -1,2\%$ (dolje lijevo) i $\Delta LCB = -1,6\%$ (dolje desno)

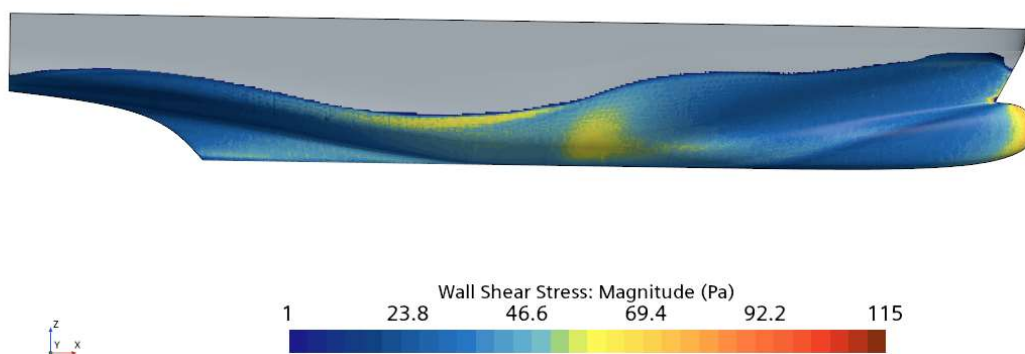
Nadalje, smanjenjem prizmatičkog koeficijenta također je moguće uočiti povećanje područja visokog tlaka na pramčanom dijelu forme broda, kao i povećanje pretlaka u istom području za formu broda s $\Delta C_p = 10\%$ u odnosu na početnu formu broda, slika 28.



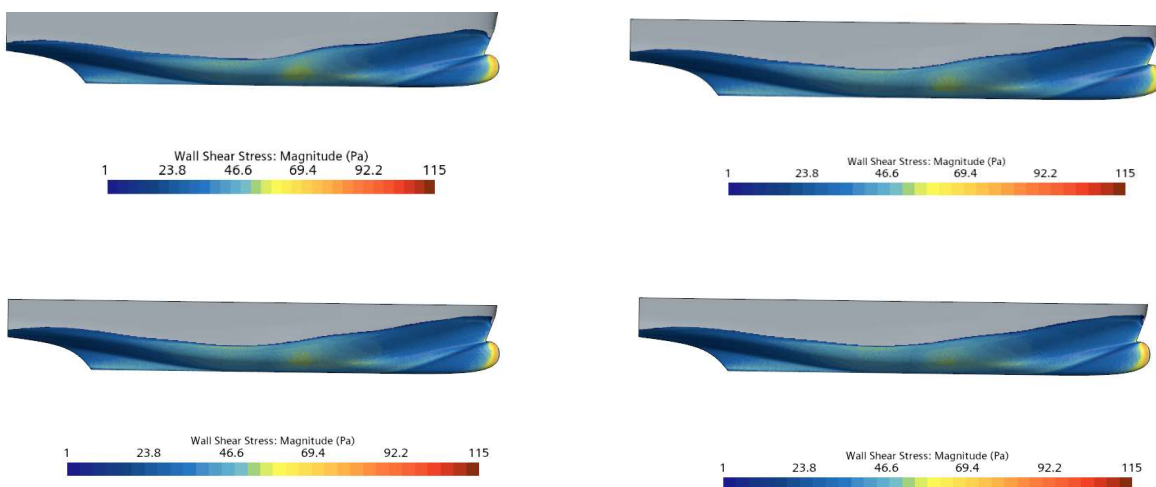
Slika 28. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka po trupu putničkog broda za $\Delta C_p = 5\%$ (gore lijevo), $\Delta C_p = 10\%$ (gore desno), $\Delta C_p = -5\%$ (dolje lijevo) i $\Delta C_p = -10\%$ (dolje desno)

