

Utjecaj trima na ukupni otpor kontejnerskog broda

Martić, Katarina

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:977249>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Katarina Martić

Zagreb, 2022.

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:

Katarina Martić

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se svojim mentoricama prof. dr. sc. Nastii Degiuli, dipl. ing. i dr. sc. Ivani Martić, mag. ing. nav. arch. te asistentu dr. sc. Andrei Farkasu, mag. ing. nav. arch. i Carlu Giorgiu Grlju, mag. ing. aeroing. na pruženoj pomoći, velikom strpljenju, utrošenom vremenu i svim korisnim savjetima koji su mi olakšali izradu ovog rada.

Zahvaljujem se i svojim roditeljima koji su mi omogućili studiranje i podržavali me cijelo ovo vrijeme.

Katarina Martić



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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Katarina Martić** JMBAG: 0035207170

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj trima na ukupni otpor kontejnerskog broda**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Effect of trim on the total resistance of a container ship**

Opis zadatka:

Optimizacija trima relativno je nov koncept preporučan od strane Međunarodne pomorske organizacije (eng. International Maritime Organization, IMO) za povećanje energetske učinkovitosti broda. Promjenu trima broda moguće je postići upravljanjem balastnim vodama i raspodjelom tereta na brodu te na taj način postići smanjenje ukupnog otpora broda te posljedično zahtijevane snage i potrošnje goriva. Poznato je kako ne postoji optimalan trim broda za sve brzine plovidbe i stanja krcanja te se najčešće traži optimalna vrijednost trima sa stajališta ukupnog otpora za projektnu brzinu broda.

U diplomskom radu je potrebno istražiti utjecaj trima kontejnerskog broda na ukupni otpor primjenom računalne dinamike fluida na temelju trodimenzijskog strujanja viskoznog fluida sa slobodnom površinom. Dobivene numeričke rezultate potrebno je validirati usporedbom s ekstrapoliranim rezultatima eksperimentalnih ispitivanja.

U radu je potrebno:

1. Dati pregled literature vezane za numeričko određivanje ukupnog otpora te za optimizaciju trima broda.
2. Dati matematičku osnovu numeričkih metoda za simulaciju viskoznog strujanja fluida sa slobodnom površinom.
3. Pripremiti proračunsku mrežu, početne i rubne uvjete potrebne za numeričku simulaciju viskoznog strujanja fluida.
4. Izvršiti numeričku simulaciju pokusa otpora kontejnerskog broda na ravnoj vodnoj liniji i za različite kutove trima koristeći programski paket za računalnu dinamiku fluida.
5. Usporediti numerički dobivene rezultate ukupnog otpora broda s ekstrapoliranim eksperimentalnim rezultatima.
6. Dati preporuku optimalnog trima za projektnu brzinu broda.

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 datumi obrane:
5. svibnja 2022.	7. srpnja 2022.	18. – 22. srpnja 2022.

Zadatak zadao:	Predsjednik Povjerenstva:
----------------	---------------------------

Prof. dr. sc. Nastia Degiuli
dr. sc. Ivana Martić

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. UVOD	1
1.1. Pregled literature	2
2. OTPOR BRODA.....	4
2.1. Komponente ukupnog otpora broda.....	4
2.2. Pokus otpora modela broda.....	7
2.3. Metoda Prohaske.....	9
2.4. Metoda ITTC 1978	10
2.5. Trim broda	11
3. RAČUNALNA DINAMIKA FLUIDA	12
3.1. Općenito	12
3.2. Osnove numeričkih simulacija.....	12
3.3. Osnovni zakoni dinamike fluida	14
3.4. Turbulentno strujanje fluida.....	15
3.4.1. Reynoldsovo vremensko osrednjavanje	15
3.4.2. $k-\omega$ SST model turbulencije	17
3.5. Strujanje u graničnom sloju	18
3.6. Metoda konačnih volumena.....	21
3.7. Metoda udjela fluida u volumenu – VOF metoda.....	21
3.8. Validacija rezultata numeričkih simulacija.....	22
3.9. Verifikacija rezultata numeričkih simulacija	22
3.9.1. Konvergencija rezultata iterativnog postupka.....	22
3.9.2. Procjena nesigurnosti rezultata numeričkih simulacija	23
4. POSTAVKE NUMERIČKIH SIMULACIJA POKUSA OTPORA.....	25
4.1. Kreiranje proračunske domene i zadavanje rubnih uvjeta	26
4.2. Diskretizacija proračunske domene	28
4.3. Dodatna profinjenja geometrijske mreže	30
4.4. Izbor fizikalnog modela	35
4.5. Postavke parametra rješavača	35
5. ANALIZA REZULTATA NUMERIČKIH SIMULACIJA	36
5.1. Verifikacija rezultata.....	36
5.2. Validacija rezultata	37
5.3. Analiza slobodne površine duž trupa broda.....	39
5.4. Analiza tangencijalnih naprezanja	41
5.5. Slike valova oko trupa broda	42
5.6. Optimizacija trima	52
6. ZAKLJUČAK	56

POPIS SLIKA

Slika 1.	Tangencijalna i normalna naprezanja na element površine uronjenog dijela brodske forme [15]	5
Slika 2.	Shema raščlane ukupnog otpora broda [15]	7
Slika 3.	Model broda opremljen za provođenje pokusa otpora [16]	8
Slika 4.	Metoda Prohaske za eksperimentalno određivanje faktora forme [15].....	9
Slika 5.	Slika pretege i zatege broda [19]	11
Slika 6.	Numerički pristup rješavanju inženjerskih problema [21]	13
Slika 7.	Vremensko osrednjavanje fizikalne veličine u [25].....	16
Slika 8.	Granični sloj uz ravnu ploču [28].....	19
Slika 9.	Bezdimenzijski profil brzine strujanja u turbulentnom graničnom sloju [29]	20
Slika 10.	3D model 6750-TEU kontejnerskog broda.....	26
Slika 11.	Nacrt rebara 6750-TEU kontejnerskog broda [4]	26
Slika 12.	Udaljenosti granica domene od trupa broda.....	27
Slika 13.	Rubni uvjeti domene	27
Slika 14.	Presjek grube mreže u razini vodne linije	29
Slika 15.	Presjek srednje mreže u razini vodne linije.....	29
Slika 16.	Presjek fine mreže u razini vodne linije	30
Slika 17.	Volumensko profinjenje pramca i krme	30
Slika 18.	Volumensko profinjenje oko trupa broda „ <i>far</i> “	31
Slika 19.	Volumensko profinjenje oko trupa broda „ <i>near</i> “	31
Slika 20.	Volumensko profinjenje oko trupa broda „ <i>nearer</i> “	32
Slika 21.	Volumensko profinjenje oko trupa broda „ <i>very near</i> “	32
Slika 22.	Profinjenje slobodne površine „ <i>coarse</i> “	33
Slika 23.	Profinjenje slobodne površine „ <i>fine</i> “	33
Slika 24.	Profinjenje slobodne površine „ <i>very fine</i> “	33
Slika 25.	Profinjenje „ <i>wake far</i> “ za obuhvaćanje Kelvinovog kuta	34
Slika 26.	Sloj prizama na bulbu broda.....	34
Slika 27.	Vrijednosti parametra $y +$ za $t = 0^\circ$	38
Slika 28.	Vrijednosti parametra $y +$ za $t = -0,5^\circ$	38
Slika 29.	Prikaz slobodne površine duž trupa broda za $t = 0^\circ$	39
Slika 30.	Prikaz slobodne površine duž trupa broda za $t = 0,25^\circ$ (gore) i $t = 0,5^\circ$ (dolje)	40
Slika 31.	Prikaz slobodne površine duž trupa broda za $t = -0,25^\circ$ (gore) i $t = -0,5^\circ$ (dolje) ..	40
Slika 32.	Prikaz tangencijalnih naprezanja za kut trima $t = 0^\circ$	41
Slika 33.	Prikaz tangencijalnih naprezanja za kut trima $t = 0,25^\circ$ (gore) i $t = 0,5^\circ$ (dolje)	42
Slika 34.	Prikaz tangencijalnih naprezanja za kut trima $t = -0,25^\circ$ (gore) i $t = -0,5^\circ$ (dolje) ..	42
Slika 35.	Slika valova oko trupa broda za kut trima $t = 0^\circ$	43
Slika 36.	Slika valova oko trupa broda za kut trima $t = 0,25^\circ$	43
Slika 37.	Slika valova oko trupa broda za kut trima $t = -0,25^\circ$	44
Slika 38.	Slika valova oko trupa broda za kut trima $t = 0,5^\circ$	44
Slika 39.	Slika valova oko trupa broda za kut trima $t = -0,5^\circ$	45
Slika 40.	Usporedba valnih elevacija iza krme broda za ravnu vodnu liniju i zategu u ravnini $y = 0$ m	46
Slika 41.	Usporedba valnih elevacija iza krme broda za ravnu vodnu liniju i zategu u ravnini $y = 21$ m	46
Slika 42.	Usporedba valnih elevacija iza krme broda za ravnu vodnu liniju i pretegu u ravnini $y = 0$ m	47

Slika 43.	Usporedba valnih elevacija iza krme broda za ravnu vodnu liniju i pretegu ravnini $y=21$ m	47
Slika 44.	Usporedba valnih elevacija duž trupa broda za ravnu vodnu liniju i pretegu u ravnini $y=21$ m	48
Slika 45.	Usporedba valnih elevacija duž trupa broda za ravnu vodnu liniju i zategu u ravnini $y=21$ m	48
Slika 46.	Raspodjela hidrodinamičkog tlaka za kut trima $t=0^\circ$	49
Slika 47.	Raspodjela hidrodinamičkog tlaka za kut trima $t=0,25^\circ$ (gore) i $t=0,5^\circ$ (dolje)...	50
Slika 48.	Raspodjela hidrodinamičkog tlaka za kut trima $t=-0,25^\circ$ (gore) i $t=-0,5^\circ$ (dolje)	50
Slika 49.	Raspodjela hidrodinamičkog tlaka na krmi za kut trima $t =0^\circ$	51
Slika 50.	Raspodjela hidrodinamičkog tlaka na krmi za kut trima $t =0,25^\circ$ (gore) i $t =0,5^\circ$ (dolje)	51
Slika 51.	Raspodjela hidrodinamičkog tlaka na krmi za kut trima $t =-0,25^\circ$ (gore) i $t =-0,5^\circ$ (dolje).....	52
Slika 52.	Optimalni kut trima broda	53
Slika 53.	Rezultati numeričkih istraživanja iz literature [6]	53
Slika 54.	Vrijednosti komponenti ukupnog otpora pri različitim kutovima trima	54

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Značajke 6750-TEU kontejnerskog broda [4]	25
Tablica 2.	Postavke diskretizacije fine mreže	28
Tablica 3.	Veličina osnovne ćelije i ukupni broj ćelija	29
Tablica 4.	Veličine ćelija u odnosu na osnovnu veličinu ćelije u profinjenjima oko trupa broda	31
Tablica 5.	Veličina ćelija profinjenja slobodne površine	33
Tablica 6.	Veličine profinjenja za obuhvaćanje Kelvinovog kuta	33
Tablica 7.	Vrijednosti vremenskog koraka.....	35
Tablica 8.	Verifikacija gustoće mreže	36
Tablica 9.	Verifikacija vremenskog koraka	36
Tablica 10.	Ukupna nesigurnost numeričke simulacije.....	37
Tablica 11.	Ekstrapolirane vrijednosti ukupnog otpora i trima.....	38
Tablica 12.	Relativna devijacija rezultata za $t = 0^\circ$ i $t = -0,5^\circ$	39
Tablica 13.	Vrijednosti oplakanih površina za sve kutove trima	41

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
a	/	koeficijent nagiba pravca
A_{VS}	m^2	površina izložena vjetru i projicirana u poprečnu ravninu
B	m	širina broda
C_A	/	korelacijski dodatak
C_{AAS}	/	koeficijent otpora zraka
C_{DA}	/	koeficijent otpora zraka iznad vodne linije
$CD_{k\omega}$	/	koeficijent unakrsne difuzije
C_F	/	koeficijent otpora trenja
C_{F_0}	/	koeficijent otpora trenja ekvivalentne ravne ploče
C_{FM}	/	koeficijent otpora trenja modela broda
C_P	/	koeficijent otpora tlaka
C_{PV}	/	koeficijent viskoznog otpora tlaka
C_T	/	koeficijent ukupnog otpora
C_V	/	koeficijent viskoznog otpora
C_W	/	koeficijent otpora valova
D	m	visina broda
D_{ij}	s^{-1}	tenzor brzine deformacije
f_i	m/s^2	gustoća masene sile
Fn	/	Froudeov broj
F_s	/	faktor sigurnosti
g	m/s^2	ubrzanje zemljine sile teže
GM	m	metacentarska visina
k	/	faktor forme
k	m^2/s^2	kinetička energija turbulencije
k_s	m	srednja amplituda hrapavosti
L	m	duljina broda
L_{CG}	m	uzdužni položaj težišta broda
L_{OA}	m	duljina preko svega
L_{PP}	m	duljina između okomica
L_{WL}	m	duljina na vodnoj liniji
N_i	/	broj ćelija mreže

p	Pa	tlak
\bar{p}_i	Pa	vremenski osrednjena komponenta tlaka
p'	Pa	pulsirajuća komponenta tlaka
\vec{p}_A	Pa	vektor tangencijalnog naprezanja
p'_i	Pa	pulsirajuća komponenta tlaka
P_D	kN	snaga predana vijku broda
P_E	kN	efektivna snaga broda
p_i	/	red točnosti
P_k	/	član produkcije
\vec{p}_{PV}	Pa	vektor normalnog naprezanja uslijed viskoznosti
\vec{p}_W	Pa	vektor normalnog naprezanja uslijed valova
R_F	N	otpor trenja
R_i	/	omjer konvergencije
Rn	/	Reynoldsov broj
R_P	N	otpor tlaka
R_{PV}	N	viskozni otpor tlaka
R_T	N	ukupni otpor
R_{T_EKST}	N	ukupni otpor modela broda dobiven eksperimentalno
R_{T_RDF}	N	ukupni otpor modela broda dobiven numeričkim simulacijama
R_V	N	viskozni otpor
R_W	N	otpor valova
R_{WB}	N	otpor lomljenja valova
R_{WP}	N	otpor slike vala
RD	%	relativna devijacija
r_{xx}	m	polumjer tromosti oko x osi
r_{yy}	m	polumjer tromosti oko y osi
r_{zz}	m	polumjer tromosti oko z osi
S	m ²	oplakana površina
\hat{S}_i	/	vrijednost rezultata numeričke simulacije
S_L	/	donja vrijednost rezultata numeričke simulacije
S_U	/	gornja vrijednost rezultata numeričke simulacije

t	/	trim broda
T	s	period osrednjavanja
T	m	gaz broda
T_K	m	gaz na krmi broda
T_P	m	gaz na pramcu broda
\bar{u}	m/s	komponenta brzine strujanja paralelno sa stijenkom
u^+	/	bezdimenzijska brzina
U_i	/	numerička nesigurnost
$\overline{U_{SN}}$	/	ukupna numerička nesigurnost
$\overline{U_T}$	/	nesigurnost vremenskog koraka
$\overline{U_G}$	/	nesigurnost gustoće mreže
u_τ	m/s	brzina trenja
v	m/s	brzina broda
V	m ³	volumen istisnine
V_{CG}	m	vertikalni položaj težišta broda
v_i	m/s	vektor brzine
\bar{v}_i	m/s	vremenski osrednjena komponenta brzine
v'_i	m/s	pulsirajuća komponenta brzine
y	m	udaljenost od stijenke
y^+	/	bezdimenzijska udaljenost od stijenke
α_i	/	volumni udio pojedinog fluida u kontrolnom volumenu
β^*	/	koeficijent modela turbulencije
β	/	koeficijent modela turbulencije
Δ	t	masa istisnine
ΔC_F	/	dodatak na hrapavost
δ_{ij}	/	Kroneckerov delta simbol
$\delta_{RE_{i,1}}^{*(1)}$	/	numerička greška
ε_i	/	razlika rezultata
η_D	/	stupanj djelovanja propulzije
κ	/	Von Karmanova konstanta
λ	/	mjerilo geometrijske sličnosti
μ	Pas	dinamički koeficijent viskoznosti

μ_i	Pas	dinamički koeficijent viskoznosti pojedine faze fluida
ν	m^2/s	kinematički koeficijent viskoznosti
ν_T	m^2/s	turbulentna viskoznost
ρ	kg/m^3	gustoća fluida
ρ_A	kg/m^3	gustoća zraka
Σ_{ij}	N/m^2	devijatorski dio tenzora naprezanja
σ_{ij}	N/m^2	tenzor naprezanja
σ_k	/	inverzni turbulentni Schmidtov broj
σ_ω	/	inverzni turbulentni Schmidtov broj
τ	N/m^2	tangencijalno naprezanje
τ_w	N/m^2	tangencijalno naprezanje na stijenci
ω	m^2s^{-3}	specifična brzina disipacije turbulentne kinetičke energije

SAŽETAK

U ovom radu provedene su numeričke simulacije pokusa otpora za 6750-TEU kontejnerski brod u naravi za pet različitih kutova trima primjenom računalne dinamike fluida (RDF). Numeričke simulacije provedene su primjenom komercijalnog programskog paketa STAR-CCM+ s ciljem određivanja optimalnog trima pri kojem je ukupni otpor broda najmanji. Dan je matematički model nestacionarnog trodimenzijskog viskoznog strujanja fluida sa slobodnom površinom, koji se temelji na Reynoldsovim osrednjenim Navier-Stokesovim jednažbama (eng. *Reynolds Averaged Navier-Stokes*, RANS) i $k-\omega$ SST modelu turbulencije. Za opis slobodne površine primijenjena je metoda udjela fluida u volumenu (eng. *Volume of Fluid*, VOF). Proveden je postupak verifikacije za gustoću mreže i vremenski korak u svrhu određivanja ukupne nesigurnosti numeričke simulacije. Nadalje, rezultati numeričkih simulacija validirani su s ekstrapoliranim rezultatima modelskih ispitivanja provedenih u Brodarskom institutu. Analizirano je strujanje duž trupa broda, raspodjela tangencijalnih naprezanja po oplakanoj površini, slike valova oko trupa broda te raspodjela hidrodinamičkog tlaka za različite kutove trima. Konačno, dana je preporuka optimalnog trima za projektnu brzinu broda.

Ključne riječi: kontejnerski brod, pokus otpora, trim, računalna dinamika fluida, Reynoldsove osrednjene Navier-Stokesove (RANS) jednažbe, $k-\omega$ SST model turbulencije

SUMMARY

In this paper, numerical simulations of resistance test for a 6750-TEU container ship in full scale are carried out at five different trim angles using Computational Fluid Dynamics (CFD). Numerical simulations are performed using a commercial software package STAR-CCM+ in order to determine the optimal trim with the lowest value of the total resistance. A mathematical model of unsteady three-dimensional viscous flow with a free surface based on Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) equations and $k-\omega$ SST turbulence model is given. The Volume of Fluid (VOF) method is used to describe the free surface. A verification study is performed for grid density and time step to determine the total numerical uncertainty. Furthermore, the obtained results of the numerical simulations are validated against the extrapolated results of the model tests performed in the Brodarski institute. The flow along the ship hull, shear stress distribution on the wetted surface, wave patterns, and hydrodynamic pressure distribution are analysed for different trim angles. Finally, the recommendation for the optimal trim at the design speed is given.

Key words: container ship, resistance test, trim, Computational Fluid Dynamics, Reynolds Averaged Navier-Stokes equations, $k-\omega$ SST turbulence model

1. UVOD

Globalna trgovina između zemalja je oduvijek bila vrlo važna djelatnost te se procjenjuje da se gotovo 90% dobara prevozi brodovima [1]. Troškovi goriva čine veliki udio u operativnim troškovima, a velika flota brodova stvara konkurenciju koja smanjuje cijene vozarina. Stoga brodovlasnici teže rješenjima kojima bi se minimizirali troškovi goriva, a čime bi povećali zaradu. Nadalje, nove regulacije potiču brodarsku industriju da poduzme mjere s ciljem povećanja energetske učinkovitosti brodova kako bi se smanjile emisije stakleničkih plinova. Međunarodna pomorska organizacija (eng. *International Maritime Organization*, IMO) je predstavila novu strategiju za smanjenje emisije CO₂ za 40% do 2030. godine, s ciljem smanjenja za 70% do 2050. godine u odnosu na razinu iz 2008. godine [2]. Stoga je IMO predložila nekoliko kratkoročnih, srednjoročnih i dugoročnih mjera za postizanje ovog cilja. U kratkoročne mjere se između ostalog ubraja smanjenje brzine plovidbe (eng. *slow steaming*) te optimizacija trima. U srednjoročne mjere se ubraja ugradnja novih mehanizma za smanjenje emisija, a u dugoročne izgradnja brodova koji za pogon ne bi koristili fosilna goriva [3].

Tradicionalno, trup broda optimira se za jednu brzinu plovidbe i jedan gaz, no tijekom svog životnog vijeka brod plovi pri različitim brzinama i gazovima pri čemu za određene kombinacije gaza i brzine broda dolazi do znatnog smanjenja potrošnje goriva. Optimizacija trima jedna je od jednostavnijih metoda za postizanje ušteda u potrošnji goriva koju preporučuje IMO jer ona ne zahtijeva nikakvu modifikaciju trupa ili nadogradnju broskog motora. Razna istraživanja su pokazala da plovidbom pri optimalnim vrijednostima trima brodovlasnici mogu uštediti 2–5% na troškovima goriva, uz odgovarajuće smanjenje emisija stakleničkih plinova [2]. U prošlosti se utjecaj trima na ukupni otpor određivao eksperimentalnim putem, odnosno ispitivanjem modela brodova u bazenu. Eksperimentalne metode zahtijevaju puno vremena i novčanih sredstava te uglavnom daju ograničeni broj informacija o fizikalnoj pojavi. Stoga se danas sve češće primjenjuje računalna dinamika fluida–RDF (eng. *Computational Fluid Dynamics*, CFD), koja omogućuje detaljni uvid u strujanje oko trupa broda.

U okviru ovog diplomskog rada korišten je programski paket za računalnu dinamiku fluida STAR–CCM+ za provođenje numeričkih simulacija pokusa otpora 6750–TEU kontejnerskog broda za jednu vrijednost Froudeovog broja. Numeričke simulacije provedene su za ravnu vodnu liniju, za kutove trimova 0,25° i 0,5° pretege i zatege te je na temelju dobivenih rezultata dan prijedlog optimalnog trima. Proveden je postupak verifikacije rezultata ukupnog

otpora, urona i kuta trima broda primjenom tri gustoće mreže i tri vremenska koraka te je izračunata ukupna nesigurnost. Dobiveni rezultati su validirani usporedbom s eksperimentalnim rezultatima pokusa otpora modela broda dobivenim ispitivanjima u Brodarskom institutu.

1.1. Pregled literature

U ovom poglavlju dan je pregled istraživanja vezanih uz primjenu računalne dinamike fluida u brodskoj hidrodinamici. Također je dan pregled dosadašnjih istraživanja vezanih uz optimizaciju trima kontejnerskih brodova.

Kim et al. [4] proveli su usporedbu rezultata pomorstvenih karakteristika 6750-TEU kontejnerskog broda dobivenih primjenom različitih numeričkih modela u sklopu druge ITTC-ISSC (eng. *International Towing Tank Conference-International Ship and Offshore Structures Congress*) radionice održane 2014. godine, na kojoj je sudjelovalo jedanaest institucija, a cilj radionice je bio određivanje utjecaja mjerila na rezultate pomorstvenih karakteristika 6750-TEU kontejnerskog broda. Sudionici su proveli numeričke simulacije i razmijenili rezultate za poniranje i posrtanje broda te moment savijanja uslijed razbijanja valova o pramac. Sun et al. [5] proveli su numeričke simulacije pokusa otpora za različite vrijednosti trima, pri različitim vrijednostima Froudeovog broja, s ciljem dobivanja krivulja otpora. Autori su utvrdili da postoji optimalan trim za svaku od ispitanih brzina, a za projektnu brzinu kao optimalan trim predložili su pretegu. Kako bi dokazali vjerodostojnost RDF analize, autori su usporedili rezultate s rezultatima pokusne plovidbe. Pokusna plovidba provedena je za tri trima, uključujući i optimalni trim te je zaključeno da su rezultati numeričkih simulacija u skladu s onima dobivenim prilikom pokusa plovidbe. Islam et al. [6] proveli su numeričke simulacije pokusa otpora pri različitim vrijednostima Froudeovog broja i različitim trimovima na temelju Reynoldsovih osrednjenih Navier-Stokesovih (RANS) jednadžbi. Autori su pokazali da optimalni kut trima varira ovisno o brzini broda te da ne postoji jasno izražena zakonitost prema kojoj se mijenja ukupni otpor ovisno o trimu i brzini broda. Sherbaz et al. [1] proveli su numeričke simulacije pokusa otpora za različite kutove trima. Autori su na temelju dobivenih rezultata dali prijedlog za optimalni trim KCS kontejnerskog broda te istaknuli da je poželjno dovesti brod na optimalni trim postavljanjem utega na određene položaje na brodu umjesto uzimanja balastne vode, budući da utjecaj slobodnih površina u balastnim tankovima može uzrokovati veći ukupni otpor broda, a time i veću potrošnju goriva. Dogrul et al. [7] analizirali su utjecaj mjerila modela broda na komponente ukupnog otpora i značajke polja strujanja. Autori su zaključili da s povećanjem

Reynoldsovog broja koeficijent preostalog otpora ostaje nepromijenjen za sva mjerila KCS kontejnerskog broda, dok je kod KVLCC2 broda primijećen silazni trend koeficijenta preostalog otpora s povećanjem mjerila. Farkas et al. [8] proveli su numeričke simulacije pokusa otpora, slobodne vožnje vijka i vlastitog pogona za model broda i vijka te za brod i vijak u naravi, s ciljem određivanja točke vlastitog pogona i snage predane vijku. Numeričke simulacije provedene su primjenom četiri različita modela turbulencije, a rezultati su ekstrapolirani na brod u naravi pomoću pet različitih metoda ekstrapolacije. Autori su došli do zaključka da RDF omogućuje zadovoljavajuću točnost pri određivanju hidrodinamičkih značajki. Song et al. [9] proveli su numeričke simulacije pokusa otpora i vlastitog pogona za brod u naravi. Simulacije su provedene primjenom različite gustoće mreže, vremenskih koraka te za različite vrijednosti parametra y^+ . Autori su došli do zaključka da gustoća mreže ne utječe značajno na dobivene rezultate, da vremenski korak ima najveći utjecaj na stvaranje slike valova te da vrijednost parametra y^+ ima utjecaj na stvaranje graničnog sloja, polja tlaka i na formiranje valova. Shivachev et al. [2] proveli su niz numeričkih simulacija pokusa otpora za različite kutove trima i različite brzine s fiksnim i slobodnim modelom broda. Validacijom rezultata pokazali su dobro slaganje dobivenih rezultata s rezultatima eksperimentalnih ispitivanja. Utvrdili su da numeričke simulacije s fiksnim modelom imaju kraće vrijeme trajanja proračuna te da je moguće odrediti optimalni kut trima, ali s niskom točnošću. Stoga autori predlažu provođenje numeričkih simulacija sa slobodnim modelom broda. Lv et al. [10] koristili su panelnu metodu za izračun otpora valova modela broda za različite kutove trima te su na temelju dobivenih rezultata odredili trim kojem odgovara najniža vrijednost otpora valova. D'Aure et al. [11] proveli su RANS simulacije pokusa otpora za pet različitih gustoća mreže kako bi utvrdili utjecaj gustoće mreže na konačne rezultate. Autori su zaključili da najfinija mreža daje rezultate najslabije rezultatima eksperimentalnih ispitivanja. Iakovatos et al. [12] istraživali su utjecaj trima na ukupni otpor za šest različitih modela brodova primjenom numeričkih simulacija pokusa otpora na mirnoj vodi. Autori su došli do zaključka da u slučaju pretege i malih brzina plovidbe dolazi do smanjenja ukupnog otpora kod svih modela, dok za slučaj zatege može doći ili do povećanja ili do smanjenja ukupnog otpora, ovisno o obliku trupa modela. Niklas et al. [13] usporedili su rezultate numeričkih simulacija pokusa otpora s rezultatima dobivenim Holtrop-Mennen metodom, rezultatima dobivenim na pokusnoj plovidbi te ekstrapoliranim rezultatima modelskih ispitivanja u bazenu. Autori su utvrdili najveće slaganje između rezultata numeričkih simulacija i onih dobivenih ispitivanjem modela broda u bazenu.