7.7. Tangencijalna naprezanja

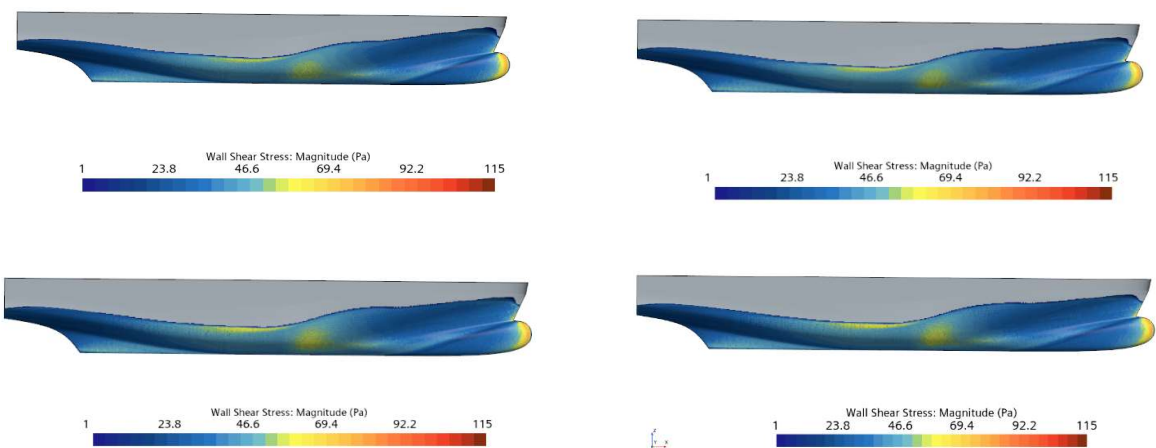
Na slikama 29.-31. dan je prikaz raspodjele tangencijalnih naprezanja po trupu početne forme putničkog broda te modificiranih formi broda s različitim vrijednostima uzdužnog položaja težišta volumena istisnine. Pomakom uzdužnog položaja težišta volumena istisnine prema pramčanom dijelu broda moguće je uočiti smanjenje tangencijalnih naprezanja na središnjem dijelu trupa broda. S obzirom da nema značajnijih promjena u tangencijalnim naprezanjima s pomakom uzdužnog položaja težišta volumena istisnine, nema ni značajnijih promjena u otporu trenja modificiranih formi broda u odnosu na otpor početne forme.



Slika 29. Raspodjela tangencijalnih naprezanja po trupu početne forme putničkog broda



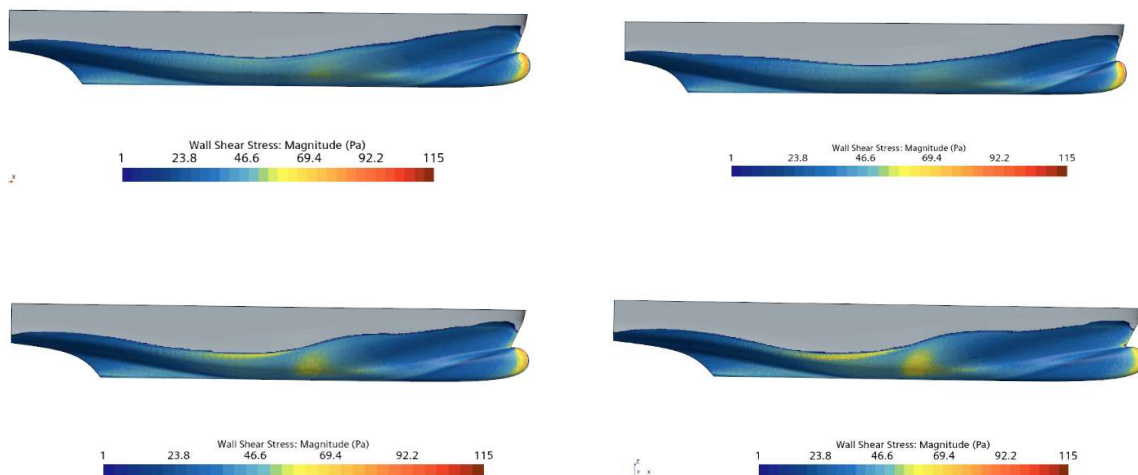
Slika 30. Raspodjela tangencijalnih napreznja po trupu putničkog broda za $\Delta LCB = 0,4\%$ (gore lijevo), $\Delta LCB = 0,8\%$ (gore desno), $\Delta LCB = 1,2\%$ (dolje lijevo) i $\Delta LCB = 1,6\%$ (dolje desno)



Slika 31. Raspodjela tangencijalnih napreznja po trupu putničkog broda za $\Delta LCB = -0,4\%$ (gore lijevo), $\Delta LCB = -0,8\%$ (gore desno), $\Delta LCB = -1,2\%$ (dolje lijevo) i $\Delta LCB = -1,6\%$ (dolje desno)