2. OTPOR BRODA

Brod prilikom plovidbe stvara poremećaje u tekućini u kojoj se giba, a ukupni otpor broda je ustvari sila kojom se tekućina suprotstavlja gibanju broda jednolikom brzinom. Ukupni otpor ovisi o [14]:

- geometriji trupa broda,
- brzini gibanja broda v ,
- gustoći ρ i viskoznosti fluida ν ,
- ubrzanju zemljine sile teže g .

Ukupni otpor broda zapisuje se kao:

$$R_{TS} = C_{TS}(\text{geometrija trupa}, Rn, Fn) \frac{1}{2} \rho v^2 S \quad (1)$$

gdje je S oplakana površina, a C_{TS} koeficijent ukupnog otpora broda, koji ovisi o geometriji broda, Reynoldsovom broju Rn i Froudeovom broju Fn .

Reynoldsov broj je bezdimenzijska veličina definirana kao omjer inercijskih i viskoznih sila te glasi:

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

gdje je ν kinematički koeficijent viskoznosti fluida, a L duljina broda.

Froudeov broj je bezdimenzijska veličina koja predstavlja omjer inercijskih i gravitacijskih sila kako slijedi:

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

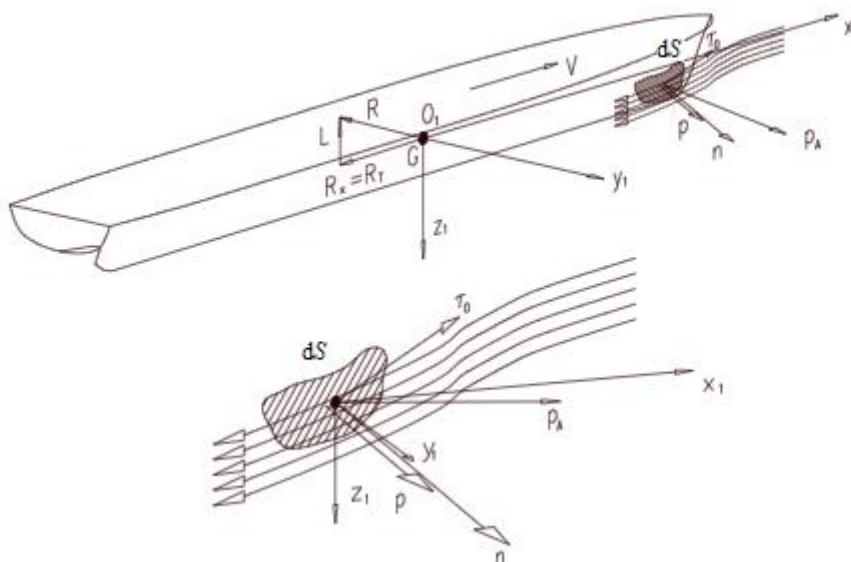
Snaga koja je potrebna za savladavanje otpora broda naziva se efektivnom snagom te se izražava kao:

$$P_E = R_{TS}v \quad (4)$$

2.1. Komponente ukupnog otpora broda

Otpor broda je složena pojava stoga se ukupni otpor mora rastaviti na pojedine komponente kako bi se mogao proučavati i analizirati. Ukupni otpor može se prikazati kao rezultat tangencijalnih i normalnih napreznja koja djeluju na oplakanu površinu trupa broda uslijed strujanja fluida. Promatrajući trup broda može se razmatrati malena površina uronjenog dijela brodske forme, slika 1. U točki razmatrane površine djeluje vektor ukupnog napreznja koji je

moгуće podijeliti na vektor tangencijalnog u smjeru tangente i normalnog naprezanja u smjeru normale. Na slici 1. prikazana su tangencijalna i normalna naprezanja na element površine uronjenog dijela brodske forme [15].



Slika 1. Tangencijalna i normalna naprezanja na element površine uronjenog dijela brodske forme [15]

U točki A diferencijalne površine dS podvodnog dijela brodske forme, vektor ukupnog naprezanja uslijed strujanja viskozne tekućine moguće je prikazati kao:

$$\vec{p}_A = \vec{\tau}_0 + \vec{p} \quad (5)$$

gdje je $\vec{\tau}_0$ vektor tangencijalnog naprezanja u smjeru tangente na strujnicu, a \vec{p} vektor normalnog naprezanja (hidrodinamičkog tlaka) u smjeru normale na strujnicu u točki A.

Tada se ukupni otpor broda zapisuje kao:

$$R_x = R_T = \int_S \tau_0 \cos(\tau_0, x_1) dS + \int_S p \cos(p, x_1) dS \quad (6)$$

gdje prvi integral na desnoj strani jednadžbe predstavlja otpor trenja R_F , a drugi integral otpor tlaka R_P . Slijedi da je:

$$R_T = R_F + R_P \quad (7)$$

Ovakva podjela se temelji na pretpostavci da fluid djeluje na trup broda kontinuirano raspodijeljenim površinskim silama.

Nadalje, ukupni otpor je moguće podijeliti s obzirom na učinke u dva dominantna područja oko trupa broda. Prvo područje obuhvaća granični sloj i hidrodinamički trag s dominantnim utjecajem viskoznosti, a drugo područje je područje potencijalnog strujanja. Tada se ukupni otpor broda dijeli na otpor uslijed viskoznih učinaka i otpor uslijed stvaranja valova na slobodnoj površini:

$$R_T = R_V + R_W \quad (8)$$

gdje je R_V viskozni otpor, a R_W otpor valova.

Viskozni otpor je funkcija Reynoldsovog broja:

$$R_V = C_V(R_n) \frac{1}{2} \rho v^2 S \quad (9)$$

a otpor valova je funkcija Froudeovog broja:

$$R_W = C_W(F_n) \frac{1}{2} \rho v^2 S \quad (10)$$

gdje je C_V koeficijent viskoznog otpora, a C_W koeficijent otpora valova.

Komponenta viskoznog otpora, koja je posljedica tangencijalnih napreznja između tekućine i oplata broda, naziva se otpor trenja R_F . Druga komponenta viskoznog otpora naziva se viskozni otpor tlaka R_{PV} , a nastaje kao posljedica promjene tlaka duž trupa broda. Napreznja uslijed hidrodinamičkog tlaka mogu se podijeliti kao [14]:

$$\vec{p} = \vec{p}_{PV} + \vec{p}_W \quad (11)$$

gdje je \vec{p}_{PV} vektor normalnog napreznja uslijed viskoznosti, a \vec{p}_W vektor normalnog napreznja uslijed valova. Stoga se otpor tlaka može zapisati kao:

$$R_P = \int_S p_{PV} \cos(p, x_1) dS + \int_S p_W \cos(p, x_1) dS \quad (12)$$

$$R_P = R_{PV} + R_W \quad (13)$$

gdje je R_{PV} viskozni otpor tlaka.

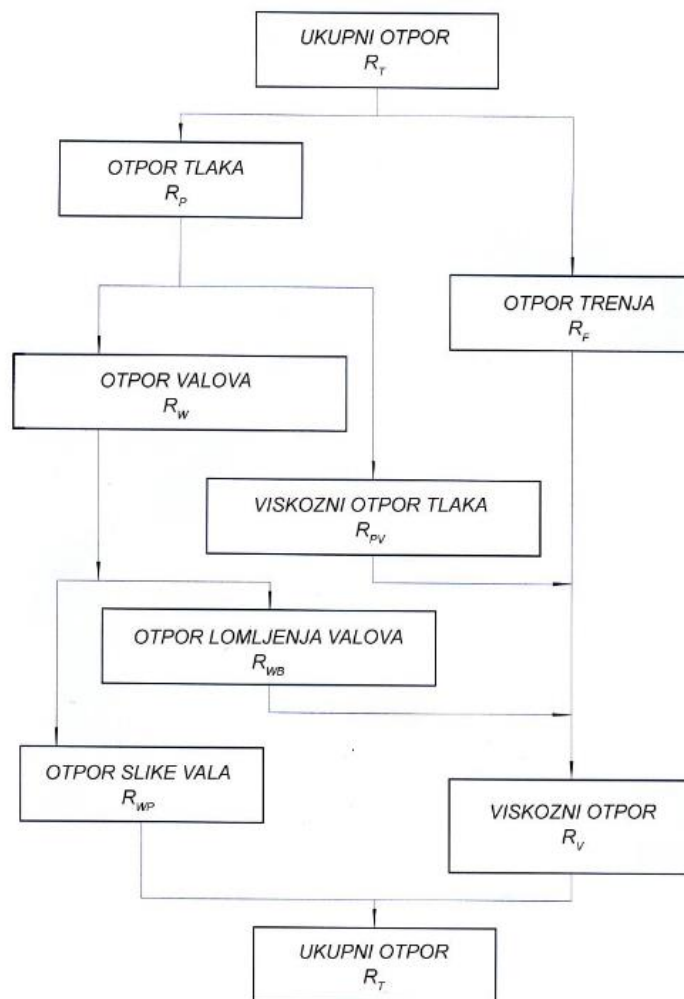
Otpor valova R_W dijeli se na otpor slike vala R_{WP} i otpor lomljenja valova R_{WB} :

$$R_W = R_{WP} + R_{WB} \quad (14)$$

Uvođenjem korelacijskog dodatka C_A izraz za ukupni otpor broda glasi:

$$R_T = [C_F(R_n) + C_{PV}(R_n) + C_W(F_n) + C_A] \frac{1}{2} \rho v^2 S \quad (15)$$

Podjela ukupnog otpora prikazana je na slici 2.



Slika 2. Shema raščlane ukupnog otpora broda [15]

2.2. Pokus otpora modela broda

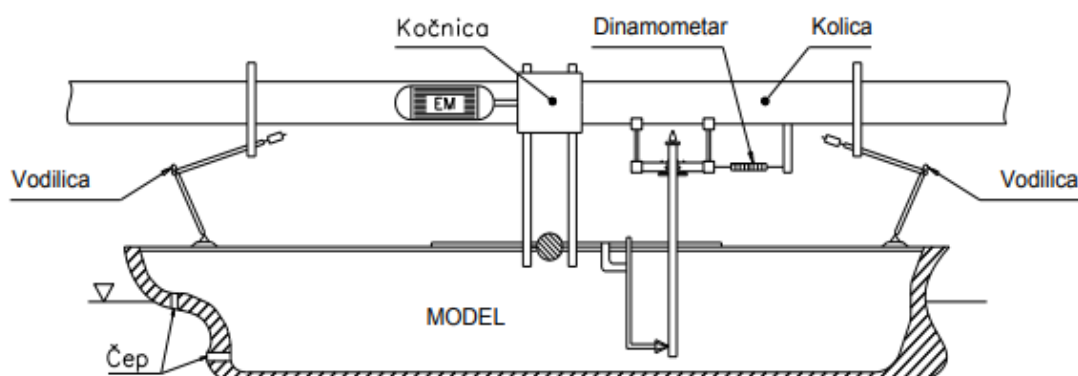
Pokus otpora provodi se s ciljem određivanja krivulje ukupnog otpora u ovisnosti o brzini modela broda. Pokus se provodi u bazenima koji ispitivanja provode u skladu s preporukama međunarodnog udruženja bazena za modelska ispitivanja ITTC (eng. *International Towing Tank Conference*). Model broda se izrađuje u skladu s dimenzijama bazena i mjernim instrumentima koji će se koristiti tijekom ispitivanja, a prilikom samog provođenja pokusa potrebno je ostvariti geometrijsku, kinematičku i dinamičku sličnost modela i broda u naravi. Geometrijska sličnost se postiže konstantnim odnosima glavnih dimenzija modela i broda. Kinematička sličnost će biti osigurana ako odgovarajuće točke modela i broda opisuju odgovarajuće putanje u prostorno-vremenskim odsječcima, a vektori brzine i ubrzanja su paralelni, istog smjera i u konstantnom odnosu. Dinamička sličnost ostvaruje se na način da

su vektori svih sila koje djeluju na brod i model u odgovarajućim prostorno–vremenskim točkama istog smjera, da su međusobno paralelni i da su im veličine u stalnom odnosu. Nažalost, nije moguće ostvariti potpunu dinamičku sličnost, stoga se za potrebe modelskih ispitivanja zadovoljava jednakost Froudeovih brojeva, dok se vrijednost Reynoldsovog broja drži iznad kritične vrijednosti kako bi se izbjegla pojava laminarnog strujanja [14].

Prije početka pokusa otpora potrebno je pripremiti model. Priprema modela sastoji se od [14]:

- određivanja mase modela,
- ucrtavanja mjernih oznaka na modelu,
- transporta iz modelarnice i spuštanja u vodu,
- opremanja modela s potrebnim instrumentarijem i utezima kako bi se model doveo na željeni gaz,
- učvršćivanjem modela za kolica.

Na slici 3. prikazan je model broda spreman za provođenje pokusa otpora.



Slika 3. Model broda opremljen za provođenje pokusa otpora [16]

Modelu se tijekom pokusa onemogućuju dva stupnja slobode gibanja, zanošenje i zaošijanje. Zaostajanje je donekle ograničeno dinamometrom i vodilicama. Pokus se provodi na način da se model tegli kolicima kroz bazen i da se prilikom tegljenja mjere brzina i ukupni otpor. Mjerenja se provode u rasponu interesantnih brzina, odnosno za brzine kojima će brod ploviti tijekom svog životnog vijeka. Kroz izmjerene vrijednosti provlači se glatka krivulja te se vrijednosti preračunavaju na brod u naravi jednom od metoda za ekstrapolaciju ukupnog otpora. U ovom radu za validaciju rezultata numeričkih simulacija korišteni su rezultati eksperimentalnih ispitivanja dobiveni u Brodarskom institutu, a za ekstrapolaciju rezultata s modela na brod u naravi korištena je metoda ITTC 1978.

2.3. Metoda Prohaske

Prohaska je predložio način za određivanje faktora forme k eksperimentalnim putem, a koji se temelji na Hughesovoj metodi. Faktor forme k definira se na temelju koeficijenta viskoznog otpora i otpora trenja [14] kako slijedi:

$$k = \frac{C_V - C_{F_0}}{C_{F_0}} = \frac{C_V}{C_{F_0}} - 1 \quad (16)$$

gdje je C_{F_0} koeficijent otpora trenja ekvivalentne ravne ploče.

Za slučaj kada nema odvajanja strujanja vrijedi sljedeći izraz za određivanje koeficijenta ukupnog otpora:

$$C_T = (1 + k)C_{F_0} + C_W \quad (17)$$

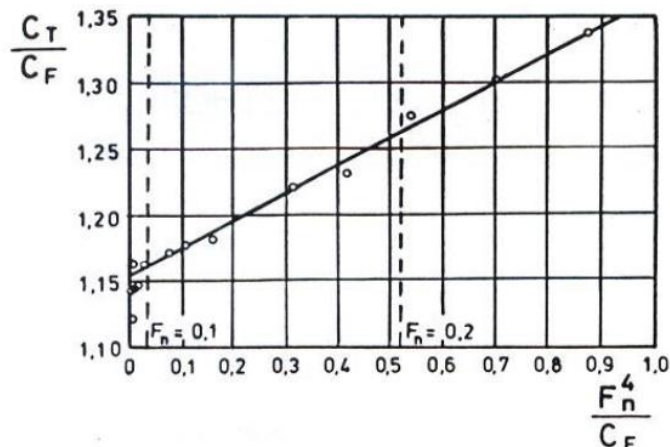
gdje je C_W koeficijent otpora valova, koji ovisi o koeficijentu istisnine C_B te za brodove koji imaju $C_B < 0,8$ iznosi:

$$C_W = aFn^4 \quad (18)$$

Dijeljenjem jednadžbe (17) s koeficijentom otpora trenja ekvivalentne ravne ploče slijedi jednadžba pravca:

$$\frac{C_T}{C_{F_0}} = (1 + k) + a \frac{Fn^4}{C_{F_0}} \quad (19)$$

gdje a predstavlja koeficijent nagiba pravca, a $(1+k)$ odsječak pravca na ordinati, slika 4. Koeficijent nagiba pravca određuje se tako da pravac što bolje opisuje izmjerene podatke. Grafički prikaz određivanja faktora forme prikazan je na slici 4. Potrebno je izmjeriti desetak točaka u području Froudeovih brojeva između 0,1 i 0,2 (0,22) jer je u tom području otpor valova zanemariv, a mjerenje pri Froudeovim brojevima koji su niži od 0,1 nije pouzdano zbog grešaka mjernih instrumenata.



Slika 4. Metoda Prohaske za eksperimentalno određivanje faktora forme [15]

2.4. Metoda ITTC 1978

Koeficijent ukupnog otpora za brod bez ljuljnih kobilica računa se kako slijedi [17]:

$$C_{TS} = (1 + k)C_{FS} + C_W + \Delta C_F + C_A + C_{AAS} \quad (20)$$

gdje je k faktor forme određen prema metodi Prohaske, C_{FS} koeficijent otpora trenja broda, C_W koeficijent otpora valova, ΔC_F dodatak na hrapavost, C_A korelacijski dodatak, a C_{AAS} koeficijent otpora zraka.

Koeficijent otpora trenja broda računa se prema korelacijskoj liniji model-brod ITTC 1957 kao:

$$C_{FS} = \frac{0,075}{(\log Rn - 2)^2} \quad (21)$$

Koeficijent otpora valova C_W računa se prema izrazu:

$$C_W = C_{TM} - (1 + k)C_{FM} \quad (22)$$

gdje je C_{FM} koeficijent otpora trenja modela izračunat prema korelacijskoj liniji model-brod ITTC 1957.

Dodatak na hrapavost ΔC_F određen je izrazom:

$$\Delta C_F = 0,044 \left[\left(\frac{k_s}{L_{WL}} \right)^{\frac{1}{3}} - 10Rn^{-\frac{1}{3}} \right] + 0,000125 \quad (23)$$

gdje je k_s srednja amplituda hrapavosti na 50 mm duljine hrapave površine (ukoliko podatak nije poznat uzima se vrijednost od $150 \cdot 10^{-6}$ m), a L_{WL} duljina na vodnoj liniji.

Izraz za korelacijski dodatak C_A dobiva se usporedbom rezultata eksperimentalnih ispitivanja i pokusne plovidbe broda te glasi:

$$C_A = (5,68 - 0,6 \log Rn) 10^{-3} \quad (24)$$

Konačno, koeficijent otpora zraka računa se kao:

$$C_{AAS} = C_{DA} \frac{\rho_A A_{VS}}{\rho_S S_S} \quad (25)$$

gdje je ρ_A gustoća zraka, A_{VS} površina izložena vjetru i projicirana u poprečnu ravninu, ρ_S gustoća mora, S_S oplakana površina broda, a C_{DA} koeficijent otpora zraka iznad vodne linije. C_{DA} je moguće odrediti ispitivanjima u zračnom tunelu, a vrijednosti se obično nalaze u rasponu od 0,5 do 1. U slučaju da ne postoje rezultati ispitivanja u zračnom tunelu može se pretpostaviti da C_{DA} iznosi 0,8. Važno je napomenuti da je u okviru ovog rada otpor zraka zanemaren.

2.5. Trim broda

Trim broda t definira se kao razlika između gaza na krmi i na pramcu broda kako slijedi:

$$t = T_P - T_K \quad (26)$$

gdje je T_P gaz na pramcu, a T_K gaz na krmi.

Ako je $t < 0$, odnosno ako je gaz na krmi veći od gaza na pramcu, brod je u zatezi. Ako je $t > 0$, odnosno ako je gaz na pramcu veći od gaza na krmi, brod je u pretezi.

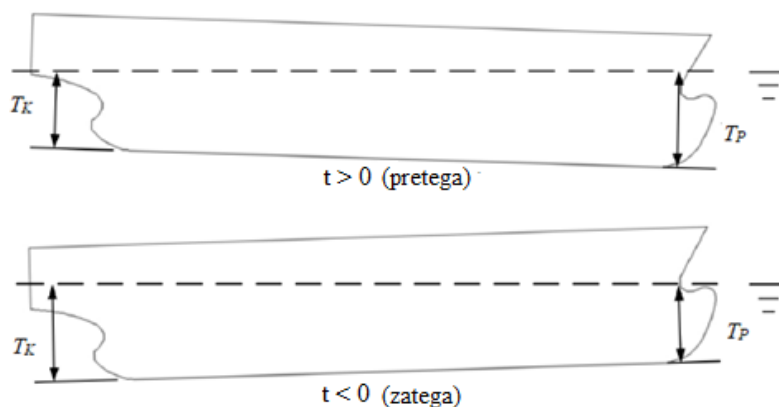
Optimizacija trima jedan je od načina povećanja energetske učinkovitosti broda, preporučan od strane IMO-a, a koji ne zahtjeva nikakvu modifikaciju oblika trupa broda ili nadogradnju pogonskog stroja [5]. Optimizacija trima temelji se na činjenici da je ukupan otpor broda tijekom plovidbe pri istoj brzini plovidbe i pri istom gasu, različit ovisno o trimu broda [6].

Cilj optimizacije trima je minimizirati snagu predanu vijku za zadanu masu istisnine broda i brzinu plovidbe. Snaga predana vijku P_D definira se kao [18]:

$$P_D = \frac{R_T v}{\eta_D} \quad (27)$$

gdje je η_D stupanj djelovanja propulzije.

Kako za bilo koji trim broda, brzina i masa istisnine ostaju isti, cilj je smanjiti ukupni otpor kako bi se ostvarila manja zahtijevana snaga predanu vijku. Dakle, optimizacijom trima pronalazi se najmanja vrijednost ukupnog otpora broda na mirnoj vodi, a otpor broda određuje se modelskim ispitivanjima u bazenu ili primjenom računalne dinamike fluida. Nakon što se odredi optimalan trim, u praksi se on postiže upravljanjem balastnim vodama ili raspodjelom opterećenja duž trupa broda. Raznim istraživanjima otkriveno je da je plovidbom na optimalnom trimu broda moguće smanjiti potrošnju goriva za 2–5%, te posljedično smanjiti i emisiju stakleničkih plinova [2].



Slika 5. Slika pretege i zatege broda [19]

3. RAČUNALNA DINAMIKA FLUIDA

3.1. Općenito

Probleme u mehanici fluida moguće je riješiti putem teorijskog, numeričkog ili eksperimentalnog pristupa. Teorijski pristup se temelji na analitičkom rješavanju matematičkih modela strujanja fluida te se njime dobiva kompletan uvid u fiziku pojedinog problema. No, većina problema vezanih uz strujanje viskoznog fluida opisana je nelinearnim parcijalnim diferencijalnim jednadžbama, za koje ne postoji opće analitičko rješenje. Stoga su se znanstvenici u prošlosti uglavnom oslanjali na eksperimentalni pristup, koji je usko povezan s teorijskim te je potrebno dobro poznavati teoriju kako bi se eksperimenti mogli valjano provesti. Takav pristup daje ograničenu količinu informacija o promatranoj pojavi te je potrebno provesti više mjerenja kako bi se dobio uvid u utjecaj određenog parametra na samu pojavu. Tehnološki razvoj omogućio je nastanak nove grane mehanike fluida-RDF. RDF se temelji na teorijskom pristupu te pokazuje veliku sličnost s eksperimentalnim pristupom. Prednosti RDF-a nad eksperimentalnim pristupom su ušteda vremena i novca te mogućnost simuliranja uvjeta koje često nije moguće ostvariti tijekom eksperimenta [20].

3.2. Osnove numeričkih simulacija

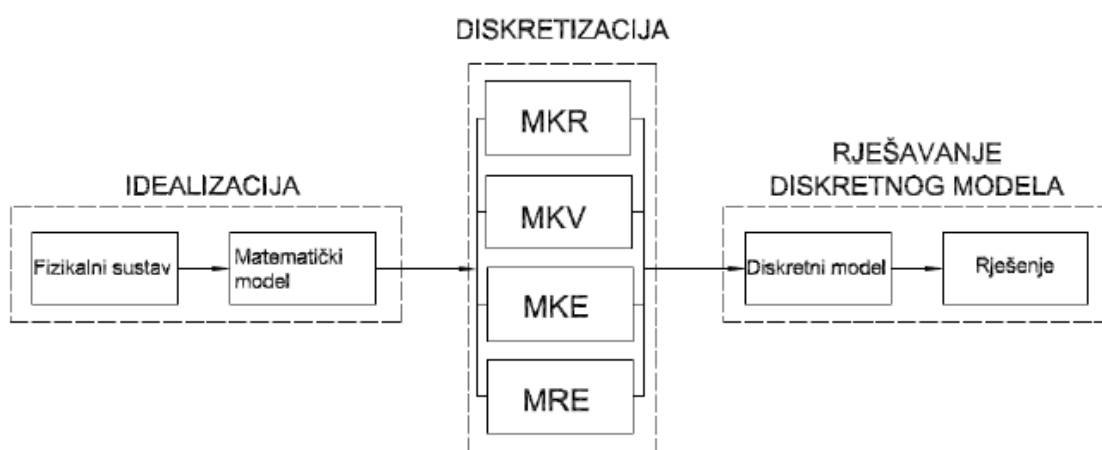
Kako bi se dobilo pouzdano matematičko rješenje potrebno je definirati problem te odabrati adekvatan matematički model. Matematički model je ustvari matematički zapis fizikalnog modela. Rijetko kada je moguće izraditi matematički model koji bi u potpunosti opisao određenu pojavu pa se u obzir uzimaju određene pretpostavke:

- fluid je kontinuum,
- fluid je homogen i izotropan,
- fluid je jednokomponentan ili višekomponentan,
- fluid je jednofazan ili višefazan,
- strujanje fluida je jednodimenzijnsko, dvodimenzijnsko ili trodimenzijnsko,
- strujanje fluida je stacionarno ili nestacionarno,
- strujanje fluida je neviskozno, laminarno ili turbulentno.

Kontinuum je matematički model prema kojem fluid zadržava sva fizikalna svojstva i za infinitezimalno mali volumen dV . Homogenost fluida pretpostavlja jednakost fizikalnih svojstava u svim točkama fluida, dok izotropnost podrazumijeva jednakost fizikalnih svojstava u svim smjerovima. Fluid može biti jednokomponentan ili višekomponentan te

jednofazan ili višefazan. Nadalje, često se zanemaruju promjene fizikalnih veličina u određenim smjerovima kako bi se dobio što jednostavniji matematički model. Tako se problem strujanja fluida od trodimenzijskog svodi na dvodimenzijski (ravninski), a ponekad čak i na jednodimenzijski. Konačno, strujanje fluida se još dijeli prema obliku strujanja na turbulentno i laminarno. Turbulentno strujanje odlikuje velika fluktuacija određenih fizikalnih veličina te vrlo nepravilna putanja čestica. Laminarno strujanje je gibanje fluida u međusobno paralelnim slojevima u kojima ne dolazi do miješanja među česticama i održivo je pri jako niskim vrijednostima Reynoldsovog broja. Strujanje fluida u prirodi je uglavnom trodimenzijsko i turbulentno koje je izrazito nestacionarno strujanje s pulzacijama brzina i tlaka koje su stohastičke prirode [20].

Po završetku definiranja matematičkog modela slijedi rješavanje problema. Numeričko rješavanje problema provodi se u tri koraka. Prvi korak se odnosi na diskretizaciju područja proračuna, odnosno na generiranje geometrijske mreže te postavljanje rubnih uvjeta proračuna. Prilikom generiranja mreže treba voditi brigu o njenoj gustoći te nizu kriterija koje je potrebno ispuniti kako bi krajnji rezultati bili zadovoljavajući. Nažalost, ne postoje algoritmi koji bi automatski generirali mrežu na temelju geometrije područja i rubnih uvjeta proračuna, stoga je potrebno na temelju iskustva pretpostaviti okvirnu sliku strujanja i raspodjelu vrijednosti polja fizikalnih veličina. Drugi korak se sastoji od diskretizacije parcijalnih diferencijalnih jednadžbi na temelju prethodno definirane geometrijske mreže uvažavajući rubne uvjete. U ovom radu diskretizacija je provedena pomoću metode konačnih volumena.



Slika 6. Numerički pristup rješavanju inženjerskih problema [21]

3.3. Osnovni zakoni dinamike fluida

Osnovni zakoni u dinamici fluida za model nestlačivog strujanja glase:

- zakon održanja mase (jednadžba kontinuiteta),
- zakon održanja količine gibanja (jednadžba količine gibanja),
- zakon održanja momenta količine gibanja (jednadžba momenta količine gibanja),
- zakon održanja energije (energetska jednadžba kao poseban izraz prvog zakona termodinamike).

Prethodno navedeni zakoni definirani su za materijalni volumen, a primjenjuju se za kontrolni ili proizvoljni volumen. Materijalni volumen tijekom vremena može mijenjati svoj položaj, oblik i veličinu, ali se uvijek sastoji od istih čestica fluida, dok su položaj, oblik i veličina kontrolnog volumena konstantni u vremenu.

Prema zakonu održanja mase nestlačivog fluida brzina promjene mase materijalnog volumena jednaka je nuli [22]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i) = 0 \quad (28)$$

gdje je ρ gustoća fluida, a v_i vektor brzine.

Prema zakonu održanja količine gibanja brzina promjene količine gibanja materijalnog volumena jednaka je zbroju vanjskih masenih i površinskih sila koje djeluju na materijalni volumen. Jednadžba količine gibanja ili Eulerova jednadžba glasi [22]:

$$\rho \frac{Dv_i}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) = \rho f_i + \frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j} \quad (29)$$

gdje je $\frac{D}{Dt}$ operator materijalne derivacije, f_i gustoća masene sile, a σ_{ij} tenzor naprezanja.

Kako bi se mogao riješiti sustav jednadžbi (28) i (29), nužno je uvesti dodatne pretpostavke o svojstvima fluida. Dopunske (konstitutivne) jednadžbe, odnosno zakoni posebnih ponašanja fluida su [23]:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \Sigma_{ij} \quad (30)$$

$$p = -\frac{1}{3}\sigma_{kk} \quad (31)$$

$$\Sigma_{ij} = 2\mu D_{ij} - \frac{2}{3}\mu D_{kk}\delta_{ij} \quad (32)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (33)$$

gdje je p tlak, δ_{ij} Kroneckerov delta simbol, Σ_{ij} devijatorski dio tenzora naprežanja, D_{ij} tenzor brzine deformacije te μ dinamički koeficijent viskoznosti.

Uvrštavanjem konstitutivnih jednadžbi u jednadžbu (29) slijede Navier-Stokesove jednadžbe:

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \rho v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \rho f_i - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(p + \frac{2}{3} \mu D_{kk} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu D_{ij}) \quad (34)$$

Uvođenjem supstitucije $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ jednadžba (34) postaje:

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \nabla^2 v_i \quad (35)$$

Prema zakonu održanja momenta količine gibanja brzina promjene momenta količine gibanja materijalnog volumena jednaka je zbroju momenata vanjskih sila koje djeluju na materijalni volumen. Zakon održanja energije za materijalni volumen glasi: brzina promjene energije (unutrašnje i kinetičke) materijalnog volumena jednaka je snazi vanjskih masenih i površinskih sila i brzini dovođenja topline materijalnom volumenu [24].

3.4. Turbulentno strujanje fluida

Strujanje fluida dijeli se na laminarno i turbulentno strujanje. Laminarno strujanje je rijetka pojava u prirodi i javlja se pri niskim vrijednostima Reynoldsovog broja, a karakterizira ga pravilno i slojevito strujanje čestica fluida. Laminarno strujanje nije stabilno te vrlo brzo prelazi u turbulentno strujanje, koje je nestacionarno te se javlja pri visokim vrijednostima Reynoldsovog broja, a karakteriziraju ga slučajne fluktuacije pojedinih veličina te nepravilne putanje čestica fluida [22].

3.4.1. Reynoldsovo vremensko osrednjavanje

Umjesto direktnog rješavanja Navier–Stokesovih jednadžbi, za opis turbulentnog strujanja moguće je primijeniti Reynoldsove osrednjene Navier–Stokesove jednadžbe (RANS). Određenu fizikalnu veličinu f moguće je prikazati kao zbroj vremenski osrednjenog dijela \bar{f} koji nije funkcija vremena te pulsirajućeg dijela f' koji je funkcija vremena kako slijedi [23]:

$$f(x_i, t) = \bar{f}(x_i) + f'(x_i, t) \quad (36)$$

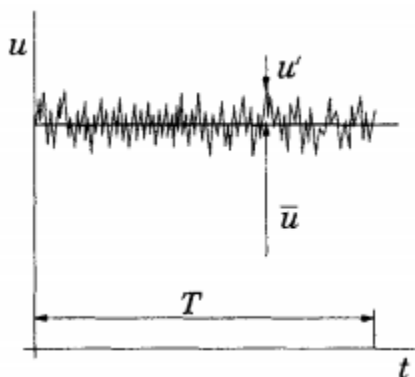
Vremenski osrednjeni dio \bar{f} određuje se kako slijedi:

$$\bar{f}(x_i) = \frac{1}{T} \int_{T/2}^{T/2} f(x_i, t) dt \quad (37)$$

gdje je T period osrednjavanja, a t vrijeme. Važno je da period osrednjavanja bude dovoljno velik tako da vremenski osrednjena vrijednost \bar{f} ne ovisi o početnom trenutku osrednjavanja. Za dobro izabran period T vrijedi da je osrednjena vrijednost pulsirajućeg dijela odabrane fizikalne veličine jednaka nuli:

$$\bar{f}'(x_i, t) = 0 \quad (38)$$

Na slici 7. prikazan je primjer osrednjavanja fizikalne veličine u .



Slika 7. Vremensko osrednjavanje fizikalne veličine u [25]

Nestlačivo strujanje uz zanemarenje masenih sila može se opisati jednadžbom kontinuiteta (28) i jednadžbom količine gibanja (29) u kojima su nepoznanice komponente polja brzine v i polje tlaka p , koje je moguće prikazati kao zbroj osrednjene vrijednosti i pulsirajućeg dijela na sljedeći način [23]:

$$v_i = \bar{v}_i + v'_i \quad (39)$$

$$p_i = \bar{p}_i + p'_i \quad (40)$$

gdje je \bar{v}_i vremenski osrednjena komponenta brzine, v'_i pulsirajuća komponenta brzine, \bar{p}_i vremenski osrednjena komponenta tlaka i p'_i pulsirajuća komponenta tlaka.

Uvrštavanjem jednadžbi (39) i (40) u jednadžbu kontinuiteta (28) za nestlačivo strujanje fluida dobiva se:

$$\frac{\partial(\bar{v}_i + v'_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (41)$$

Osrednjavanjem jednadžbe (41) dobiva se jednadžba kontinuiteta za osrednjeno strujanje:

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (42)$$

iz čega slijedi jednačba kontinuiteta za pulsirajuće strujanje:

$$\frac{\partial v'_i}{\partial x_i} = 0 \quad (43)$$

Budući da za linearnu jednačbu kontinuiteta vrijedi princip superpozicije, jednačbe kontinuiteta za pulsirajuće strujanje i vremenski osrednjeno strujanje su ekvivalentne. U inženjerskoj praksi je dovoljno odrediti rješenja jednačbe za vremenski osrednjeno strujanje, a pulsirajuće se može zanemariti. Jednačba količine gibanja za osrednjeno strujanje glasi:

$$\rho \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \rho \bar{v}_j \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{v'_i v'_j} \right) \quad (44)$$

Posljednji član s desne strane jednačbe (44) predstavlja Reynoldsov tenzor naprezanja, odnosno tenzor turbulentnog naprezanja. Reynoldsov tenzor naprezanja nastaje osrednjavanjem Navier–Stokesovih jednačbi te se sastoji od pulsirajućih vrijednosti brzina i tlaka. Predstavlja utjecaj turbulencije na prijenos količine gibanja koja nastaje miješanjem čestica fluida. Reynoldsovim osrednjavanjem pokušava se stohastička priroda turbulentnog strujanja prikazati vremenski osrednjenim poljima brzine i tlaka, a to je moguće ako je poznato beskonačno mnogo korelacija brzina i tlaka. Međutim, iskustvo pokazuje da je dovoljno poznavati konačan broj korelacija da bi se odredile značajke polja strujanja interesantne sa stajališta inženjerske prakse. Usklađivanje broja jednačbi i nepoznanica zadatak je modela turbulencije i u ovom radu korišten je $k-\omega$ SST model turbulencije koji je opisan u nastavku teksta [20].

3.4.2. $k-\omega$ SST model turbulencije

$k-\omega$ SST model turbulencije je model s dvije transportne jednačbe koji rješava jednačbu za kinetičku energiju turbulencije k i specifičnu brzinu disipacije ω . Ovaj model je dobiven kombinacijom $k-\omega$ i $k-\varepsilon$ modela, gdje je $k-\omega$ model prikladan za opis strujanja fluida uz stijenku, dok je $k-\varepsilon$ prikladan za popis slobodnog strujanja fluida. Ovaj model je primjenjiv u čitavom području graničnog sloja, uključujući i područja velikog utjecaja viskoznosti, bez potrebe za dodatnim modifikacijama. Sustav jednačbi koje opisuju $k-\omega$ SST model turbulencije sastoji se od [26,27]:

- jednačbe za kinetičku energiju turbulencije:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_k v_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (45)$$

- jednadžbe za specifičnu brzinu disipacije:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_\omega v_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (46)$$

gdje je P_k produkcijski član, β^* i β koeficijenti modela turbulencije, σ_k i σ_ω inverzni turbulentni Schmidtovi brojevi, F_1 funkcija miješanja, $CD_{k\omega}$ koeficijent unakrsne difuzije, a v_T kinematički koeficijent turbulentne viskoznosti.

Funkcija miješanja F_1 računa se kao:

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y} - \frac{500v}{y^2 \omega}, \frac{4\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right) \right]^4 \right\} \right\} \quad (47)$$

gdje je y udaljenost od krute stijenke.

Koeficijent unakrsne difuzije $CD_{k\omega}$ računa se kao:

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right) \quad (48)$$

Kinematički koeficijent turbulentne viskoznosti računa se kao:

$$v_T = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, SF_2)} \quad (49)$$

Funkcija miješanja F_2 računa se kao:

$$F_2 = \tanh \left[\left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right] \quad (50)$$

Produkcijski član računa se kao:

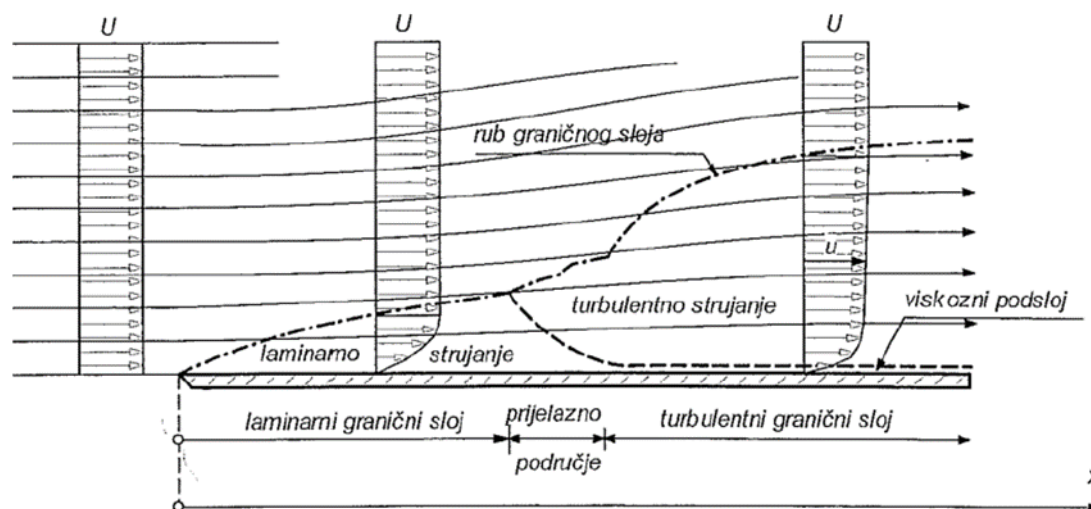
$$P_k = \min \left(\tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}, 10\beta^* k \omega \right) \quad (51)$$

3.5. Strujanje u graničnom sloju

U mehanici fluida, granični sloj fluida uz stijenkku nastaje pod utjecajem viskoznosti, a brzina fluida mijenja se u smjeru normale na oplakanu površinu. Debljina graničnog sloja definirana je kao 99% brzine vanjskog potencijalnog strujanja. Pretpostavlja se da se izvan graničnog sloja, učinci viskoznih sila mogu zanemariti [22]. Kod broda se debljina graničnog sloja povećava od pramca prema krmu, a isto tako se uz konstantnu brzinu gibanja broda povećava i lokalna vrijednost Reynoldsovog broja. U pramčanom dijelu trupa broda vrijednosti lokalnih Reynoldsovih brojeva su niske pa je granični sloj na samom početku laminaran. Prema krmu

broda vrijednosti lokalnog Reynoldsovog broja se povećavaju te strujanje postaje turbulentno. Prijelaz iz laminarnog strujanja u turbulentno odvija se postupno u tzv. prijelaznom području. Mehanizam prijelaza laminarnog u turbulentni granični sloj duž glatke ravne ploče prikazan je na slici 8. [28].

Modeli turbulencije vrijede za visoke vrijednosti Reynoldsovog broja dok je za područja s niskim vrijednostima Reynoldsovog broja potrebno definirati unutarnje rubne uvjete. Za opisivanje turbulencije u ovom radu korištene su zidne funkcije.



Slika 8. Granični sloj uz ravnu ploču [28]

Bezdimenzijski profil brzine u graničnom sloju izražava se kao funkcija bezdimenzijske udaljenosti od stijenke [20]:

$$u^+ = f(y^+) \quad (52)$$

gdje su bezdimenzijska brzina u^+ i bezdimenzijska udaljenost od stijenke y^+ definirani izrazima:

$$u^+ = \frac{\bar{u}}{u_\tau} \quad (53)$$

$$y^+ = \frac{y u_\tau}{\nu} \quad (54)$$

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (55)$$

gdje je \bar{u} komponenta brzine strujanja paralelna sa stijenkom, u_τ brzina trenja, y udaljenost od stijenke, a τ_w tangencijalno naprezanje na stijenci.

Za laminarni podsloj vrijedi linearni profil brzine:

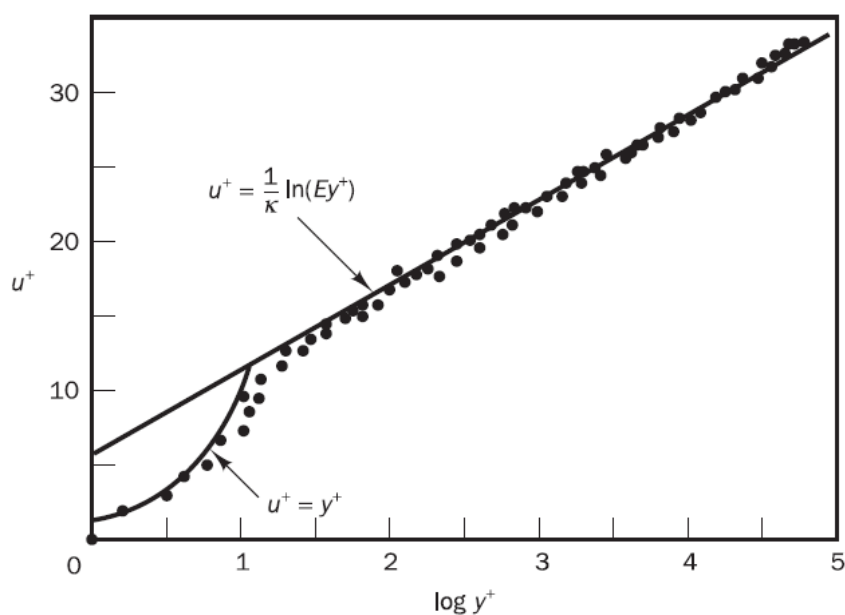
$$u^+ = y^+ \quad (56)$$

U logaritamskom području bezdimenzijski profil brzine glasi:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B \quad (57)$$

gdje se Von Karmanova konstanta κ i konstanta integracije B određuju mjerenjima.

Na slici 6. je prikazan odnos bezdimenzijske brzine i bezdimenzijske udaljenosti od stijenke u turbulentnom graničnom sloju. Unutarnji sloj turbulentnog graničnog sloja dijeli se na linearni podsloj za koji vrijedi $y^+ < 5$, prijelazni sloj za koji vrijedi $5 \leq y^+ < 30$ i na logaritamski sloj gdje vrijedi $y^+ \geq 30$.



Slika 9. Bezdimezijski profil brzine strujanja u turbulentnom graničnom sloju [29]

Kako bi se valjano opisalo strujanje logaritamskim profilom brzine, primijenjene su zidne funkcije, a vrijednosti bezdimenzijskog parametra y^+ potrebno je ostvariti u granicama $30 \leq y^+ \leq 500$. U svakom slučaju je potrebno izbjeći da iznos parametara y^+ odgovara vrijednosti za prijelazni sloj jer je u tom slučaju u^+ gotovo nemoguće opisati.

3.6. Metoda konačnih volumena

Kao što je već rečeno, diferencijalne jednačbe matematičkog modela strujanja fluida nije moguće riješiti analitičkim putem, stoga ih je potrebno svesti na konačan broj algebarskih jednačbi. Postupak svođenja diferencijalnih jednačbi na konačan broj algebarskih jednačbi provodi se nekom od numeričkih metoda. Za probleme dinamike fluida posebno je pogodna metoda konačnih volumena. Njome se proračunska domena diskretizira na konačan broj manjih volumena za koje se postavljaju jednačbe s pripadnim rubnim i početnim uvjetima. Metoda konačnih volumena temelji se na integriranju konzervativnog oblika transportnih jednačbi po kontrolnim volumenima na koje je podijeljena proračunska domena [20]:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Delta V} \rho \varphi dV = - \int_{\Sigma \Delta S} (\rho v_j \varphi - \Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x_j}) n_j dS + \int_{\Delta V} S_\varphi dV \quad (58)$$

gdje član s lijeve strane jednačbe predstavlja brzinu promjene sadržaja fizikalnog svojstva φ unutar konačnog volumena dV , prvi član s desne strane jednačbe predstavlja konvekcijski i difuzijski protok φ kroz granice volumena, a drugi član s desne strane jednačbe izvor (ponor) fizikalne veličine φ .

3.7. Metoda udjela fluida u volumenu – VOF metoda

U programskom paketu STAR-CCM+ za praćenje i opisivanje položaja slobodne površine primjenjuje se metoda udjela fluida u volumenu (eng. *Volume of Fluid*, VOF). VOF metoda omogućuje modeliranje strujanja dvaju ili više fluida koji se međusobno ne miješaju. Pretpostavka VOF metode je da sve faze na zajedničkoj granici dijele ista polja brzine, tlaka i temperature, stoga nema potrebe za modeliranjem međufaznih interakcija navedenih veličina [27]. U numeričkim simulacijama pokusa otpora postoje dvije faze fluida, odnosno voda i zrak. Volumni udio pojedine faze u kontrolnom volumenu definira se preko parametra α_i [27]:

$$\alpha_i = \frac{V_i}{V} \quad (59)$$

gdje je V_i volumen i -tog fluida u kontrolnom volumenu, a V kontrolni volumen. Na temelju parametra α_i moguće je definirati tri slučaja:

1. $\alpha_i = 0$, ćelija je u potpunosti ispunjena zrakom,
2. $0 < \alpha_i < 1$, ćelija sadržava i vodu i zrak,
3. $\alpha_i = 1$, ćelija je u potpunosti ispunjena vodom.

Slobodna površina određuje se tako da se prate ćelije koje imaju parametar $\alpha_i = 0,5$.

Dinamički koeficijent viskoznosti μ i gustoća ρ računaju se kao:

$$\mu = \sum_i \mu_i \alpha_i \quad (60)$$

$$\rho = \sum_i \rho_i \alpha_i \quad (61)$$

gdje je μ_i dinamički koeficijent viskoznosti pojedine faze fluida, a ρ_i gustoća pojedine faze fluida.

3.8. Validacija rezultata numeričkih simulacija

Validacija je postupak ocjene točnosti rezultata dobivenih numeričkim simulacijama s rezultatima dobivenim eksperimentalno. Cilj je ostvariti što veću točnost numeričkih rezultata za određeni problem [30]. U ovom radu, numerički rezultati uspoređeni su s ekstrapoliranim vrijednostima pokusa otpora provedenih u Brodarskom institutu u Zagrebu [31]. Odstupanje numeričkih podataka od onih dobivenih ekstrapolacijom definirano je relativnom devijacijom RD kako slijedi:

$$RD, \% = \frac{R_{T,RDF} - R_{T,EKST}}{R_{T,EKST}} \cdot 100 \quad (62)$$

gdje je $R_{T,RDF}$ ukupni otpor dobiven numeričkom simulacijom, a $R_{T,EKST}$ ekstrapolirana vrijednost ukupnog otpora.

3.9. Verifikacija rezultata numeričkih simulacija

Verifikacija rezultata je postupak kojim se procjenjuje nesigurnost i konvergencija rezultata numeričkih simulacija. Za provedbu verifikacije potrebna su najmanje tri rješenja, stoga su u ovom radu generirane tri različite gustoće mreže (gruba, srednja i fina mreža) te su primijenjena tri vremenska koraka [32].