Na slici 32. prikazana je raspodjela tangencijalnih napreznja po trupu modificirane forme broda s promijenjenim prizmatičkim koeficijentom. Moguće je uočiti manje vrijednosti tangencijalnih napreznja na središnjem dijelu trupa broda kod formi broda s povećanim prizmatičkim koeficijentom. Unatoč tome, otpor trenja poprima veće vrijednosti u odnosu na otpor trenja početne forme kao što je vidljivo iz tablice 17. Razlog tome je povećanje vrijednosti dinamičke oplakane površine broda u odnosu na početnu vrijednost. Analogno tome,

zmanjenjem prizmatičkog koeficijenta dolazi do porasta tangencijalnih naprezanja na središnjem dijelu trupa broda te smanjenja otpora trenja uslijed manjih vrijednosti dinamičke oplakane površine u odnosu na početnu vrijednost. Naime, promjenom prizmatičkog koeficijenta za 5 % oplakana površina mijenja se za oko 1 % u odnosu na početnu vrijednost, dok se promjenom prizmatičkog koeficijenta od 10 % oplakana površina mijenja za oko 2,1 % u odnosu na početnu vrijednost.



Slika 32. Raspodjela tangencijalnih naprezanja po trupu putničkog broda za $\Delta C_p = 5\%$ (gore lijevo), $\Delta C_p = 10\%$ (gore desno), $\Delta C_p = -5\%$ (dolje lijevo) i $\Delta C_p = -10\%$ (dolje desno)

8. ZAKLJUČAK

U okviru ovog rada provedene su numeričke simulacije s ciljem određivanja utjecaja uzdužnog položaja težišta volumena istisnine kao i utjecaja prizmatičkog koeficijenta na ukupni otpor, uron i kut trima putničkog broda pri projektnoj brzini. Numeričke simulacije su provedene u programskom paketu za računalnu dinamiku fluida STAR – CCM+, a modifikacija forme putničkog broda provedena je u programskom paketu CAESES. Dan je pregled dosadašnjih istraživanja vezanih uz modifikaciju i optimizaciju forme broda te je ukratko opisan utjecaj uzdužnog položaja težišta volumena istisnine kao i utjecaj prizmatičkog koeficijenta na ukupni otpor broda. Prikazan je matematički model temeljen na RANS jednadžbama i $k-\omega$ SST modelu turbulencije. Diskretizacija proračunske domene provedena je na temelju metode konačnih volumena, a metoda udjela fluida u volumenu primijenjena je pri određivanju položaja slobodne površine. Proveden je postupak verifikacije rezultata te je proračunata ukupna numerička nesigurnost ukupnog otpora, urona i kuta trima putničkog broda. Postupak verifikacije proveden je za početnu formu broda pri projektnoj brzini od 11,5 čv. Dobivena je ukupna numerička nesigurnost od 1,22 % za ukupni otpor, 0,15 % za uron te 2,54 % za kut trima.

Granične vrijednosti pomaka uzdužnog položaja težišta volumena istisnine prilikom modifikacije forme definirane su od strane tvrtke Flow Ship Design d.o.o. kao $\pm 1,6\%$ L_{pp} , a granične vrijednosti prizmatičkog koeficijenta određene su prema Lackenbyjevoj metodi za geometrijsku modifikaciju forme broda.

Usporedbom rezultata ukupnog otpora, urona i kuta trima formi broda dobivenih variranjem uzdužnog položaja težišta volumena istisnine moguće je zaključiti da je za pomake od 0,4 % L_{pp} , 0,8 % L_{pp} te 1,2 % L_{pp} prema pramčanom dijelu broda moguće postići smanjenje ukupnog otpora. Najveće smanjenje ukupnog otpora u iznosu od 2,11 % u odnosu na ukupni otpor početne forme putničkog broda postignuto je pri pomaku od 0,4 % L_{pp} . Također, svi pomaci uzdužnog položaja težišta volumena istisnine prema pramčanom dijelu broda rezultirali su smanjenjem urona broda.

Pomicanjem uzdužnog položaja težišta volumena istisnine prema krmenom dijelu broda dolazi do povećanja ukupnog otpora i urona, ali i do smanjenja kuta trima broda. Najveće smanjenje kuta trima iznosi 30,36 % u odnosu na kut trima početne forme, a postignuto je za najveći ispitan pomak prema krmenom dijelu broda.