3.9.1. Konvergencija rezultata iterativnog postupka

Omjer konvergencije definiran je kao razlika rezultata dobivenih srednjom i finom mrežom te grubom i srednjom mrežom:

$$R_i = \frac{\varepsilon_{i,21}}{\varepsilon_{i,32}} \quad (63)$$

Razlike između rezultata $\varepsilon_{i,21}$ i $\varepsilon_{i,32}$ određuju se prema sljedećim izrazima [32]:

$$\varepsilon_{i,21} = \hat{S}_{i,2} - \hat{S}_{i,1} \quad (64)$$

$$\varepsilon_{i,32} = \hat{S}_{i,3} - \hat{S}_{i,2} \quad (65)$$

gdje su $\hat{S}_{i,1}$, $\hat{S}_{i,2}$ i $\hat{S}_{i,3}$ rješenja za finu, srednju i grubu mrežu.

Prema omjeru konvergencije R_i definirana su tri tipa konvergencije rezultata numeričke simulacije:

- monotona konvergencija, $0 < R_i < 1$,
- oscilatorna konvergencija, $-1 < R_i < 0$,
- divergencija, $|R_i| > 1$.

3.9.2. Procjena nesigurnosti rezultata numeričkih simulacija

Numerička nesigurnost procjenjuje se prema tipu konvergencije [33]. Za monotonu konvergenciju nesigurnost rezultata numeričkih simulacija određuje se pomoću Richardsonove ekstrapolacije [33]:

$$U_i = F_S \delta_{RE_{i,1}}^{*(1)} \quad (66)$$

gdje se faktor sigurnosti F_S i greška $\delta_{RE_{i,1}}^{*(1)}$ određuju pomoću izraza:

$$F_S = 1,25 \delta_{RE_{i,1}}^{*(1)} \quad (67)$$

$$\delta_{RE_{i,1}}^{*(1)} = \frac{\varepsilon_{i,21}}{r_i^{p_i} - 1} \quad (68)$$

Omjer profinjenja r_i računa se kao:

$$r_i = \sqrt{\frac{N_i}{N_{i+1}}} \quad (69)$$

gdje je N_i broj ćelija mreže.

Red točnosti p_i glasi:

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

Za slučaj oscilatorne konvergencije nesigurnost se procjenjuje pomoću izraza:

$$U_i = \frac{1}{2} |S_u - S_L| \quad (71)$$

gdje je S_u gornja, a S_L donja vrijednost rezultata dobivenog numeričkom simulacijom.

Konačno, u slučaju divergencije nesigurnost se procjenjuje pomoću izraza:

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

Ukupna nesigurnost numeričke simulacije $\overline{U_{SN}}$ računa se kako slijedi:

$$\overline{U_{SN}} = \sqrt{\overline{U_G}^2 + \overline{U_T}^2} \quad (73)$$

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

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

gdje je $\overline{U_G}$ nesigurnost mreže, a $\overline{U_T}$ nesigurnost vremenskog koraka.

4. POSTAVKE NUMERIČKIH SIMULACIJA POKUSA OTPORA

U ovom radu provedene su numeričke simulacije pokusa otpora 6750-TEU kontejnerskog broda, čije su značajke dane u literaturi [4] i prikazane u tablici 1. Proračuni su provedeni za brod u naravi kojem je omogućeno translacijsko gibanje u smjeru osi z , odnosno poniranje (eng. *sinkage*), i rotacijsko gibanje oko osi y , odnosno uzdužni nagib (eng. *trim*). Numeričke simulacije provedene su pri Froudeovom broju $Fn=0,193$ za četiri različita kuta trima: $0,25^\circ$ i $0,5^\circ$ pretege te $0,25^\circ$ i $0,5^\circ$ zatege broda. Na temelju dobivenih rezultata ukupnog otpora za analizirane kutove trima, dan je prijedlog optimalnog trima broda.

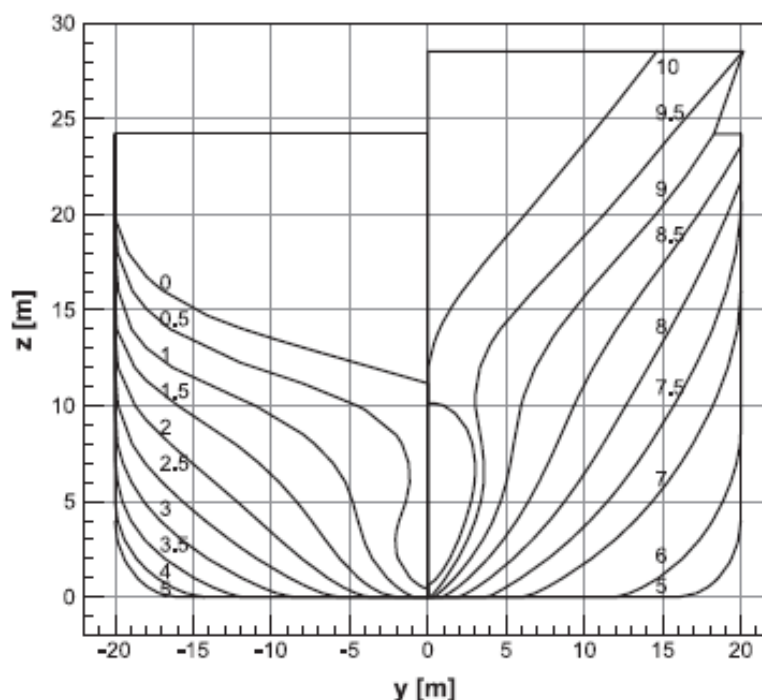
Tablica 1. Značajke 6750-TEU kontejnerskog broda [4]

Značajka	Vrijednost
L_{OA}	300,891 m
L_{PP}	286,6 m
B	40 m
D	24,2 m
T	11,98 m
Δ	85862,7 t
KM	18,662 m
GM	2,1 m
V_{CG}	16,562 m
L_{CG}	138,395 m
k_{xx}	14,6 m
k_{yy}	70,144 m
k_{zz}	70,144 m

Numeričke simulacije provedene su u komercijalnom programskom paketu za računalnu dinamiku fluida STAR-CCM+ [27]. Trodimenzijski model broda učitani je u programski paket STAR-CCM+ pomoću naredbe za unos geometrije (eng. *import surface mesh*). Na slici 10. prikazan je 3D model nakon unosa u programski paket, dok je na slici 11. prikazan nacrt rebara broda. Ishodište koordinatnog sustava je postavljeno na konstrukcijskoj vodnoj liniji na krmenoj okomici, gdje je pozitivan smjer osi x prema pramcu broda, osi y prema lijevom boku broda, a osi z prema gore.



Slika 10. 3D model 6750-TEU kontejnerskog broda

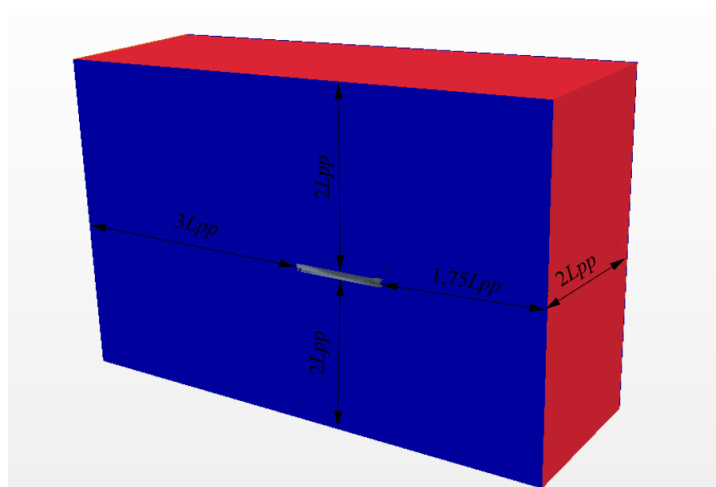


Slika 11. Nacrt rebara 6750-TEU kontejnerskog broda [4]

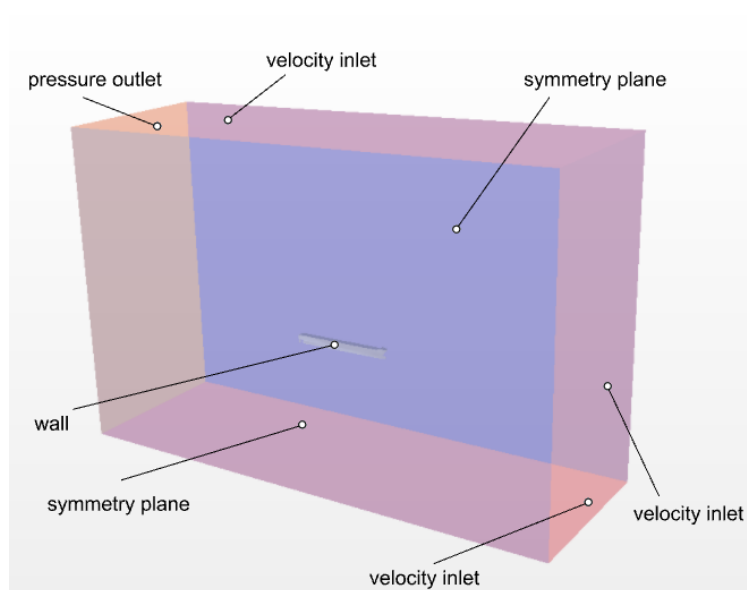
4.1. Kreiranje proračunske domene i zadavanje rubnih uvjeta

Za provedbu numeričkih simulacija pokusa otpora potrebno je kreirati proračunsku domenu oko trupa broda odgovarajućih dimenzija i postaviti rubne uvjete za sve granice domene kako bi se vjerno predočila plovidba broda u neograničenoj vodi [27]. Domena je kvadratnog oblika, a udaljenosti granica domene od modela postavljene su prema preporukama ITTC-a [34]. Granice moraju biti postavljene dovoljno daleko kako bi se izbjegao njihov utjecaj na numeričko rješenje, a definiranje odgovarajućih rubnih uvjeta za sve granice iznimno je važno za dobivanje točnog numeričkog rješenja. Ulazna granica postavljena je na udaljenosti $1,75L_{PP}$ ispred pramca broda, izlazna granica na udaljenosti $3L_{PP}$ iza krme broda, gornja granica na udaljenosti $2L_{PP}$ iznad broda, donja granica na udaljenosti $2L_{PP}$ ispod broda, a bočna granica na udaljenosti $2L_{PP}$ bočno od broda.

Na površini trupa broda postavljen je rubni uvjet zida (eng. *wall*) na čijoj je stijenci brzina jednaka nuli iz razloga što su numeričke simulacije provedene na način da brod miruje, a fluid nastrujava na njega. Na ulaznoj, donjoj i gornjoj granici domene postavljen je rubni uvjet koji definira brzinu strujanja (eng. *velocity inlet*), a na izlaznoj granici postavljen je rubni uvjet koji definira tlak na izlazu iz domene (eng. *pressure outlet*). Na obje bočne granice domene postavljen je rubni uvjet simetrije (eng. *symmetry plane*). Upotreba rubnog uvjeta simetrije omogućuje simuliranje strujanja oko polovice broda čime se dvostruko smanjuje broj ćelija, a isto tako i vrijeme potrebno za numerički proračun. Na slici 12. prikazane su udaljenosti granica domene od trupa broda, a na slici 13. prikazani su rubni uvjeti domene.



Slika 12. Udaljenosti granica domene od trupa broda



Slika 13. Rubni uvjeti domene

4.2. Diskretizacija proračunske domene

Način diskretizacije proračunske domene konačnim volumenima ima izravan utjecaj na točnost numeričkih rezultata. Mreža konačnih volumena generirana je korištenjem alata za automatsku diskretizaciju mreže (eng. *automated mesh*), koji je sastavni dio programskog paketa STAR-CCM+.

U ovom radu odabrani su sljedeći alati unutar alata za automatsko generiranje mreže:

- 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*).

Alat za rediskretizaciju površine koristi se kako bi se poboljšala ukupna kvaliteta postojeće površine, dok alat za automatski popravak površine ispravlja probleme na geometrijskoj mreži, koji su nastali prethodnom diskretizacijom. Alat za diskretizaciju izrezanih ćelija uklanja nepotrebne površine oko tijela. Alat za diskretizaciju prizama unutar graničnog sloja generira prizmatične ćelije unutar graničnog sloja te je nužan kako bi se obuhvatilo strujanje oko tijela. Prizmatični sloj definiran je brojem konačnih volumena, ukupnom debljinom sloja prizama i faktorom rastezanja [27]. U tablici 2. prikazane su odabrane postavke diskretizacije fine mreže.

Tablica 2. Postavke diskretizacije fine mreže

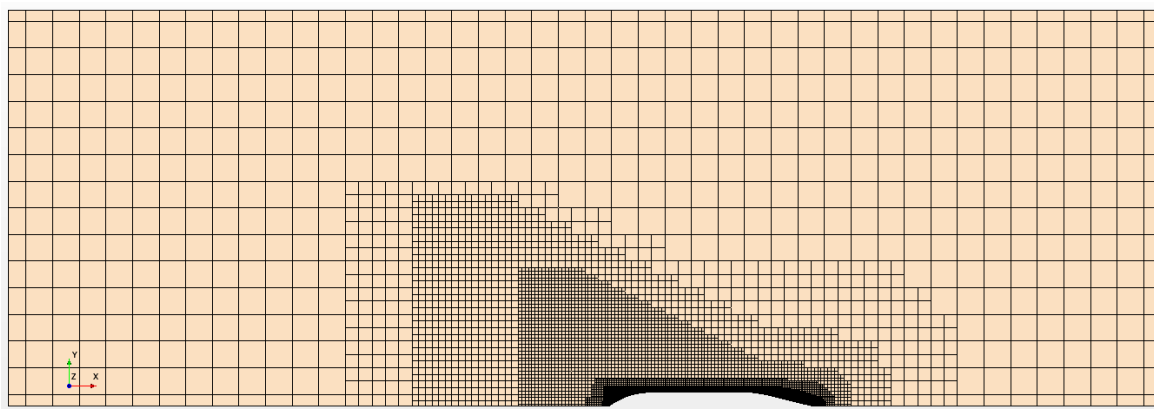
Postavka	Opcija	Vrijednost
Osnovna veličina ćelije	Vrijednost	2,4 m
Ciljana veličina površine	Postotak osnovne veličine	50%
Minimalna veličina površine	Postotak osnovne veličine	6,25%
Zakrivljenost površine	Broj točaka u krugu	36
Automatsko popravljanje površine	Minimalna neposredna blizina	0,001
Broj slojeva prizama	Broj	20
Ukupna debljina prizmatičnog sloja	Apsolutna vrijednost	1,1 m
Faktor rastezanja	Koeficijent	1,3
Stopa rasta	Zadana stopa rasta	Sporo
Stopa rasta	Stopa rasta granice	Sporo
Maksimalna veličina površine	Postotak osnovne veličine	1600%

Generirane su tri različite gustoće mreže: gruba, srednja i fina. Mreže se razlikuju jedino u veličini osnovne ćelije za konstantan omjer profinjenja u iznosu $\sqrt{2}$ prema preporukama ITTC-a [34]. U tablici 3. prikazane su osnovne veličine ćelije za svaku od mreža i ukupni broj ćelija.

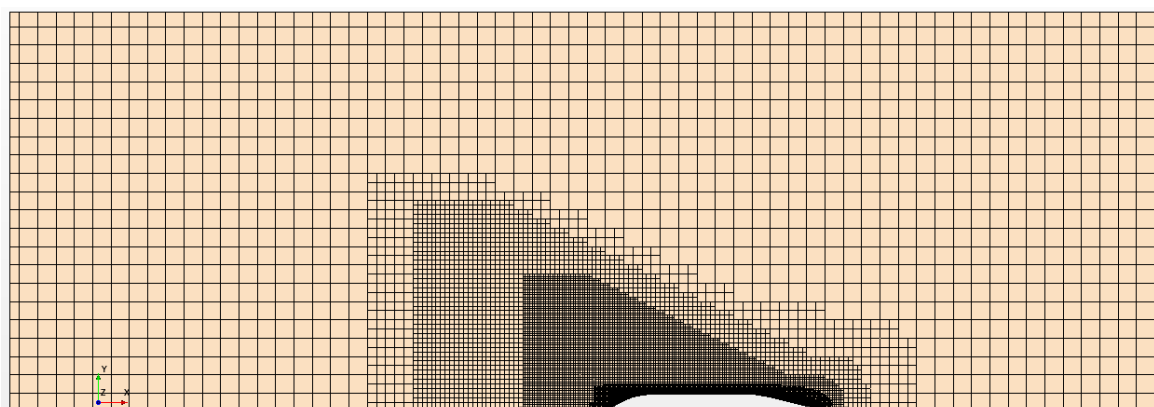
Tablica 3. Veličina osnovne ćelije i ukupni broj ćelija

Mreža	Gruba mreža	Srednja mreža	Fina mreža
Osnovna veličina ćelije	4,8 m	3,4 m	2,4 m
Broj ćelija	845801	1745808	3428590

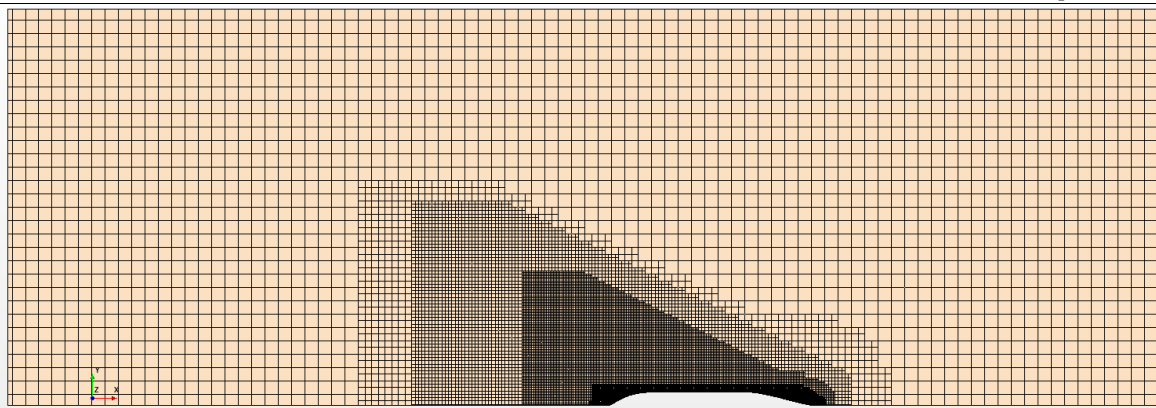
Na slici 14. prikazana je gruba mreža, na slici 15. srednja mreža, a na slici 16. fina mreža.



Slika 14. Presjek grube mreže u razini vodne linije



Slika 15. Presjek srednje mreže u razini vodne linije



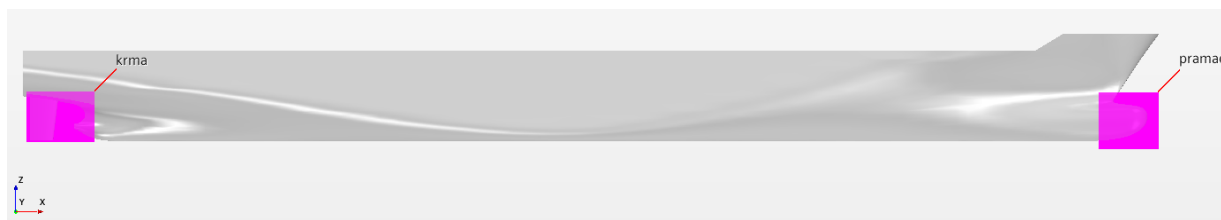
Slika 16. Presjek fine mreže u razini vodne linije

4.3. Dodatna profinjenja geometrijske mreže

Dodatna profinjenja mreže provode se kako bi se profinili oštri rubovi geometrije ili kako bi se što točnije opisalo strujanje oko tijela u području velikih gradijenata tlaka i brzine. Područja profinjenja geometrijske mreže definiraju se pomoću površinskih ili volumenskih kontrola na način da se za svako profinjenje postavi veličina ćelije. Važno je pripaziti da se između profinjenja i osnovne mreže osigura postupni prijelaz između ćelija. U ovom radu definirana su sljedeća volumenska profinjenja:

- profinjenje pramca i krme,
- profinjenje oko trupa broda,
- profinjenje slobodne površine,
- profinjenje za Kelvinov kut valova.

Na slici 17. prikazano je profinjenje u području pramca i krme. Profinjenja su generirana u obliku kvadra, a veličine ćelije su postavljene kao 12,5 % veličine osnovne ćelije.

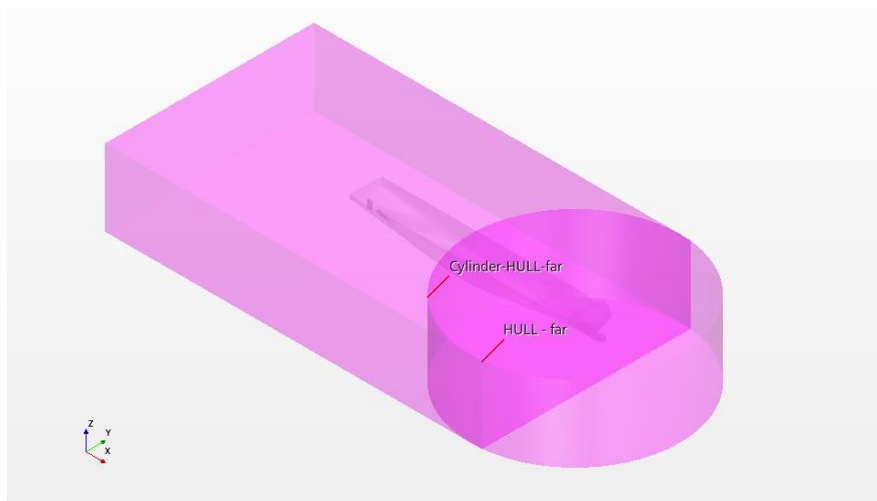


Slika 17. Volumensko profinjenje pramca i krme

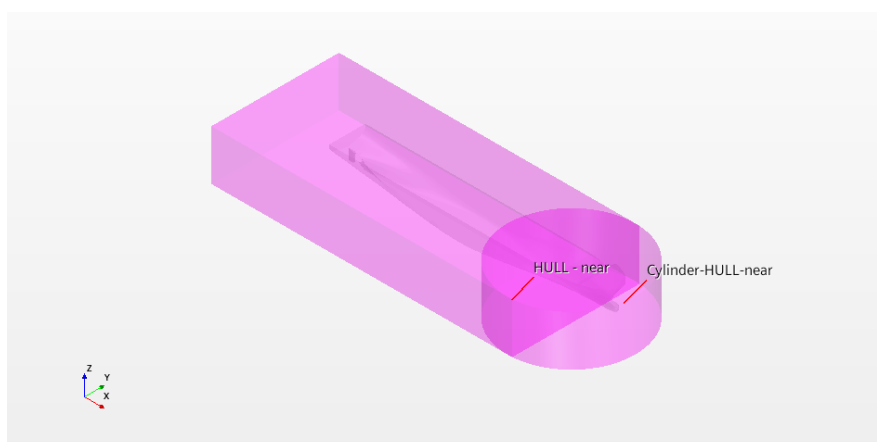
Na slikama 18.–21. prikazane su redom četiri razine volumenskih profinjenja koja se odnose na trup broda, između kojih je važno osigurati postepen prijelaz između pojedinih profinjenja. U tablici 4. prikazane su vrijednosti postavljenih veličina ćelija za svako od profinjenja kao postotak u odnosu na veličinu osnovne ćelije.

Tablica 4. Veličine ćelija u odnosu na osnovnu veličinu ćelije u profinjenjima oko trupa broda

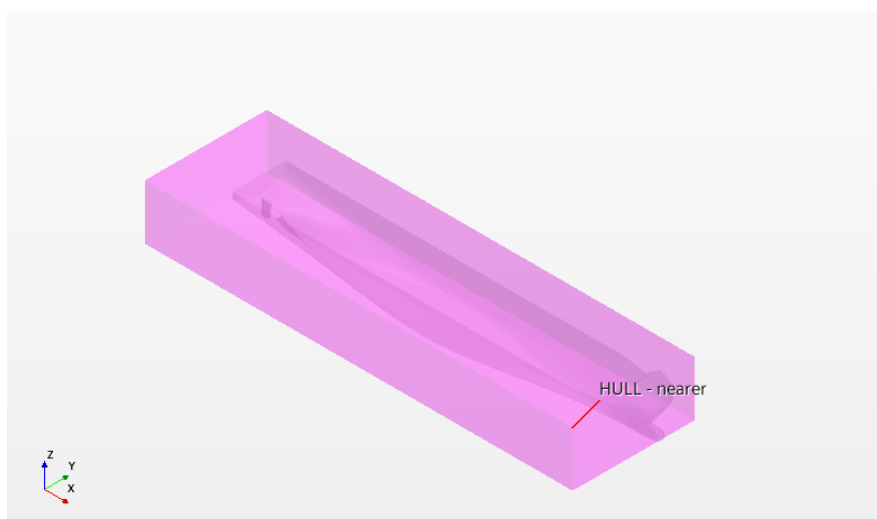
Volumenska kontrola	„far“	„near“	„nearer“	„very near“
Veličina ćelije u x i y smjeru	400%	200%	100%	50%
Veličina ćelije u z smjeru	200%	100%	50%	50%



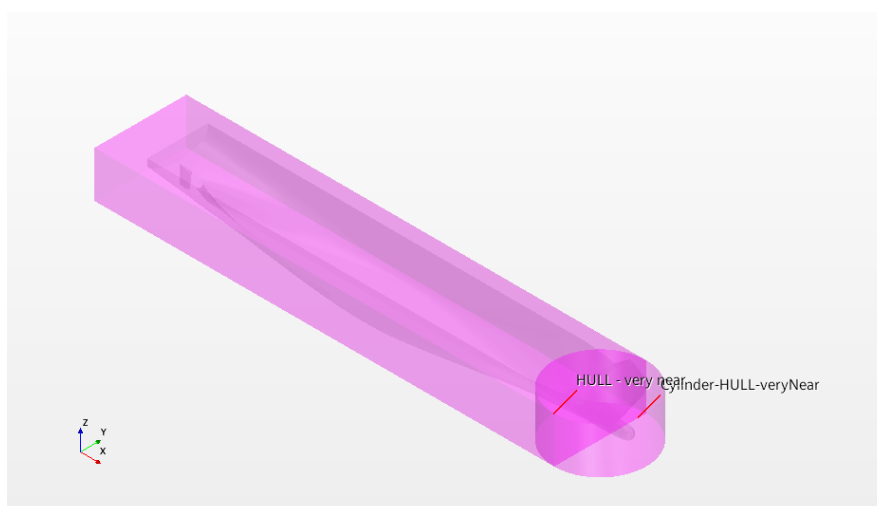
Slika 18. Volumensko profinjenje oko trupa broda „far“



Slika 19. Volumensko profinjenje oko trupa broda „near“



Slika 20. Volumensko profinjenje oko trupa broda „nearer“

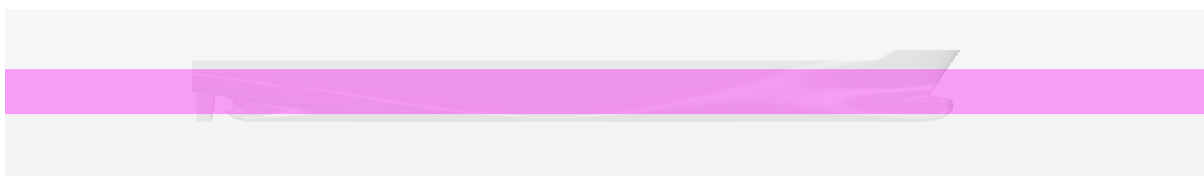
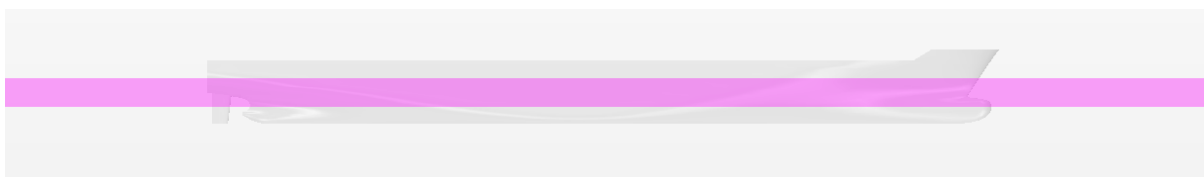


Slika 21. Volumensko profinjenje oko trupa broda „very near“

Cilj profinjenja slobodne površine je gušća mreža u području očekivane slobodne površine oko trupa broda kako bi se adekvatno obuhvatila slika valova. Profinjenje slobodne površine je od velike važnosti te je potrebno obuhvatiti najveće valne visine, primjerice visinu pramčanog vala, unutar profinjenja slobodne površine s najmanjom veličinom ćelije. Prema preporukama [34] potrebno je generirati minimalno 80 ćelija po valnoj duljini te minimalno 20 ćelija po valnoj visini. Na slikama 22.–24. prikazana su redom tri volumenska profinjenja slobodne površine: „coarse“, „fine“ i „very fine“, a u tablici 5. prikazane su vrijednosti veličina ćelija u z smjeru u odnosu na osnovnu veličinu ćelije. U smjeru x i y osi postavljena je veličina ćelije kao 800% osnovne veličine ćelije za sva tri volumenska profinjenja.

Tablica 5. Veličina ćelija profinjenja slobodne površine

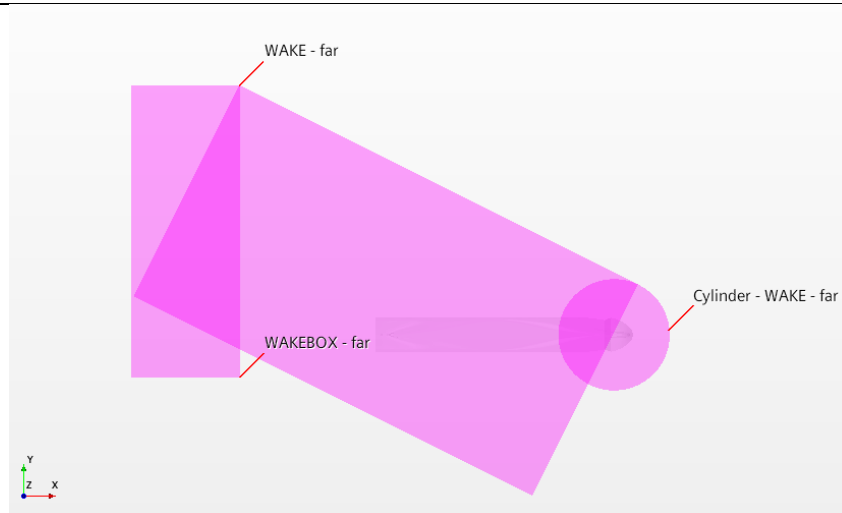
Volumenska kontrola	„coarse“	„fine“	„very fine“
Veličina ćelije u z smjeru	50%	25%	12,5%

**Slika 22. Profinjenje slobodne površine „coarse“****Slika 23. Profinjenje slobodne površine „fine“****Slika 24. Profinjenje slobodne površine „very fine“**

Za obuhvaćanje Kelvinovog kuta generirane su tri volumenske kontrole: „wake very far“, „wake far“ i „wake near“. Na slici 25. prikazan je primjer volumenskog profinjenja za „wake far“, a u tablici 6. prikazane su vrijednosti za sve tri razine profinjenja u odnosu na veličinu osnovne ćelije. Dodatno, za profinjenje „wake very far“ postavljeno je profinjenje u z smjeru u iznosu od 400% osnovne veličine ćelije.

Tablica 6. Veličine profinjenja za obuhvaćanje Kelvinovog kuta

Volumenska kontrola	„wake very far“	„wake far“	„wake near“
Veličina ćelije u x smjeru	400%	200%	100%
Veličina ćelije u y smjeru	400%	200%	100%



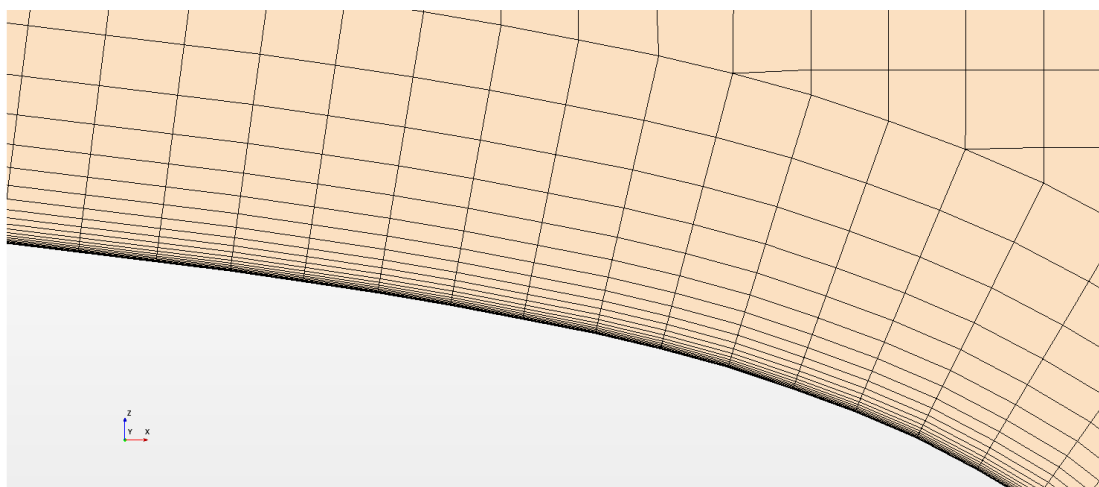
Slika 25. Profinjenje „wake far“ za obuhvaćanje Kelvinovog kuta

Područje uz trup broda diskretizirano je slojem prizama kako bi se obuhvatilo strujanje u turbulentnom graničnom sloju. Kako bi se mogle primijeniti zidne funkcije i profil brzine opisati logaritamskim zakonom, potrebno je zadovoljiti vrijednost parametra y^+ , koji za brod u naravi mora biti u rasponu $30 \leq y^+ \leq 500$. Kako bi se to postiglo, visina prve ćelije definirana je kao [35]:

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

gdje je y polovina visine prve ćelije graničnog sloja.

Važno je napomenuti kako je potrebno osigurati postupni prijelaz iz sloja prizama u geometrijsku mrežu. Na slici 26. prikazan je sloj prizmatičnih ćelija na bulbu broda.



Slika 26. Sloj prizama na bulbu broda

4.4. Izbor fizikalnog modela

Nakon diskretizacije domene, sljedeći korak je odabir odgovarajućeg fizikalnog modela za opis viskoznog strujanja fluida oko trupa broda. Trodimenzijsko strujanje nestlačivog viskoznog fluida je modelirano pomoću RANS jednadžbi te je odabran $k-\omega$ SST model turbulencije. Za opisivanje slobodne površine primijenjena je metoda udjela fluida u volumenu (eng. *Volume of Fluid*, VOF) za koju je potrebno definirati dvije faze, zrak i vodu. Unutar VOF modela definirana je brzina strujanja vode i zraka pri zadanom Frodueovom broju te duljina prigušenja generiranih valova. Za duljinu prigušenja valova unutar proračunske domene odabrana je duljina između okomica broda L_{PP} , a prigušenje je zadano na ulaznoj, izlaznoj i bočnoj granici domene, prema preporuci [27], kako bi se onemogućio utjecaj refleksije valova na konačan rezultat numeričkih simulacija.

4.5. Postavke parametra rješavača

Kao parametre rješavača potrebno je definirati vremenski korak, broj unutarnjih iteracija po vremenskom koraku te ukupno fizikalno vrijeme. Vremenski korak definira se kao vrijeme koje je potrebno da čestica fluida koja se giba određenom brzinom prijeđe ukupnu duljinu broda [34]:

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

gdje je v brzina strujanja čestice fluida.

S ciljem provođenja postupka verifikacije vremenskog koraka definirana su tri različita vremenska koraka: $T/50$, $T/100$ i $T/200$, čiji su iznosi prikazani u tablici 7. Broj unutarnjih iteracija postavljen je kao 5, a ukupno fizikalno vrijeme kao $15T$.

Tablica 7. Vrijednosti vremenskog koraka

Vremenski korak	$T/50$	$T/100$	$T/200$
Vrijednost	0,557 s	0,279 s	0,139 s

Odabrani su podrelaksacijski faktori za poboljšavanje konvergencije po vremenskom koraku. Podrelaksacijski faktor za tlak postavljen je kao 0,3, za brzinu kao 0,5, za k i ω kao 0,6, a za turbulentnu viskoznost 0,8.

5. ANALIZA REZULTATA NUMERIČKIH SIMULACIJA

U ovom poglavlju prikazani su i analizirani rezultati provedenih numeričkih simulacija pokusa otpora 6750-TEU kontejnerskog broda. Proveden je postupak verifikacije primjenom tri različite gustoće mreže i tri različita vremenska koraka te je izračunata ukupna numerička nesigurnost. Također je proveden postupak validacije, odnosno usporedba rezultata numeričkih simulacija s onima dobivenim ekstrapolacijom rezultata modelskih ispitivanja. Nadalje, analizirano je strujanje oko trupa broda za svaki pojedini trim broda. Konačno, na temelju dobivenih numeričkih rezultata dan je prijedlog optimalnog trima za 6750-TEU kontejnerski brod pri projektnoj brzini.

5.1. Verifikacija rezultata

Postupak verifikacije je proveden primjenom tri gustoće mreže s omjerom profinjenja u iznosu $\sqrt{2}$ te primjenom tri različita vremenska koraka s omjerom profinjenja 2. U tablici 8. prikazani su dobiveni rezultati verifikacije gustoće mreže, a u tablici 9. vremenskog koraka.

Tablica 8. Verifikacija gustoće mreže

	$\hat{S}_{i,3}$	$\hat{S}_{i,2}$	$\hat{S}_{i,1}$	R_i	U_i	$\overline{U}_G, \%$
Trim	0,03814°	0,03805°	0,03803°	0,227	0,00005	0,142
Uron	-0,2401 m	-0,2363 m	-0,2314 m	1,260	0,871	3,765
Ukupni otpor	1384,79 kN	1331,05 kN	1311,49 kN	0,364	13,998	1,067

Tablica 9. Verifikacija vremenskog koraka

	$\hat{S}_{i,3}$	$\hat{S}_{i,2}$	$\hat{S}_{i,1}$	R_i	U_i	$\overline{U}_T, \%$
Trim	0,03266°	0,03773°	0,03803°	0,060	0,00002	0,063
Uron	-0,2242 m	-0,2313 m	-0,2314 m	0,014	0,00017	0,001
Ukupni otpor	1403,40 kN	1315,85 kN	1311,49 kN	0,050	0,285	0,022

Primjenom različitih gustoća mreže i vremenskih koraka dobivena je oscilatorna konvergencija za slučaj ukupnog otpora i trima, dok je za uron broda primjenom različitih

gustoća mreže dobivena divergencija. U tablici 10. prikazana je ukupna nesigurnost numeričke simulacije.

Tablica 10. Ukupna nesigurnost numeričke simulacije

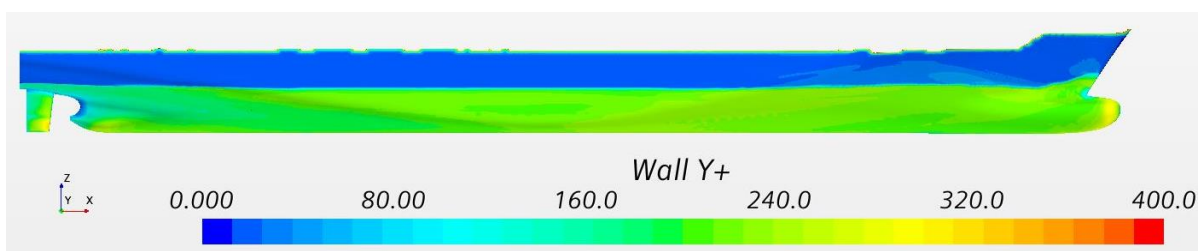
	$\overline{U}_{SN}, \%$
Trim	0,155
Uron	3,765
Ukupni otpor	1,067

Iz tablice 10. može se zaključiti da je ukupna nesigurnost urona nešto veća u odnosu na nesigurnost trima i ukupnog otpora. Ukupna nesigurnost numeričke simulacije za trim iznosi 0,155%, za uron 3,765%, a za ukupni otpor 1,067%.

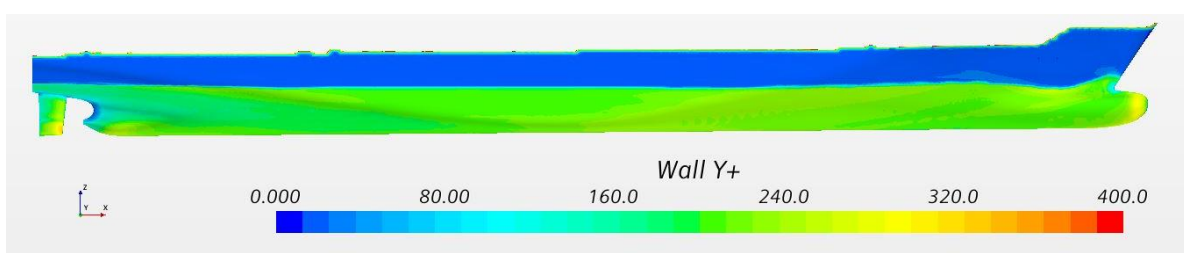
5.2. Validacija rezultata

Validacija rezultata provedena je usporedbom dobivenih numeričkih rezultata ukupnog otpora broda u naravi i ekstrapoliranih vrijednosti ukupnog otpora dobivenih modelskim ispitivanjima. Potrebno je napomenuti da je trim broda negativan kada je gaz na krmu veći od gaza na pramcu, odnosno pozitivan kada je gaz na pramcu veći nego gaz na krmu. Eksperimentalna ispitivanja pokusa otpora modela broda za ravnu vodnu liniju te za kut trima $-0,5^\circ$ provedena su u Brodarskom institutu u Zagrebu [31]. Rezultati eksperimentalnih ispitivanja pokusa otpora modela broda ekstrapolirani su na brod u naravi primjenom metode ITTC 1978. Faktor forme k određen je metodom Prohaske kao što je opisano u potpoglavlju 2.3. Koeficijent ukupnog otpora modela broda očitao je iz rezultata eksperimenta na temelju jednakosti Froudeovih brojeva modela broda i broda u naravi. Zatim je izračunat Reynoldsov broj modela kako bi se mogao odrediti koeficijent otpora trenja modela broda prema korelacijskoj liniji model–brod ITTC 1957, a koji je potreban za izračunavanje koeficijenta otpora valova modela broda jednak onome za brod u naravi. Za brod u naravi izračunat je koeficijent otpora trenja, dodatak na hrapavost i korelacijski dodatak. Koeficijent ukupnog otpora broda izračunat je pomoću jednadžbe (20). Opisani postupak je proveden za trimove $t = 0^\circ$ i $t = -0,5^\circ$, za koje su bili dostupni rezultati eksperimentalnih ispitivanja. Za $t = 0^\circ$ dobiven je faktor forme $k = 0,304$ te su izračunate vrijednosti koeficijenta ukupnog otpora, gdje je za model dobiveno $C_{TM} = 0,0035$, a za brod u naravi $C_{TS} = 0,0018$. Za $t = -0,5^\circ$ dobiven su sljedeći rezultati: $k = 0,355$, $C_{TM} = 0,0036$ i $C_{TS} = 0,0019$.

Prije provedbe validacije, potrebno je provjeriti vrijednost parametara y^+ duž oplakane površine broda. Na slikama 27. i 28. vidljivo je da se vrijednost parametara y^+ nalazi u granicama $30 \leq y^+ \leq 500$, što znači da je izbjegnuto prijelazno područje unutar kojeg ne vrijede zidne funkcije. U oba slučaja vrijednost parametra y^+ duž trupa broda iznosi oko 200, osim u području krme kod manjeg broja ćelija.



Slika 27. Vrijednosti parametra y^+ za $t = 0^\circ$



Slika 28. Vrijednosti parametra y^+ za $t = -0,5^\circ$

Validacija rezultata je provedena za uron i trim te za ukupni otpor broda. Važno je napomenuti da je za rezultate numeričkih simulacija u obzir uzeta osrednjena vrijednost posljednjih 20% ukupnog vremena trajanja numeričkih simulacija. U tablici 11. prikazani su rezultati dobiveni ekstrapolacijom rezultata modelskih ispitivanja, a u tablici 12. relativna devijacija rezultata dobivenih primjenom fine mreže i vremenskog koraka $T/200$.

Tablica 11. Ekstrapolirane vrijednosti ukupnog otpora i trima

	Trim, °	Uron, m	R_T , kN
$t = 0^\circ$	-0,034	-0,167	1312,79
$t = -0,5^\circ$	-0,527	-0,180	1344,10

Tablica 12. Relativna devijacija rezultata za $t = 0^\circ$ i $t = -0,5^\circ$

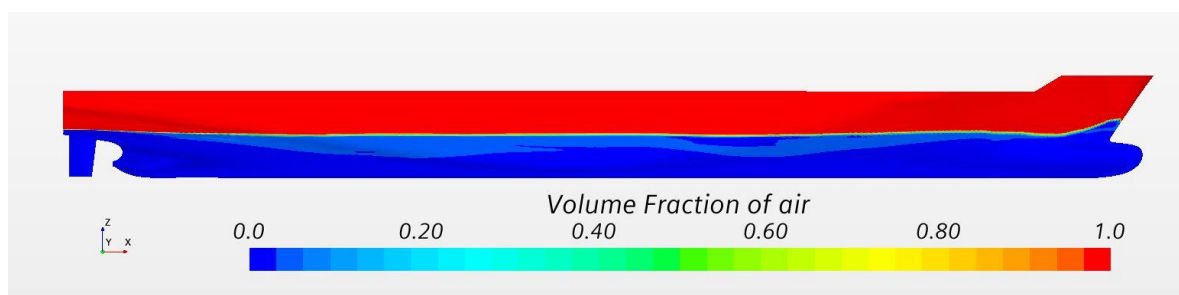
$t = 0^\circ$	Trim, °	Uron, m	R_T , kN
	0,038	-0,231	1311,49
RD, %	-2,12	38,31	-0,09
$t = -0,5^\circ$	Trim, °	Uron, m	R_T , kN
	0,525	-0,116	1412,10
RD, %	-0,34	-35,68	5,51

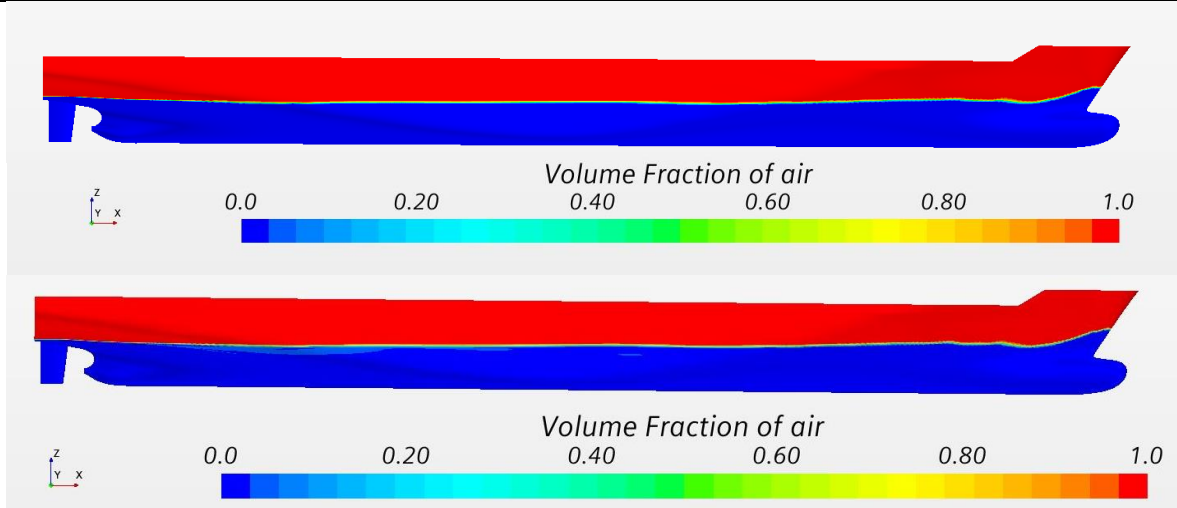
Važno je napomenuti kako su u tablicama 11. i 12. prikazane vrijednosti dinamičkog trima, koji nastaje postizanjem ravnotežnog stanja modela broda prilikom pokusa. Moguće je primijetiti kako se dinamički trim razlikuje od statičkog trima, koji je postignut balastiranjem modela broda prije provedbe pokusa otpora.

Relativne devijacije prikazane u tablici 12. izračunate su prema jednadžbi (64). RD za ravnu vodnu liniju iznosi za dinamički trim -2,12%, za uron 38,31%, a za R_T -0,09%. Za trim $t = -0,5^\circ$ RD iznosi -0,34% za dinamički trim, -35,68% za uron te 5,51% za R_T . Dobivene vrijednosti relativne devijacije zadovoljavajuće su, osim za slučaj urona, gdje su dobivena velika odstupanja rezultata numeričkih simulacija s ekstrapoliranim rezultatima.

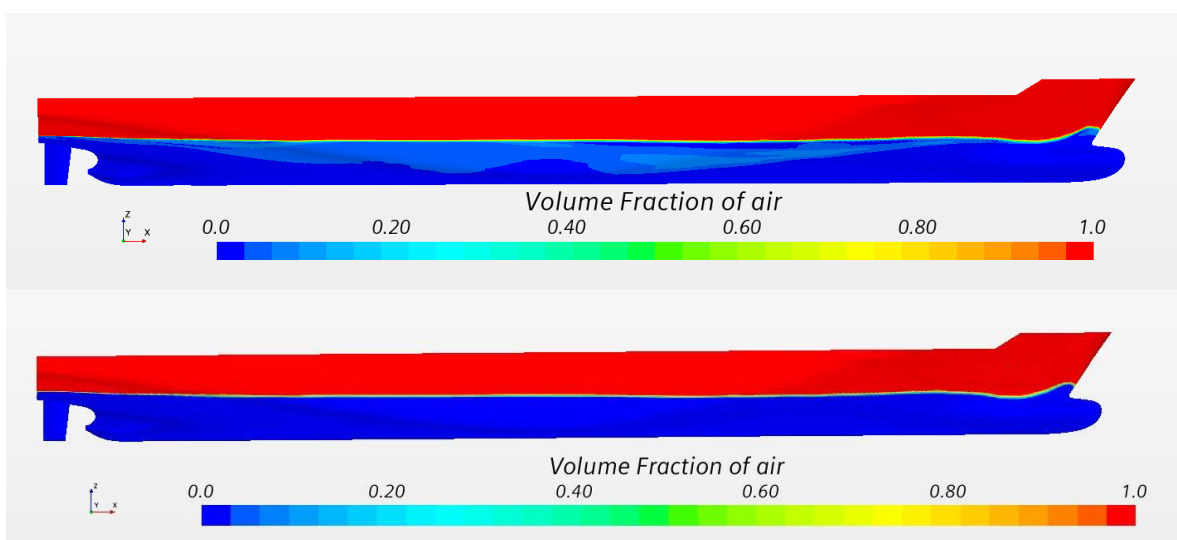
5.3. Analiza slobodne površine duž trupa broda

U programskom paketu STAR-CCM+ slobodna površina duž trupa broda određena je na temelju volumnog udjela zraka u ćeliji. Na slikama 29.–31. za $Fn = 0,193$ plavom bojom su prikazane ćelije ispunjene vodom, a crvenom bojom ćelije ispunjene zrakom. Slobodna površina određena je na temelju ćelija s volumnim udjelom zraka 0,5.