Nadalje, usporedbom rezultata ukupnog otpora, urona i kuta trima formi broda dobivenih variranjem prizmatičkog koeficijenta moguće je zaključiti kako je smanjenje ukupnog otpora za 1,43 % postignuto povećanjem prizmatičkog koeficijenta za 5 % uz povećanje volumena istisnine broda za 4,96 %. Također, navedenim povećanjem prizmatičkog koeficijenta postignuto je i smanjenje urona za 1,86 %, kao i smanjenje kuta trima za 22,8 % u odnosu na vrijednosti za početnu formu putničkog broda. Ostale promjene prizmatičkog koeficijenta rezultirale su povećanjem ukupnog otpora. Povećanje prizmatičkog koeficijenta od 10 % rezultiralo je najvećim smanjenjem urona u iznosu od 2,68 %, kao i najvećim smanjenjem kuta trima od 48,98 % u odnosu na vrijednosti za početnu formu putničkog broda. Usporedbom komponenti ukupnog otpora moguće je zaključiti kako se pomakom uzdužnog položaja težišta volumena istisnine prema krmenom dijelu broda povećavaju i otpor tlaka i otpor trenja, dok se pri maksimalnom ispitanom pomaku prema pramčanom dijelu broda otpor trenja smanjio, a otpor tlaka povećao, što je u konačnici rezultiralo povećanjem ukupnog otpora. Navedene promjene moguće je uočiti analizirajući slike hidrodinamičkog tlaka i tangencijalnih naprezanja po trupu modificirane forme broda. S druge strane smanjenjem prizmatičkog koeficijenta u oba ispitana slučaja otpor trenja se smanjio, dok se otpor tlaka povećao, što je rezultiralo povećanjem ukupnog otpora. Povećanjem prizmatičkog koeficijenta za oba ispitana slučaja otpor trenja se povećao, dok se kod forme broda s 5 % većim prizmatičkim koeficijentom otpor tlaka smanjio, što je rezultiralo smanjenjem ukupnog otpora.

Za najpovoljniju formu broda sa stajališta ukupnog otpora provedene su numeričke simulacije pokusa otpora za dvije dodatne brzine s ciljem dobivanja krivulje ukupnog otpora. Ustanovljeno je da se smanjenjem brzine s 11,5 čv na 10 čv ukupni otpor putničkog broda smanjio za 52,82 %, dok se povećanjem brzine na 12 čv ukupni otpor povećao za 35,30 %. Također je moguće uočiti kako je pri obje brzine kut trima manji u odnosu na onaj pri projektnoj brzini broda.

Pokazano je kako je spregom programskog paketa za računalnu dinamiku fluida STAR – CCM+ i programskog paketa CAESES moguće modificirati postojeću formu trupa broda s ciljem smanjenja ukupnog otpora te detaljno analizirati strujanje oko trupa broda.

LITERATURA

- [1] Feng, Y., Moctar, O., Schellin, T. E.: Parametric Hull Form Optimization of Containerships for Minimum Resistance in Calm Water and in Waves, *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021., 20 (4), 670–693
- [2] Martić, I., Degiuli, N., Borčić, K., Grlj, C. G.: Numerical Assessment of the Resistance of a Solar Catamaran in Shallow Water, *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023., 11 (9)
- [3] Farkas, A., Degiuli, N., Martić, I.: Assessment of hydrodynamic characteristics of a full-scale ship at different draughts, *Ocean Engineering*, 2018., 156, 135–152
- [4] Zhao, F., Li, S. Z., Yang, L.: An overview on the design optimization of ship hull based on CFD techniques, *Journal of Ship Mechanics*, 2010., 14 (7), 812–821,
- [5] Degiuli, N., Farkas, A., Martić, I., Zeman, I., Ruggiero, V., Vasiljević, V.: Numerical and experimental assessment of the total resistance of a yacht, *Brodogradnja*, 2021., 72 (3), 61–80
- [6] Pak, K. R., Song, G. S., Kim, H. J., Son, H. J., Park, H. G.: Hull form design for resistance minimization of small-scale LNG bunkering vessels using numerical simulation, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2020., 12, 856–867
- [7] Grlj, C. G., Degiuli, N., Martić, I.: The Impact of Numerical Parameters on the Resistance Characteristics of a Container Ship at the Model and Full Scale, *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023., 11 (9)
- [8] <https://www.flowship.eu/>
- [9] Park, J. H., Choi, J. E., Chun, H. H.: Hull-Form optimization of KSUEZMAX to enhance resistance performance, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2015., 7 (1), 100–114
- [10] Nazemian, A., Ghadimi, P.: CFD-based optimization of a displacement trimaran hull for improving its calm water and wavy condition resistance, *Applied Ocean Research*, 2021., 113
- [11] Liu, X. , Zhao, W., Wan, D.: Hull form optimization based on calm-water wave drag with or without generating bulbous bow, *Applied Ocean Research*, 2021., 116
- [12] Cheng, X., Feng, B., Liu, Z., Chang, H.: Hull surface modification for ship resistance performance optimization based on Delaunay triangulation, *Ocean Engineering*, 2018., 153, 333–344
- [13] Yongxing, Z., Kim, D.-J.: Optimization Approach for a Catamaran Hull Using CAESSES and STAR-CCM+, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 2020., 34 (4), 272–276
- [14] <https://www.caeses.com/>
- [15] Tran, T. G., Huynh, Van Q., Kim, H. C.: Optimization strategy for planing hull design, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2022., 14
- [16] Zha, L., Zhu, R., Hong, L., Huang, S.: Hull form optimization for reduced calm-water resistance and improved vertical motion performance in irregular head waves, *Ocean Engineering*, 2021., 233
- [17] Fitriadhy, A., Rizat, N. S., Razak, A. R. A., Abdullah, S. F., Mahmuddin, F., Kurniawan, A.: Optimization Modelling of a Catamaran Hull Form towards Reducing Ship’s Total Resistance, *CFD Letters*, 2022., 14, (4), 67–79
- [18] Miao, A., Zhao, M., Wan, D.: CFD-based multi-objective optimisation of S60 Catamaran considering Demihull shape and separation, *Applied Ocean Research*, 2020., 97
- [19] Zhao, C., Wang, W., Jia, P., Xie, Y.: Optimisation of hull form of ocean-going trawler, *Brodogradnja*, 2021., 72 (4), 33–46