**Slika 29. Prikaz slobodne površine duž trupa broda za $t = 0^\circ$**



Slika 30. Prikaz slobodne površine duž trupa broda za $t=0,25^\circ$ (gore) i $t=0,5^\circ$ (dolje)



Slika 31. Prikaz slobodne površine duž trupa broda za $t=-0,25^\circ$ (gore) i $t=-0,5^\circ$ (dolje)

Na slikama 29.–31. jasno se vidi stvaranje pramčanog vala te se može uočiti da za kut trima $0,5^\circ$ dolazi do stvaranja najvećeg pramčanog vala, dok je najmanja amplituda pramčanog vala dobivena za kut trima $-0,5^\circ$. Također se jasno može uočiti valni dol na pramčanom ramenu broda. Pramčani sustav valova uslijed djelovanja pretlaka na pramcu započinje s valnim brijegom, dok sustav pramčanog ramena uslijed djelovanja podtlaka na pramčanom ramenu započinje valnim dolom. Na slikama 29.–31. vidljivo je da je krmeno zrcalo najviše uronjeno pri kutu trima $-0,5^\circ$, a najmanje pri kutu trima $0,5^\circ$, što je bilo i očekivano.

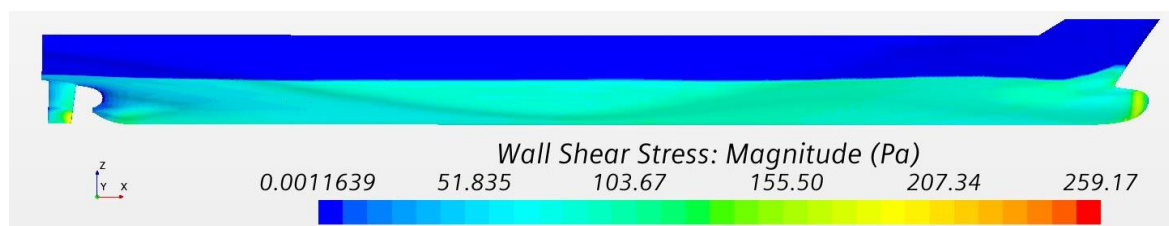
5.4. Analiza tangencijalnih napreznja

Na slikama 32.–34. prikazana su tangencijalna napreznja duž trupa broda. Moguće je uočiti da su najveće vrijednosti tangencijalnih napreznja na bulbu i na kormilu, što je posljedica povećane brzine strujanja. Kako integral tangencijalnih napreznja po oplakanoj površini broda predstavlja otpor trenja, na temelju rezultata numeričkih simulacija moguće je zaključiti za koju vodnu liniju će otpor trenja biti najmanji. Najmanja vrijednost otpora trenja dobivena je za kut trima $-0,25^\circ$ i iznosi $R_T=1054,45$ kN, što je za 0,4% manje u odnosu na otpor trenja pri ravnoj vodnoj liniji. Najveća vrijednost otpora trenja dobivena je za kut trima $-0,5^\circ$ i iznosi $R_T=1066,32$ kN što je za 0,7% veće u odnosu na otpor trenja pri ravnoj vodnoj liniji. Usporedba otpora trenja za sve vodne linije dana je u potpoglavlju 5.6. U tablici 13. prikazani su iznosi oplakanih površina za sve kutove trima.

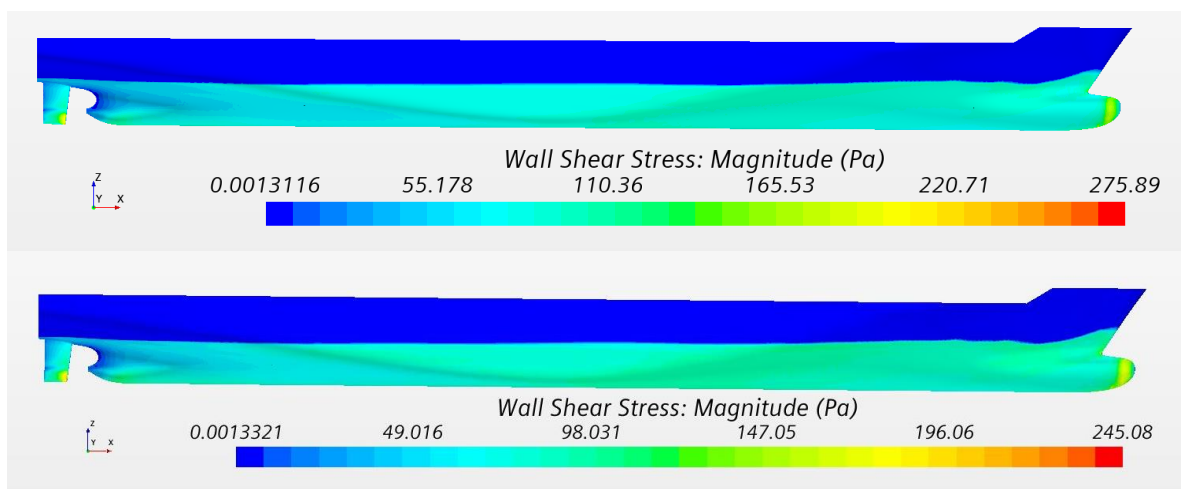
Tablica 13. Vrijednosti oplakanih površina za sve kutove trima

$t, ^\circ$	-0,5	-0,25	0	0,25	0,5
S, m^2	13719,7	13640,6	13593,6	13533,7	13476,2

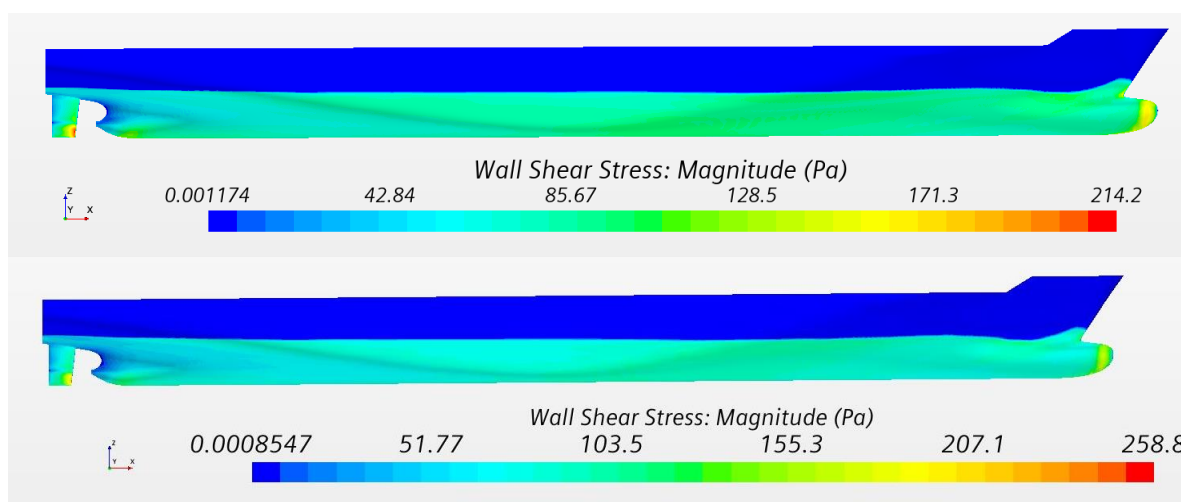
Iz tablice 13. moguće je zaključiti da je najveća oplakana površina dobivena za kut trima $-0,5^\circ$ i iznosi $S = 13719,7$ m². Važno je napomenuti kako je najveći otpor trenja broda dobiven upravo za kut trima $-0,5^\circ$. Najmanja oplakana površina dobivena je za kut trima $0,5^\circ$ i iznosi $S = 13476,2$ m².



Slika 32. Prikaz tangencijalnih napreznja za kut trima $t=0^\circ$



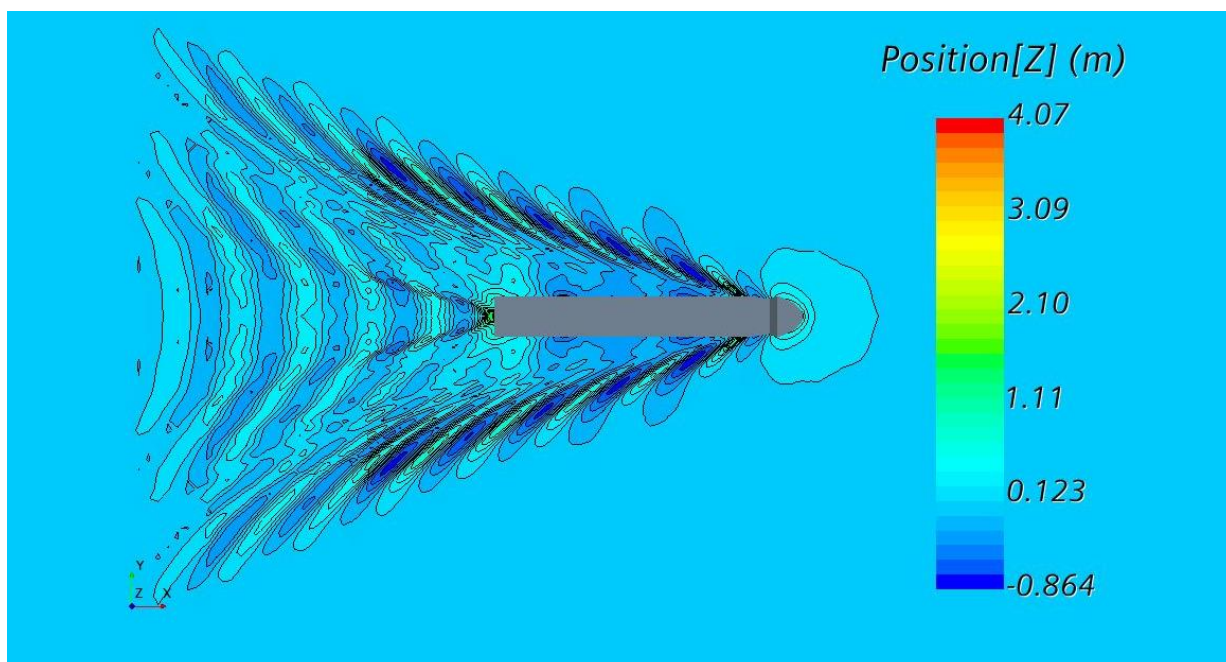
Slika 33. Prikaz tangencijalnih napreznja za kut trima $t=0,25^\circ$ (gore) i $t=0,5^\circ$ (dolje)



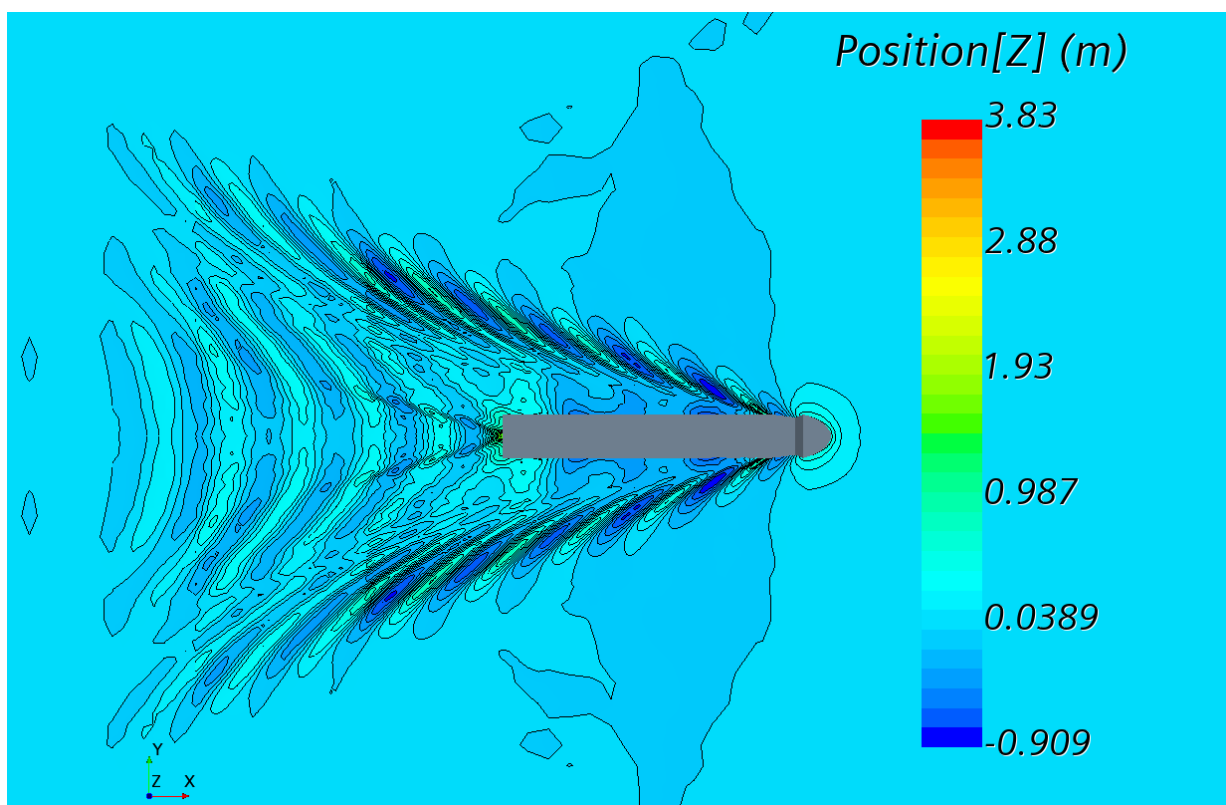
Slika 34. Prikaz tangencijalnih napreznja za kut trima $t=-0,25^\circ$ (gore) i $t=-0,5^\circ$ (dolje)

5.5. Slike valova oko trupa broda

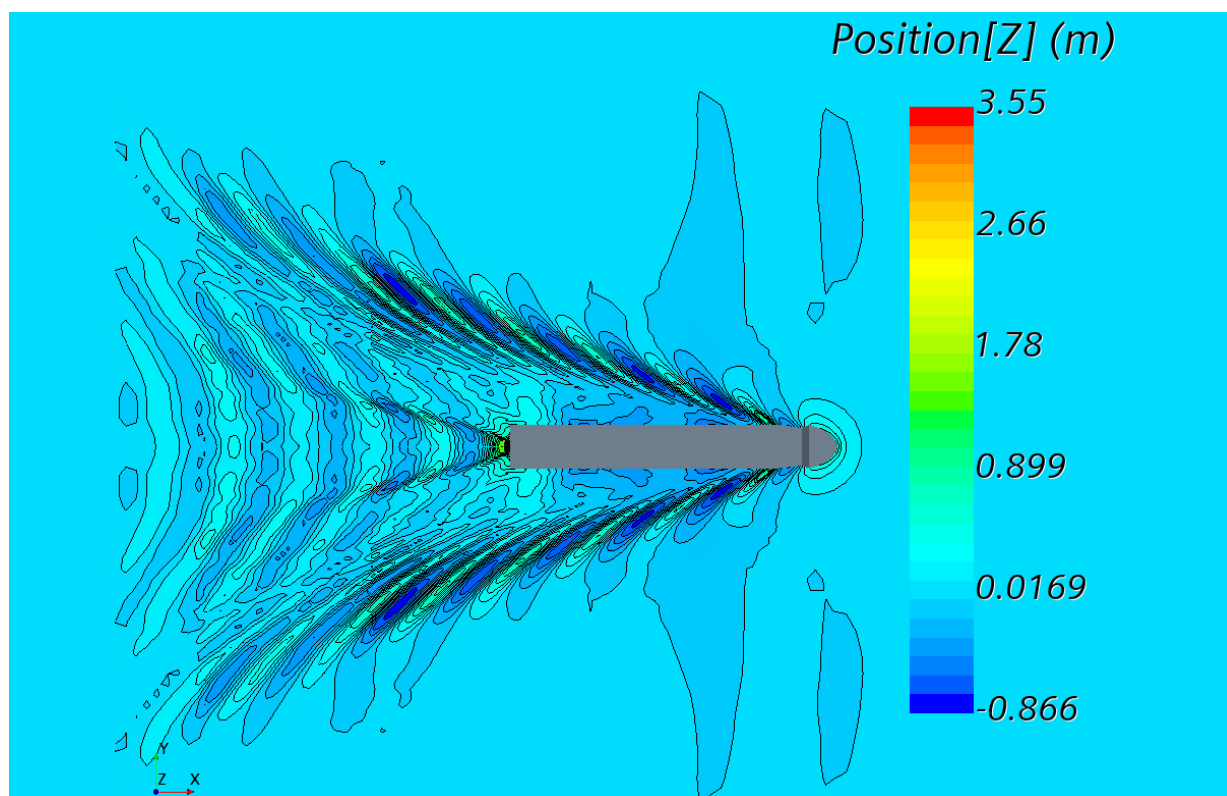
Na slikama 35.–39. prikazane su slike valova oko trupa broda dobivene numeričkim simulacijama za različite vrijednosti trima pri $Fn=0,193$. Na svim slikama jasno se mogu uočiti sustavi poprečnih i razilaznih valova te Kelvinov kut. Također se može uočiti da najveća amplituda pramčanog vala odgovara kutu trima $0,5^\circ$, a najmanja kutu trima $-0,5^\circ$, što je bilo i očekivano.



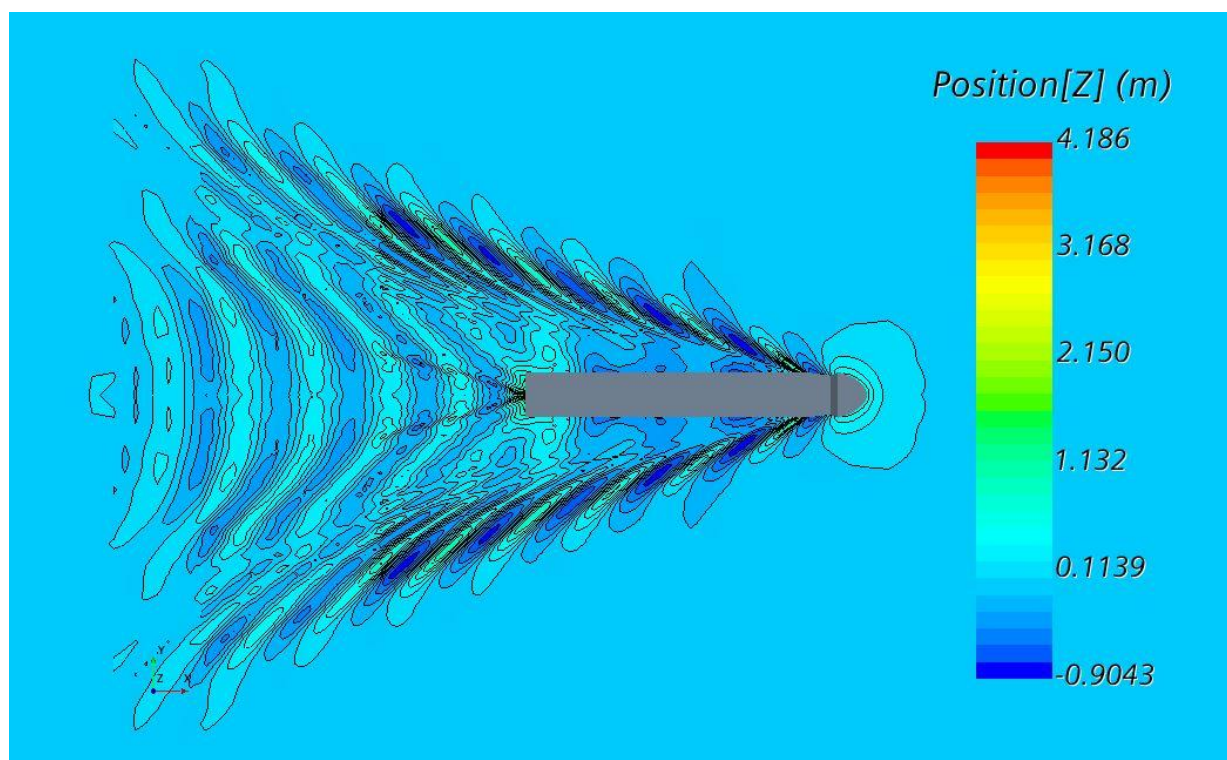
Slika 35. Slika valova oko trupa broda za kut trima $t=0^\circ$



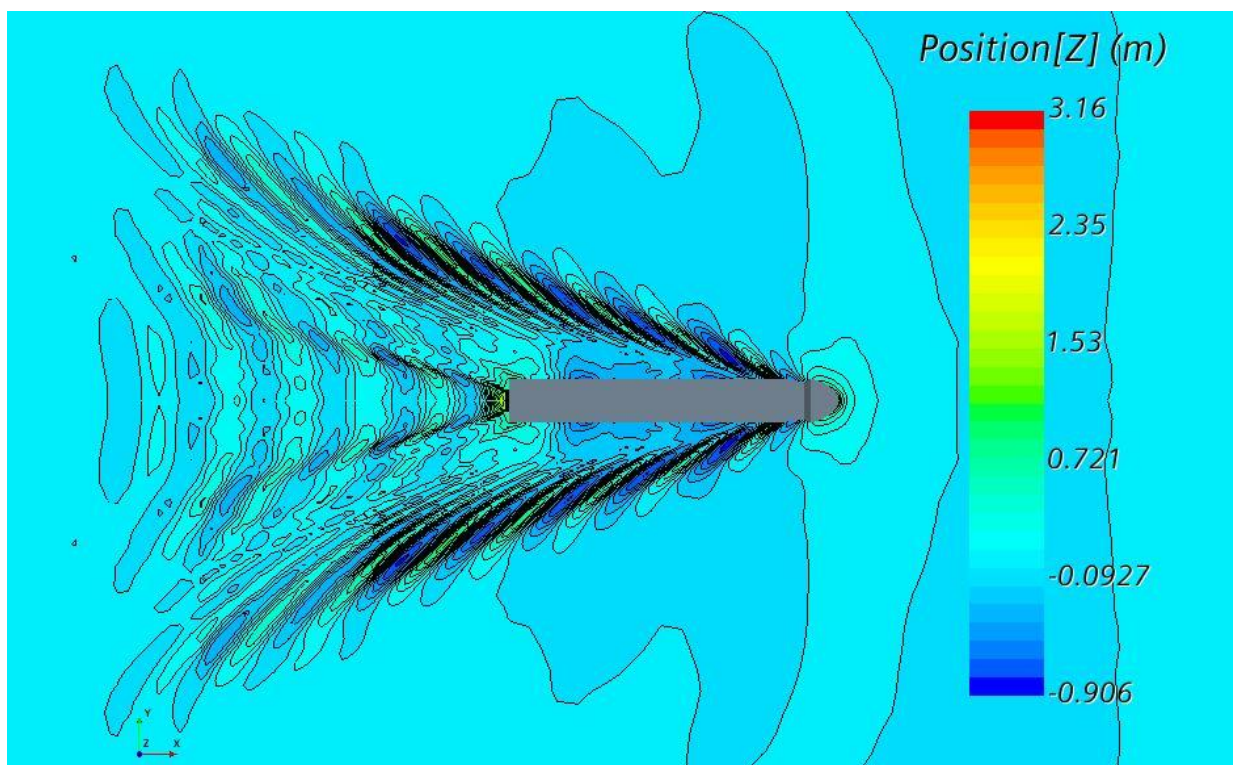
Slika 36. Slika valova oko trupa broda za kut trima $t=0,25^\circ$



Slika 37. Slika valova oko trupa broda za kut trima $t=-0,25^\circ$



Slika 38. Slika valova oko trupa broda za kut trima $t=0,5^\circ$

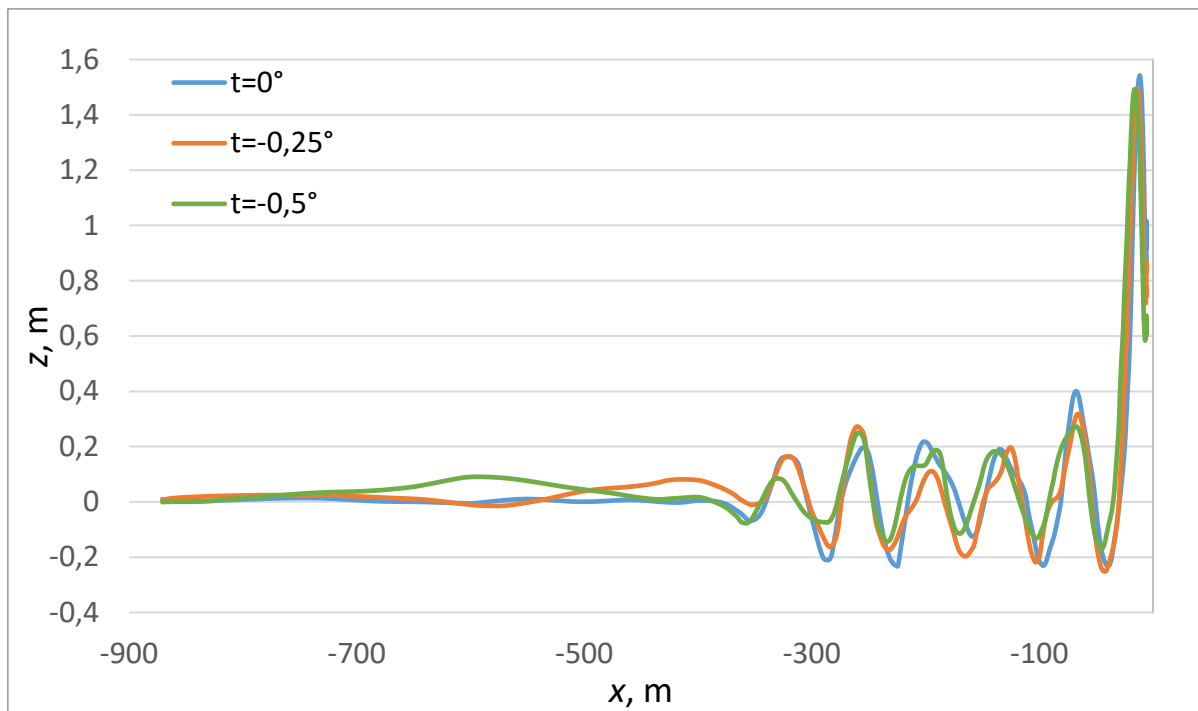


Slika 39. Slika valova oko trupa broda za kut trima $t=-0,5^\circ$

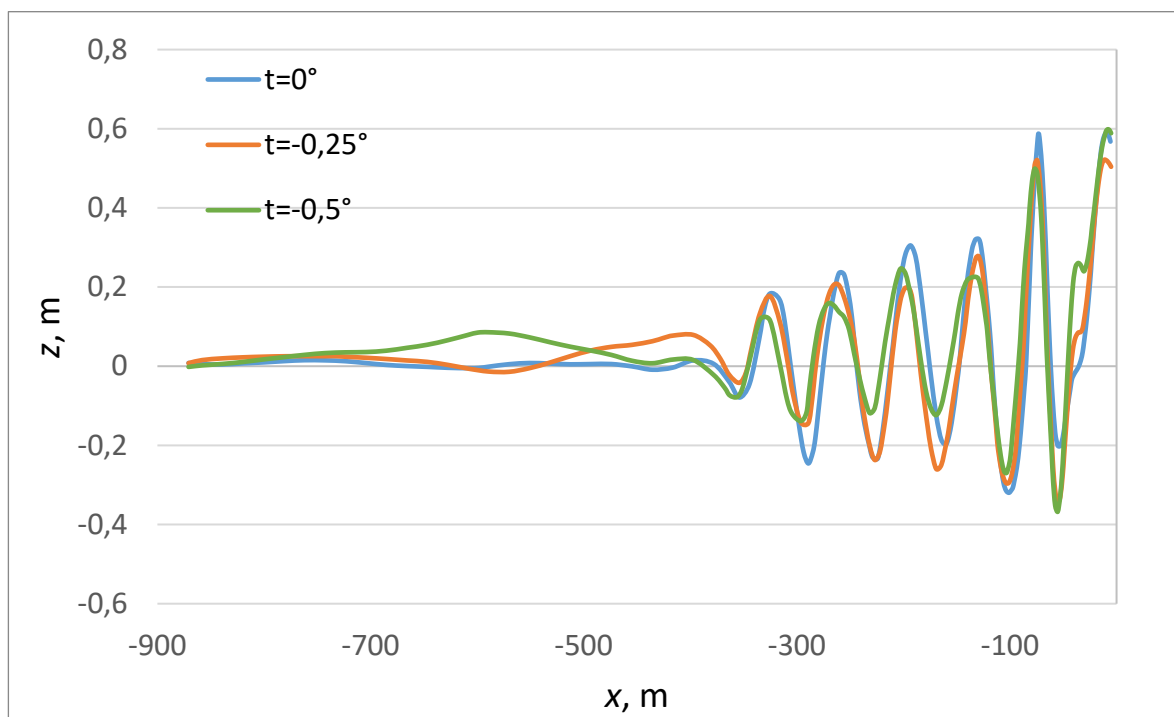
Kako bi se usporedile valne visine duž trupa broda i iza krme broda, za svaki kut trima generirana su po dva presjeka izopovršine s parametrom $\alpha_i = 0,5$ sa simetralnom ravninom i ravninom $y = 21$ m. Na taj način jedan presjek nalazi se na uzdužnoj simetralnoj ravnini broda, a drugi na udaljenosti $y = 21$ m od uzdužne simetralne ravnine broda.

Na uzdužnoj simetralnoj ravnini broda najveća elevacija pramčanog vala dobivena je za kut trima $0,5^\circ$, dok je najmanja vrijednost elevacije dobivena za kut trima $-0,5^\circ$. Na udaljenosti $y = 21$ m od uzdužne simetralne ravnine broda najveća vrijednost elevacije pramčanog vala dobivena je za kut trima $0,25^\circ$, dok je najmanja vrijednost dobivena za kut trima $-0,25^\circ$. Može se zaključiti da se plovidbom u pretezi postižu veće valne elevacije na pramčanom dijelu broda.

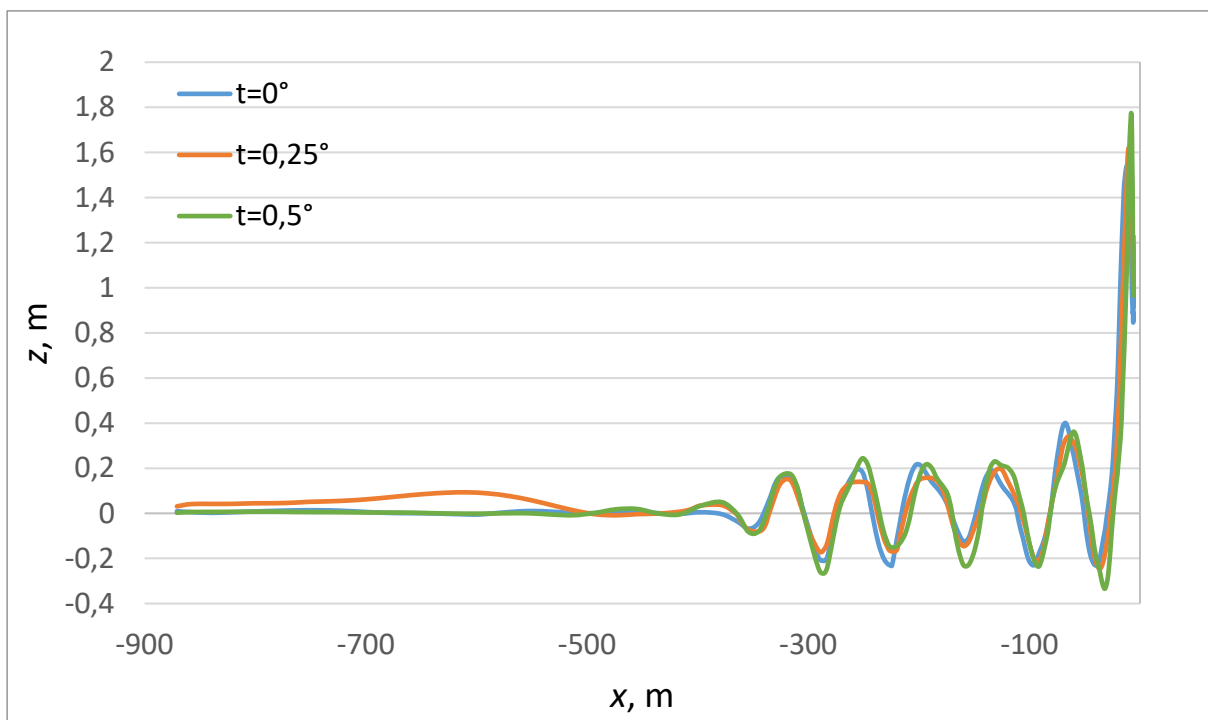
Na slikama 40.–43. prikazane su valne elevacije iza krmenog dijela broda, a na slikama 43.–45. prikazane su valne elevacije neposredno uz trup broda.



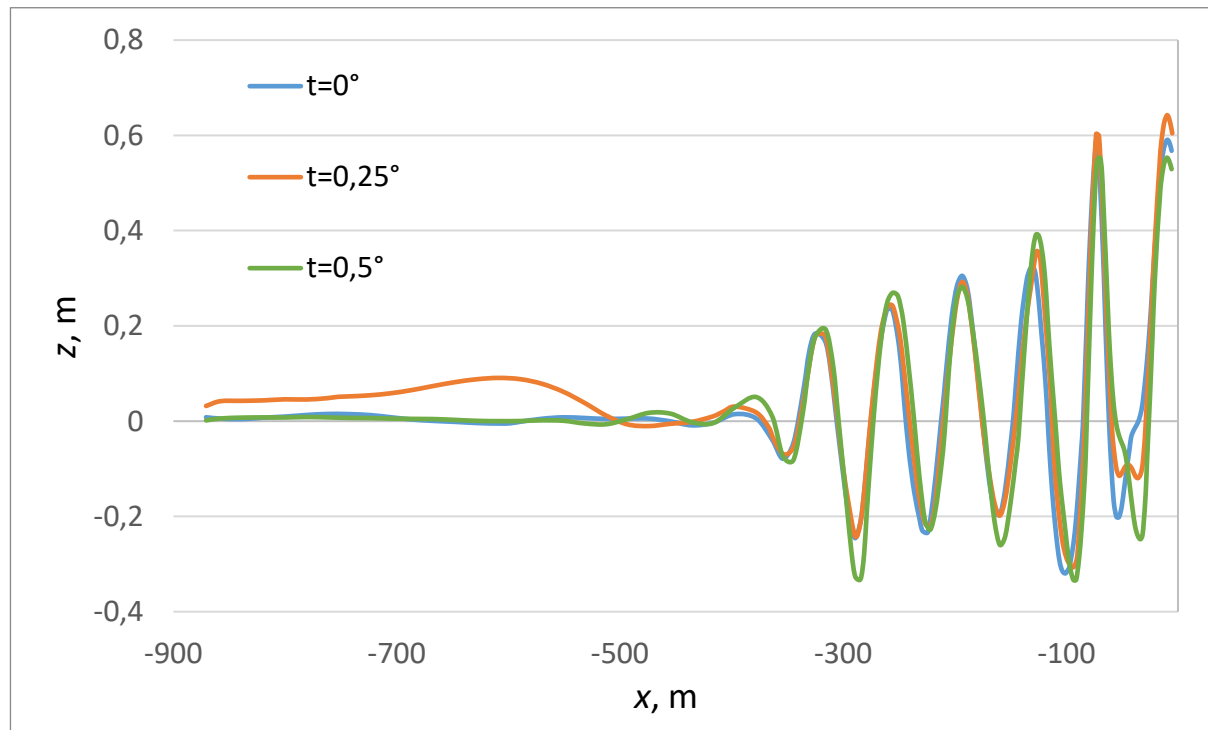
Slika 40. Usporedba valnih elevacija iza krme broda za ravnu vodnu liniju i zategu u ravnini $y=0$ m



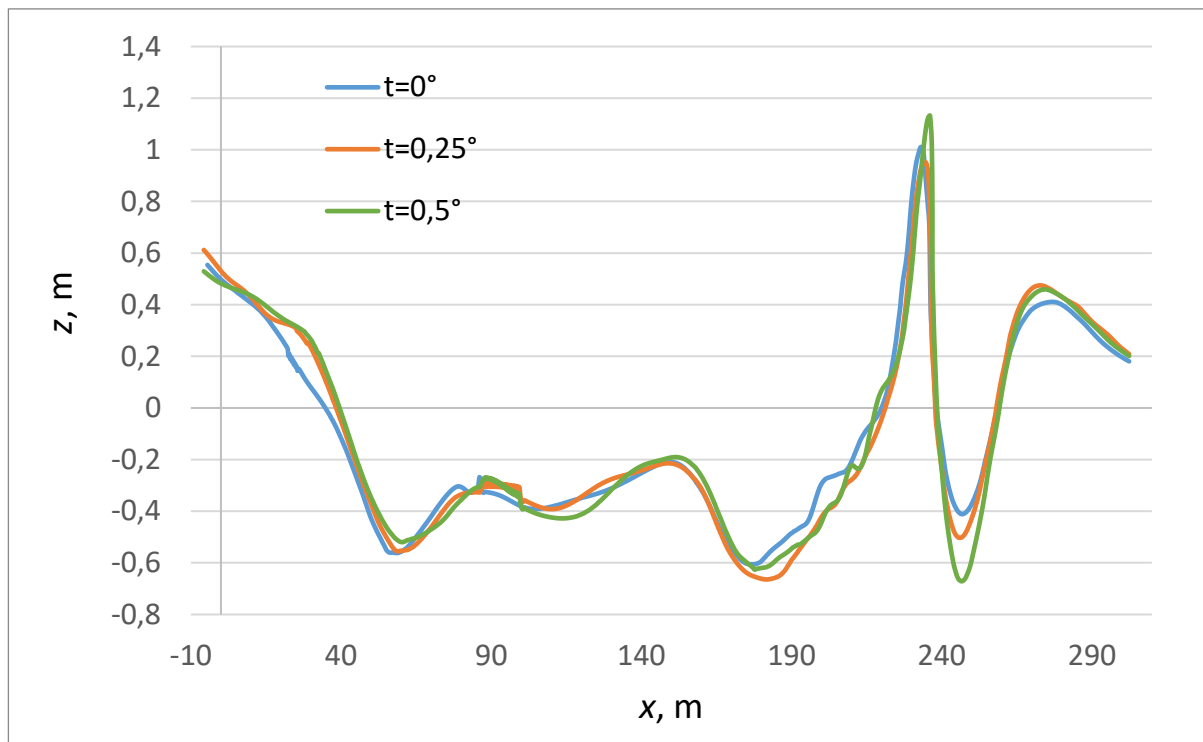
Slika 41. Usporedba valnih elevacija iza krme broda za ravnu vodnu liniju i zategu u ravnini $y=21$ m



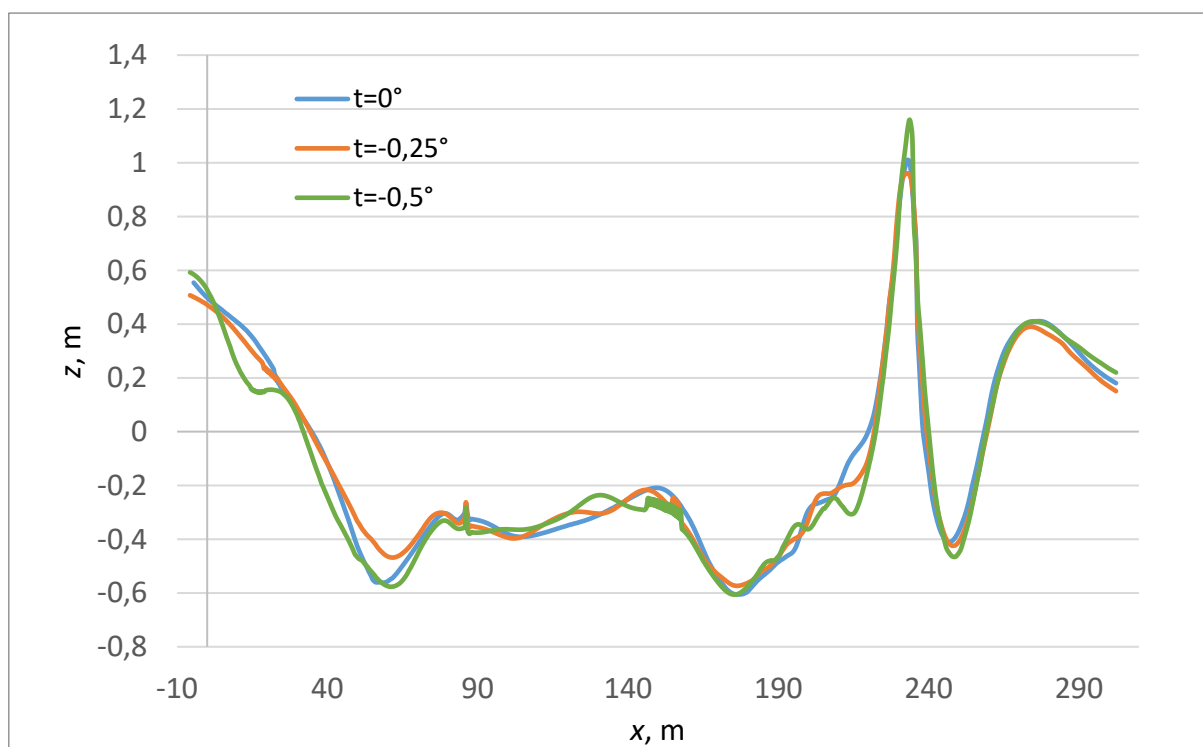
Slika 42. Usporedba valnih elevacija iza krme broda za ravnu vodnu liniju i pretegu u ravnini $y=0$ m



Slika 43. Usporedba valnih elevacija iza krme broda za ravnu vodnu liniju i pretegu u ravnini $y=21$ m



Slika 44. Usporedba valnih elevacija duž trupa broda za ravnu vodnu liniju i pretegu u ravnini $y=21$ m

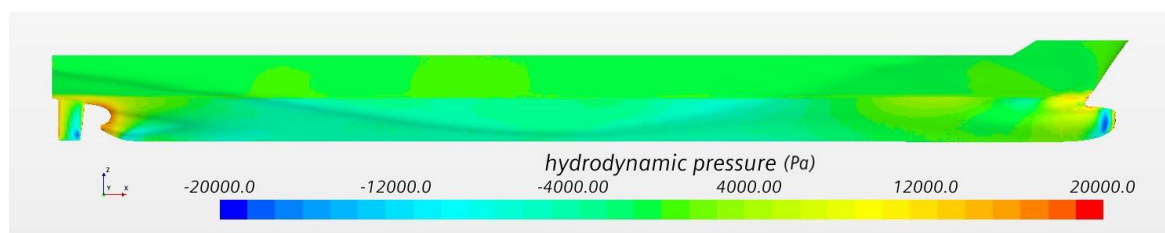


Slika 45. Usporedba valnih elevacija duž trupa broda za ravnu vodnu liniju i zategu u ravnini $y=21$ m

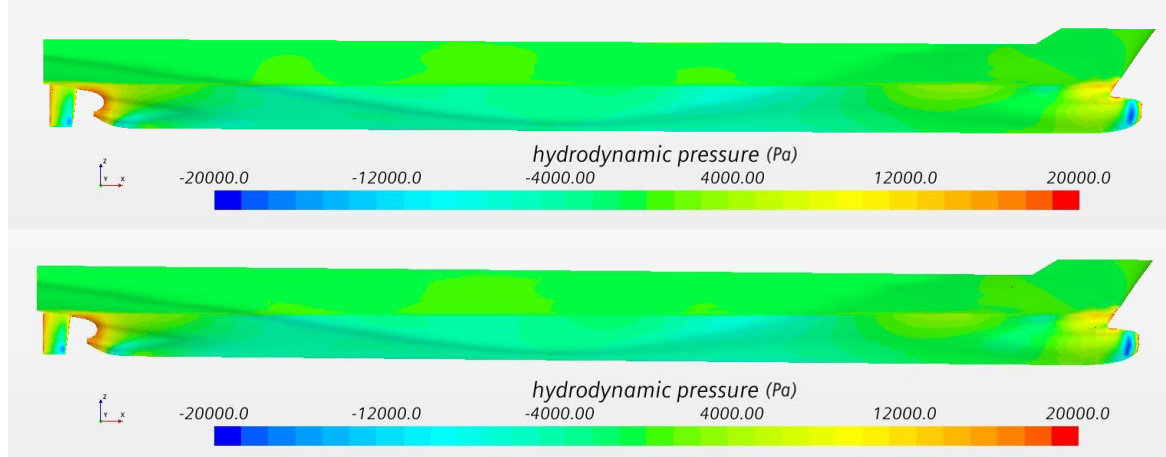
Na slikama 40. i 42. vidljivo je da se na simetralnoj ravnini broda najveći krmeni val javlja za kut trima $0,5^\circ$ te u tom slučaju najveća valna elevacija iznosi 1,76 m. Na slikama 41. i 43. prikazane su valne elevacije iza krme broda u ravnini $y=21$ m. Vidljivo je da najveći krmeni val nastaje za kut trima $0,25^\circ$ te da najveća valna elevacija iznosi 0,64 m. Također, moguće je uočiti da se najmanje elevacije krmenih valova pojavljuju za kut trima $-0,25^\circ$, u obje razmatrane ravnine. U uzdužnoj simetralnoj ravnini najmanja valna elevacija iznosi 1,48 m, dok u ravnini $y = 21$ m valna elevacija iznosi 0,52 m. Može se zaključiti da se plovidbom u zatezi postižu manje valne elevacije na krmenom dijelu broda.

Razmatranjem valnih elevacija duž trupa broda može se uočiti da za slučaj pretege i zatege u pramčanom dijelu broda dolazi do značajnijih valnih elevacija te da se visine valnih elevacija smanjuju prema krmi broda. Najveća vrijednost valne elevacije dobivena je za kut trima $0,5^\circ$ te iznosi 1,13 m na položaju $x = 234$ m. Najmanja vrijednost valne elevacije na položaju $x = 234$ m javlja se za kut trima $0,25^\circ$ te iznosi 0,92 m. Prema krmi broda, dolazi do značajnijeg smanjenja valnih elevacija za sve kutove trima, dok se valne elevacije naglo povećavaju na krmenom dijelu broda. Na krmenom dijelu broda najveća valna elevacija dobivena je za kut trima $0,25^\circ$ te iznosi 0,59 m, a najmanja za kut trima $-0,25^\circ$ te iznosi 0,50 m.

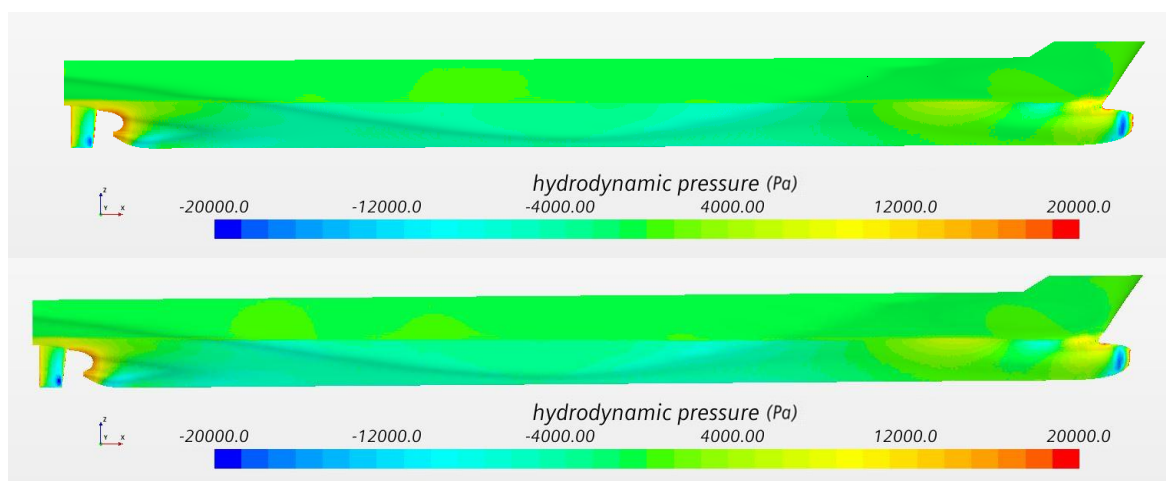
Na slikama 46.–48. dan je prikaz raspodjele hidrodinamičkog tlaka duž trupa broda za sve vodne linije. Na slikama je vidljivo da su u području pramca i krme najveće promjene tlaka, drugim riječima na samome vrhu bulba pojavljuje se pretlak te vrlo brzo nastupa podtlak. Ovakva nagla promjena tlakova u blizini slobodne površine uzrokuje stvaranje najvećih valova, odnosno pramčanih valova.