- [20] Zhang, S., Zhang, B., Tezdogan, T., Xu, L., Lai, Y.: Computational fluid dynamics-based hull form optimization using approximation method, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2018., 12, (1), 74–88
- [21] Zhang, S., Zhang, B., Tezdogan, T., Xu, L., Lai, Y.: Computational fluid dynamics-based hull form optimization using approximation method, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2018., 12, (1), 74–88
- [22] Choi, H. J., Yoon, H. S.: Research on hull-form optimization of a passenger ship using hullform modification algorithm with gaussian distribution function, *Brodogradnja*, 2016., 67 (3), 1–15
- [23] Hou, S., Zhang, Z., Lian, H., Xing, X., Gong, H., Xu, X.: Hull shape optimization of small underwater vehicle based on kriging-based response surface method and multi-objective optimization algorithm, *Brodogradnja*, 2022., 73 (3), 111–134
- [24] Degiuli, N.: Otpor i propulzija broda, predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [25] Papanikolaou, A.: *Ship design: Methodologies of preliminary design*, Springer, Netherlands, 2014.
- [26] Larsson, L., Raven, H. C., Randolph Paulling, J.: *Ship resistance and flow*, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2010.
- [27] Džijan, I.: *Računalna dinamika fluida*, predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [28] Werner, A., Degiuli, N.: *Mehanika fluida IIB*, predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [29] <https://www.cfd-online.com/>
- [30] Moukalled, F., Mangani, L., Darwish, M.: *Fluid Mechanics and Its Applications The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics*, Springer, 2016., 113
- [31] STAR-CCM+, User guide
- [32] Gamulin, A.: Otpor i propulzija broda, predavanja, FSB, Zagreb, 1997.
- [33] Shahmohamadi, H., Rashidi, M. M.: Experimental investigation and a novel analytical solution of turbulent boundary layer flow over a flat plate in a wind tunnel, *International Journal of Mechanical Sciences*, 2017., 133, 121–128
- [34] ITTC-Recommended Procedures and Guidelines, Uncertainty Analysis in CFD Verification and Validation Methodology and Procedures, 2008.
- [35] ITTC - Recommended Procedures and Guidelines, 2011.
- [36] ITTC-Recommended Procedures and Guidelines, 2014.
- [37] Farkas, A., Degiuli, N., Martić, I.: Numerical investigation into the interaction of resistance components for a series 60 catamaran, *Ocean Engineering*, 2017., 146, 151–169
- [38] Campbell, R., Terziev, M., Tezdogan, T., Incecik, A.: Computational fluid dynamics predictions of draught and trim variations on ship resistance in confined waters, *Ocean and Marine Engineering*, 2022.
- [39] Deng, R., Huang, D. B., Zhou, G. L., Sun, H.W., Ma, L., Chang, C.: Research on mesh generation effecting resistance calculation, *Applied Mechanics and Materials*, 2012. 138, 886–893
- [40] Lackenby, H.: On the systematic geometrical variation of ship forms, *Transactions of the Institution of Naval Architects*, 1950., 92