Slika 46. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka za kut trima $t=0^\circ$

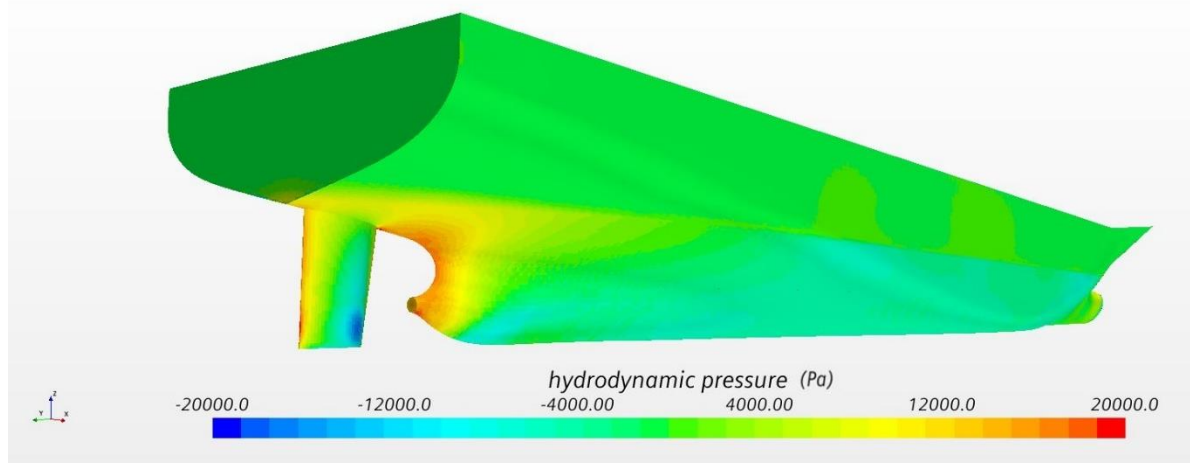


Slika 47. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka za kut trima $t=0,25^\circ$ (gore) i $t=0,5^\circ$ (dolje)

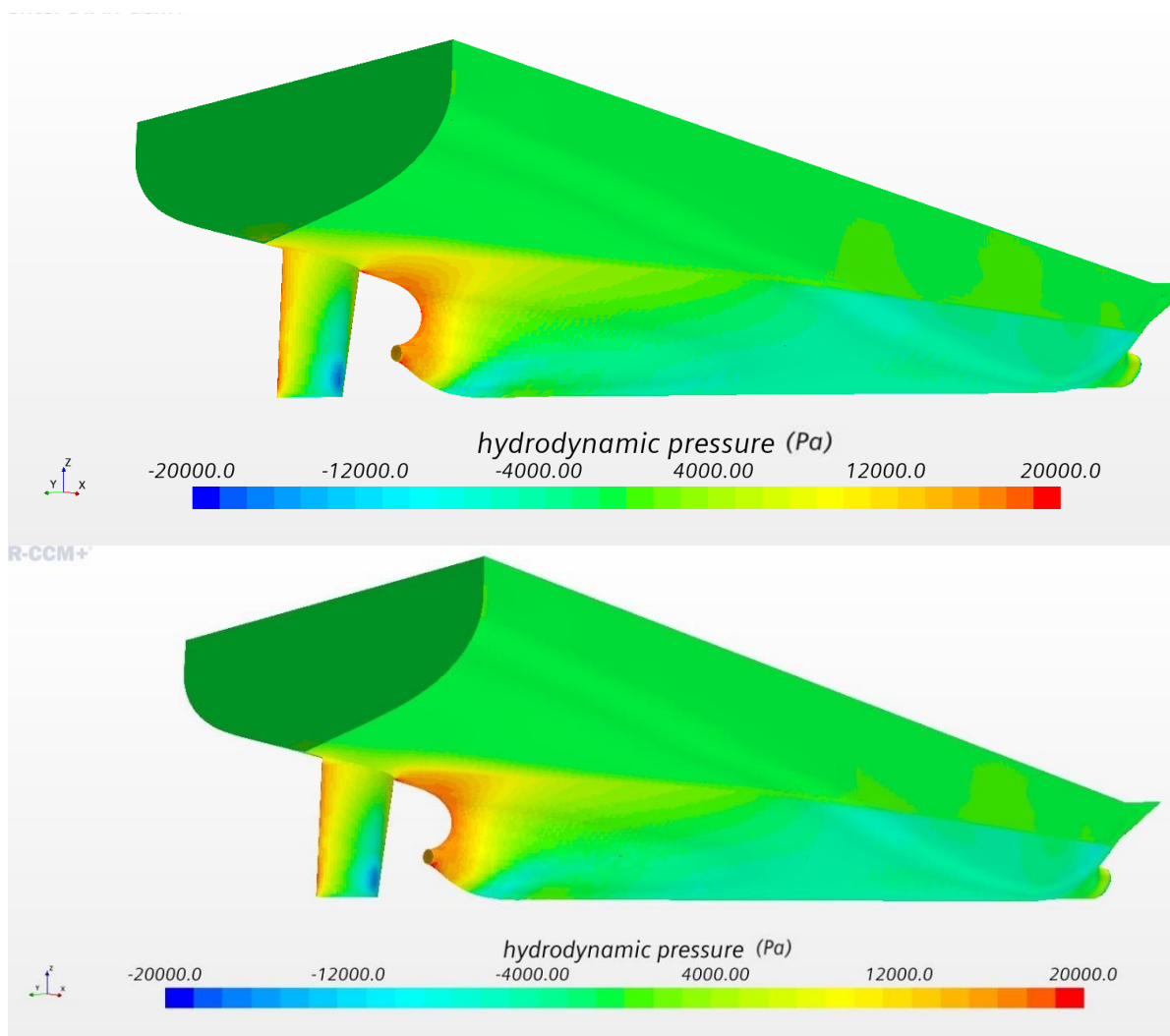


Slika 48. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka za kut trima $t=-0,25^\circ$ (gore) i $t=-0,5^\circ$ (dolje)

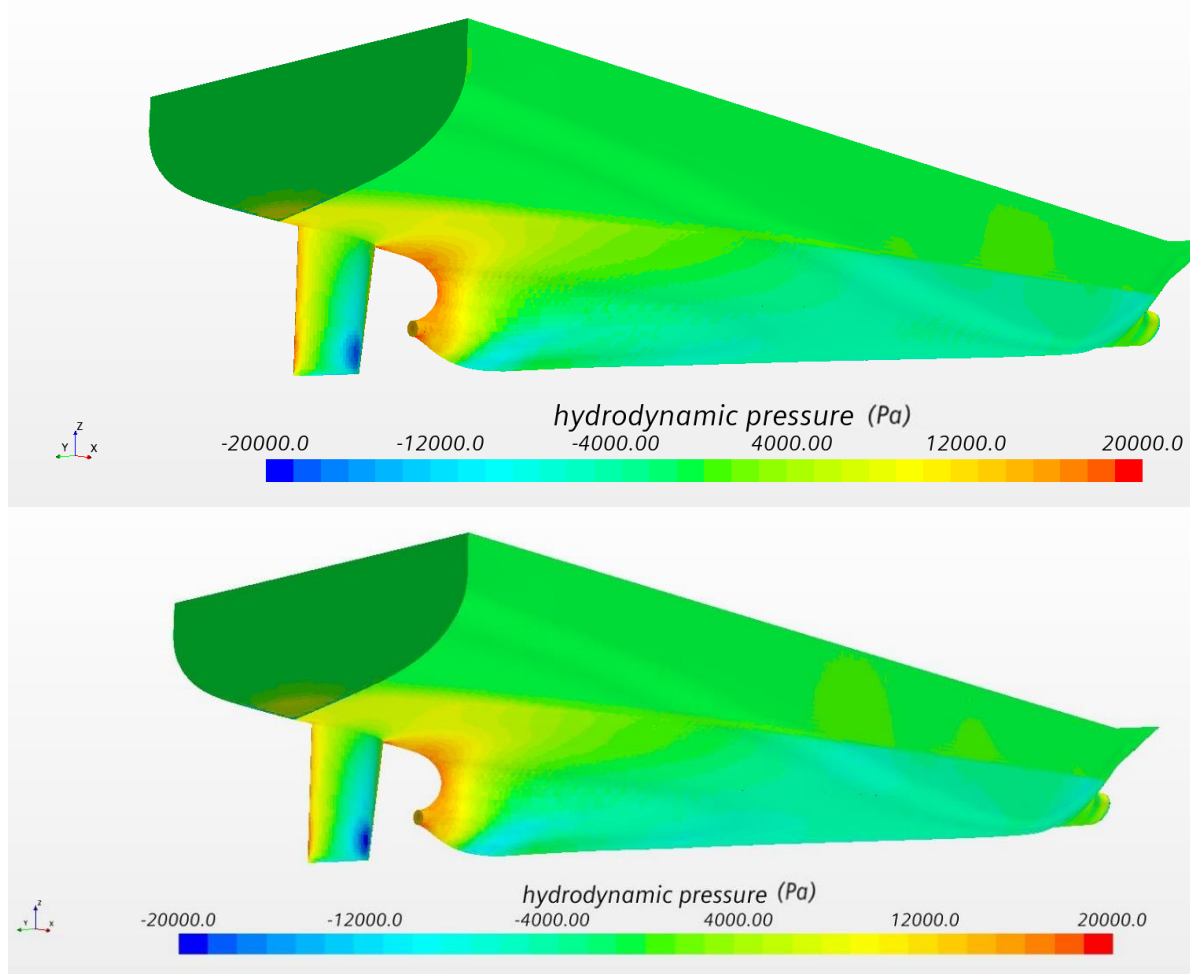
Na slikama 49.–54. dan je prikaz raspodjele hidrodinamičkog tlaka u području krmenog dijela broda. Na slici 51. vidljivo je kako je najveća površina pod utjecajem pretlaka u krmenom dijelu broda dobivena za kut trima $t = -0,5^\circ$ te da je pri navedenom trimu krmeno zrcalo najviše uronjeno. Ovakva raspodjela hidrodinamičkog tlaka objašnjava činjenicu da je najveća vrijednost otpora tlaka dobivena za kut trima $t = -0,5^\circ$ i iznosi $R_p = 345,67$ kN. Na slici 49. vidljivo je kako je najmanja površina pod utjecajem pretlaka dobivena za kut trima $t = 0^\circ$. Pri navedenom kutu trima otpor tlaka iznosi $R_p = 253,17$ kN. Može se uočiti da se navedene vrijednosti otpora tlaka razlikuju za 36,54% što objašnjava razliku u dobivenim vrijednostima ukupnog otpora, a što je prikazano u potpoglavlju 5.6.



Slika 49. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka na krmi za kut trima $t = 0^\circ$



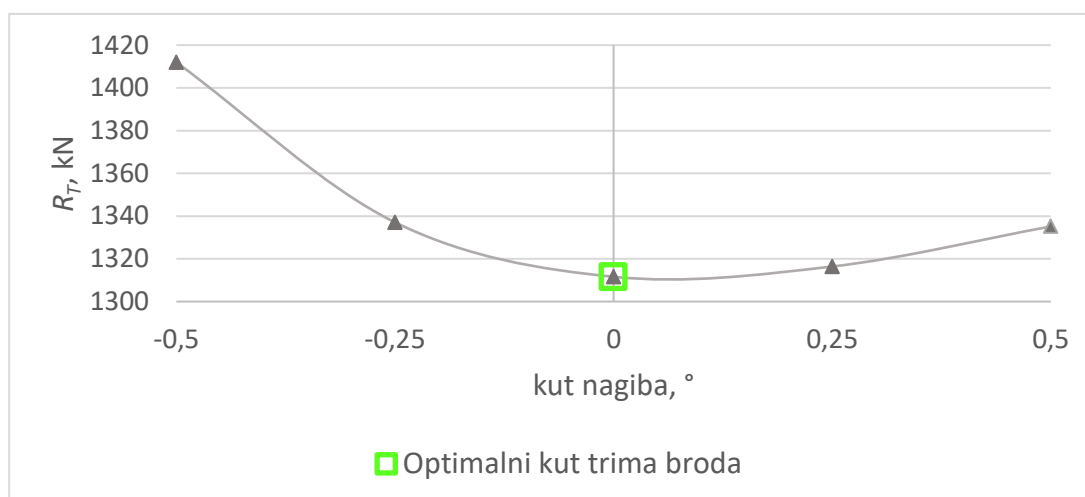
Slika 50. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka na krmi za kut trima $t = 0,25^\circ$ (gore) i $t = 0,5^\circ$ (dolje)



Slika 51. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka na krmi za kut trima $t = -0,25^\circ$ (gore) i $t = -0,5^\circ$ (dolje)

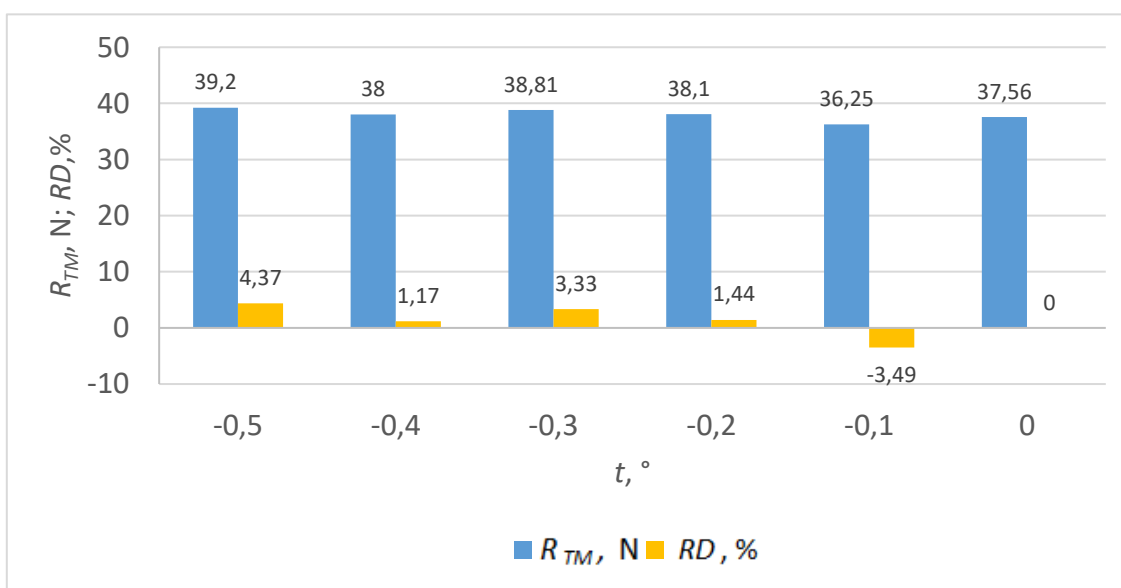
5.6. Optimizacija trima

Za optimalan trim odabire se onaj kut trima pri kojemu je iznos ukupnog otpora najmanji. Na slici 52. prikazani su rezultati numeričkih simulacija pokusa otpora za sve kutove trima broda. Iz slike 47. može se zaključiti da je najmanja vrijednost ukupnog otpora $R_T = 1311,49$ kN za kut trima 0° , odnosno pri plovidbi na ravnoj vodnoj liniji. Ukupni otpor je za kut trima $0,25^\circ$ veći za 0,43% od onog pri 0° što je unutar numeričke nesigurnosti. Najveća vrijednost ukupnog otpora $R_T = 1412,10$ kN dobivena je za kut trima $-0,5^\circ$. Na temelju slike 52. moguće je zaključiti da su dobivene vrijednosti ukupnog otpora pri zategama značajno veće u odnosu na pretege i ravnu vodnu liniju. Do istog zaključka došli su i autori u [6] čiji su rezultati provedenih numeričkih simulacija pokusa otpora modela broda prikazani na slici 53.



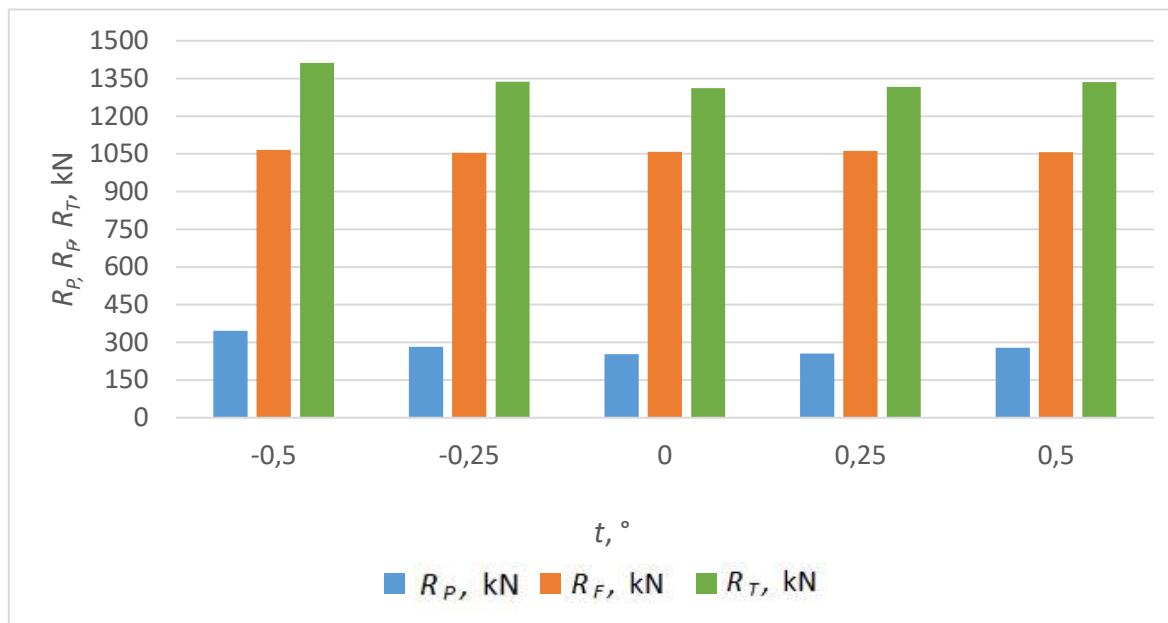
Slika 52. Optimalni kut trima broda

Autori [6] su proveli niz numeričkih simulacija pokusa otpora modela broda pri $Fn=0,195$ za različite vrijednosti kuta trima s korakom $0,1^\circ$. Na temelju slike 53. vidljivo je da je najveća vrijednost ukupnog otpora modela broda za kut trima $-0,5^\circ$ te da relativna devijacija u odnosu na ravnu vodnu liniju iznosi 4,37%. Autori su zaključili da pri većim kutovima trima dolazi do povećanja ukupnog otpora. Do istog zaključka moguće je doći i na temelju rezultata numeričkih simulacija provedenih u okviru ovog rada.



Slika 53. Rezultati numeričkih istraživanja iz literature [6]

Na slici 54. prikazane su vrijednosti ukupnog otpora, otpora trenja i otpora tlaka za različite kutove trima u svrhu analize utjecaja kuta trima na pojedine komponente ukupnog otpora kao i na ukupni otpor.



Slika 54. Vrijednosti komponenti ukupnog otpora pri različitim kutovima trima

Iz slike 54. vidljivo je da je vrijednost otpora trenja gotova jednaka za sve kutove trima i da otpor trenja ne utječe na razlike u rezultatima ukupnog otpora, već da najveći utjecaj ima otpor tlaka. Najveća vrijednost otpora tlaka, kao što je spomenuto u potpoglavlju 5.5., dobivena je za kut trima $-0,5^\circ$ i iznosi $R_p = 345,67$ kN. Sukladno tome najveća vrijednost ukupnog otpora je $R_T = 1411,99$ kN. Najmanja vrijednost otpora tlaka $R_p = 253,16$ kN dobivena je za ravnu vodnu liniju te je sukladno tome najmanja vrijednost ukupnog otpora $R_T = 1311,49$ kN. Za kut trima $-0,25^\circ$ dobiven je otpor tlaka $R_p = 282,65$ kN, a ukupni otpor broda iznosi $R_T = 1337,09$ kN. Nadalje, za kut trima $0,25^\circ$ dobiven je otpor tlaka $R_p = 254,97$ kN te ukupni otpor $R_T = 1337,09$ kN. Konačno, za kut trima $0,5^\circ$ dobiven je otpor tlaka $R_p = 278,31$ kN te ukupni otpor iznosi $R_T = 1335,15$ kN. Na temelju dobivenih rezultata vidljivo je kako razlika između najveće vrijednosti ukupnog otpora, koja je dobivena za kut trima $-0,5^\circ$, i ukupnog otpora pri ravnoj vodnoj liniji iznosi 7,66%. Kako je vrijednost ukupnog otpora najmanja pri ravnoj vodnoj liniji, može se zaključiti kako među ispitanim kutovima trima ravna vodna linija predstavlja optimalan trim broda pri projektnoj brzini.

Međutim, kako bi se odredila stvarna vrijednost optimalnog trima broda potrebno je provesti numeričke simulacije za veći broj kutova trima sa znatno manjim korakom.

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu ispitan je utjecaj trima 6750-TEU kontejnerskog broda na ukupni otpor primjenom računalne dinamike fluida na temelju trodimenzijskog strujanja viskoznog fluida sa slobodnom površinom. Dan je pregled literature dosadašnjih istraživanja vezanih za numeričko određivanje ukupnog otpora te optimizaciju trima broda. Opisan je način provođenja pokusa otpora te je prikazana ITTC 1978 metoda ekstrapolacije rezultata eksperimentalnih ispitivanja. U radu je opisan matematički model numeričkih simulacija koji se temelji na Reynoldsovima osrednjenim Navier–Stokesovim (RANS) jednadžbama. Numeričke simulacije pokusa otpora provedene su primjenom komercijalnog programskog paketa STAR–CCM+. Odabran je $k-\omega$ SST model turbulencije, dok je za opisivanje slobodne površine primijenjena metoda udjela fluida u volumenu. Numeričke simulacije provedene su za pet vodnih linija: pretegu i zategu za kut trima $0,25^\circ$, pretegu i zategu za kut trima $0,5^\circ$ te za ravnu vodnu liniju. Sve numeričke simulacije pokusa otpora provedene su pri istom Froudeovom broju $Fn = 0,193$, koji odgovara projektnoj brzini broda. Postupak verifikacije proveden je za trim, uron i ukupni otpor primjenom tri gustoće mreže i tri vremenska koraka. Ukupna nesigurnost numeričke simulacije za dinamički trim iznosi $0,155\%$, za uron $3,765\%$, a za ukupni otpor $1,067\%$. Postupak validacije dobivenih numeričkih rezultata proveden je usporedbom s ekstrapoliranim vrijednostima pokusa otpora provedenih u Brodarskom institutu. Relativna devijacija za ravnu vodnu liniju za dinamički trim iznosi $-2,12\%$, za uron $38,31\%$, a za ukupni otpor $-0,09\%$. Za kut trima $-0,5^\circ$ dobivena je relativna devijacija za dinamički trim u iznosu $-0,34\%$, za uron u iznosu $-35,68\%$, a za ukupni otpor u iznosu $5,51\%$.

U okviru analize rezultata numeričkih simulacija pokusa otpora prikazana je slobodna površina duž trupa broda, raspodjela tangencijalnih naprezanja po oplakanoj površini, slike valova oko trupa broda te raspodjela hidrodinamičkog tlaka po oplakanoj površini. Na temelju usporedbe dobivenih rezultata ukupnog otpora utvrđeno je da se najmanja vrijednost ukupnog otpora javlja za kut trima 0° , a najveća za kut trima $-0,5^\circ$. Naime, za kut trima $-0,5^\circ$ uočena je najveća površina pod utjecajem pretlaka u krmenom dijelu broda te je pri navedenom kutu trima krmeno zrcalo najviše uronjeno. Ovakva raspodjela hidrodinamičkog tlaka objašnjava činjenicu da je najveća vrijednost otpora tlaka dobivena upravo za kut trima $t=-0,5^\circ$.

Kako je vrijednost ukupnog otpora najmanja pri ravnoj vodnoj liniji, može se zaključiti kako među ispitanim kutovima trima ravna vodna linija predstavlja optimalan trim broda pri projektnoj brzini. Međutim, kako bi se odredila stvarna vrijednost optimalnog trima broda u

daljnjim istraživanjima potrebno je provesti numeričke simulacije za veći broj kutova trima sa znatno manjim korakom.

LITERATURA

- [1] Sherbaz, S., Duan, W.: *Ship trim optimization: Assessment of influence of trim on resistance of MOERI container ship*; Hindawi Publishing Corporation, The Scientific World Journal, 2014, 603695.
- [2] Shivachev E., Khorasanchi M., Day H. A.: *Trim influence on Kriso Container Ship (KCS); An experimental and numerical study*; Proceedings of the ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, June 25-30, 2017, Trondheim, Norway.
- [3] Degiuli, N., Farkas, A., Martić, I., Gospić, I.: *The impact of slow steaming on reducing CO₂ emissions in the Mediterranean Sea*; Energy Reports, 7, 2021, pp. 8131-8141.
- [4] Kim, Y., Kim, J. H.: *Benchmark study on motions and loads of a 6750-TEU containership*, Ocean Engineering, 119, 2016, pp. 262-273.
- [5] Sun, J., Tu H., Chen, Y., Xie, D., Zhou, J.: *A Study on trim optimization for a container ship based on effects due to resistance*, Journal of Fluids Research, 60, 2016., pp 30-47.
- [6] Islam, H, Soares, C.G.: *Effect of trim on container ship resistance at different ship speeds and drafts*, Ocean Engineering, 183, 2019, pp. 106-115.
- [7] Dogrul, A., Song, S., & Demirel, Y. K.: *Scale effect on ship resistance components and form factor*; Ocean Engineering, 209, 2020, 107428.
- [8] Farkas A., Degiuli N., Martić I.: *Assessment of hydrodynamic characteristics of a full-scale ship at different draught*, Ocean Engineering, 2018., 156, pp. 135–152.
- [9] Song, K., Guo, C., Sun, C., Wang, C., Gong, J., Li, P., Wang, L.: *Simulation strategy of the full-scale ship resistance and propulsion performance*, Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 15(1), 2021, pp. 1321-1342.
- [10] Lv, X., Wu X., Sun, J, Tu W.: *Trim optimization of ship by a potential-based panel method*; Advances in Mechanical Engineering, 5, 2013, 378140.
- [11] D'Aure, B., Mallol, B., Hirsch, C.: *Resistance and seakeeping CFD simulations for the Korean container ship*; Proceedings of the Tokyo, pp. 359-364.
- [12] Iakovatos, M. N., Liarokapis, D., Tzabiras G.; *Experimental investigation of the trim influence on the resistance characteristics of five ship models*; Developments in Maritime Transportation and Exploitation of Sea Resources, 2014, pp. 23-28.
- [13] Niklas, K., Pruszko, H.: *Full-scale CFD simulations for the determination of ship resistance as a rational, alternative method to towing tank experiments*, Ocean Engineering, 190, 2019, 106435.

- [14] Gamulin, A.: *Otpor i propulzija broda*, interna skripta, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1997.
- [15] Degiuli, N.: *Otpor i propulzija broda*, podloge za nastavu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2018.
- [16] Tomić, D.: *Istraživanje utjecaja glavnih izmjera i oblika pramčanog dijela broda na ukupni otpor*; diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [17] ITTC-Recommended Procedures and Guidelines, *ITTC 1978 Performance Prediction Method* 7.5-02-03-01.4, 2017
- [18] Reiche, M., Minchev, A., Larsen, N. L.: *Trim Optimisation - Theory and Practice*; TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation 8(3), 2014.
- [19] Lyu, X., Tu, H., Xie, D., Sun, J.: *On resistance reduction of a hull by trim optimization*, Brodogradnja, 69(1), 2018, pp.1-13.
- [20] Virag, Z., Džijan, I.: *Računalna dinamika fluida*, Interna skripta, FSB, Zagreb, 2014.
- [21] Sorić, J.: *Uvod u numeričke metode u strojarstvu*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [22] Degiuli, N., Werner, A.: *Mehanika fluida IIB*, podloge za nastavu, 2018.
- [23] Džijan, I.: *Numerička metoda za analizu strujanja fluida u nestrukturiranoj mreži*, doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2004.
- [24] Degiuli, N., Werner, A.: *Mehanika fluida IB*, podloge za nastavu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.
- [25] Ferziger, J. H., Perić, M.: *Computational methods for fluid dynamics*, Springer Science & Business Media, Berlin, 2012.
- [26] AUTODESK Help - <https://knowledge.autodesk.com/>
- [27] STAR CCM+ User Guide.
- [28] Jović, V.: *Osnove hidrotehnike*, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilište u Splitu, Element, 2006.
- [29] Versteeg, H. K., Malalasekera, W.: *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*, Pearson Education Limited, Harlow, 2007.
- [30] Vlašić, D.: *Numerička simulacija pokusa vlastitog pogona*, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [31] Brodarski Institut, *Report M-1468*. Izvještaj, 2022, Brodarski Institut, Zagreb, Croatia.
- [32] ITTC – Recommended procedures and guidelines: *Uncertainty analysis in CFD verification and validation, Methodology and procedures*, 7.5-03-01-01, 2008.

-
- [33] Stern, F., Wilson, R.V., Coleman, H.W, Paterson, E.G.: *Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations–Part 1: Methodology and procedures*, Journal of Fluids Engineering, 2001, 123, pp. 793-801.
- [34] ITTC–Recommended procedures and guidelines: *Practical Guidelines for Ship CFD Applications*, 7.5–03-02-03, 2011.
- [35] Rui, D., Debo, H., Guangli, Z., Huawei, S., Liang, C., Chao, M.: *Research on Mesh Generation Effecting Resistance Calculation*, Applied Mechanics and Materials, 138, 2011, pp. 886-893.

PRILOZI

I. CD-R disc