Numeričko istraživanje utjecaja pramčanog bulba na ukupni otpor jahte

Zeman, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:459483

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ivan Zeman

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

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

Student:

Ivan Zeman

Zagreb, 2020.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Prije svega, zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Nastii Degiuli te asistentima mag. ing. Andrei Farkasu i mag. ing. Ivani Martić na pruženoj pomoći i potpori tijekom izrade ovoga rada. Zahvaljujem se svim profesorima na prenesenim znanjima tijekom čitavog studiranja. Konačno, zahvaljujem se svojoj obitelji i prijateljima na podršci.

Ivan Zeman

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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 20 - 6 / 3	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Ivan Zeman** Mat. br.: 0035200853

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Numeričko istraživanje utjecaja pramčanoga bulba na ukupni otpor jahte**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Numerical investigation into the effect of bulbous bow on total resistance of a yacht**

Opis zadatka:

Poznavanje značajki strujanja vode oko trupa broda predstavlja vrlo važan element u procesu projektiranja broda. Za određivanje hidrodinamičkih značajki danas se najčešće provode pokusi s modelima brodova u bazenu koji su vrlo skupi i dugotrajni. Primjenom računalne dinamike fluida moguće je odrediti hidrodinamičke značajke više projekata, čime se znatno skraćuje vrijeme i smanjuju troškovi projektiranja jahte. Na taj način moguće je u ranoj fazi projektiranja jahte dobiti uvid u detalje strujanja oko trupa jahte, poboljšati određeni projekt ili pak odabrati najpovoljniji projekt za modelsko ispitivanje. Zadnjih nekoliko godina dimenzije izgrađenih jahti su u porastu, a samim time povećava se i snaga ugrađenih motora kao i potrošnja goriva i posljedično emisija štetnih plinova.
U diplomskom radu potrebno je, primjenom programskoga paketa za računalnu dinamiku fluida, numerički simulirati pokus otpora jahte s tri tipa pramca. Uvidom u strujanje oko pramca jahte potrebno je ustanoviti prednosti primjene pramčanoga bulba.

U radu je potrebno:

1. Dati pregled literature vezane za numeričke simulacije pokusa otpora jahte.
2. Dati matematičku osnovu numeričkih simulacija viskoznoga strujanja fluida.
3. Pripremiti proračunsku mrežu, početne i rubne uvjete potrebne za numeričku simulaciju viskoznoga strujanja fluida.
4. Opisati računalni model za numeričku simulaciju pokusa otpora jahte.
5. Izvršiti numeričku simulaciju pokusa otpora jahte s tri tipa pramca primjenom programskoga paketa za računalnu dinamiku fluida.
6. Ispitati utjecaj primjene različitih modela turbulencije na dobivene rezultate.
7. Usporediti numerički dobivene rezultate hidrodinamičkih značajki s eksperimentalnim rezultatima.

Rezultate proračuna prikazati odgovarajućim tablicama, dijagramima i slikama.
U radu koristiti programski paket STAR-CCM+.
U radu treba navesti literaturu i eventualno dobivenu pomoć tijekom izrade.

Zadatak zadan:	Datum predaje rada:	Predviđeni datumi obrane:
24. rujna 2020.	26. studenoga 2020.	30.11. – 4.12.2020.

Zadatak zadao: Predsjednica Povjerenstva:

Nastia Degiuli Nastia Degiuli

Prof. dr. sc. Nastia Degiuli Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA V
POPIS OZNAKA VI
SAŽETAK IX
SUMMARY X
1. UVOD 1
2. OTPOR BRODA 5
2.1. Podjela ukupnog otpora broda 6
2.1.1. Otpor trenja 7
2.1.2. Viskozni otpor tlaka 8
2.1.3. Otpor valova 9
2.1.4. Dodatni otpor 10
2.1.5. Utjecaj pramčanog bulba na otpor broda 11
3. RAČUNALNA DINAMIKA FLUIDA 13
3.1. Proces numeričke simulacije 13
3.2. Osnovni zakoni dinamike fluida 15
3.3. Turbulentno strujanje 17
3.3.1. Modeliranje turbulencije 17
3.3.1.1. Reynoldsove osrednjene Navier-Stokesove jednadžbe 18
3.3.1.2. Model turbulencije 21
3.3.1.3. k-ε realizible model turbulencije 22
3.3.1.4. k-ω SST model turbulencije 23
3.3.1.5. Reynolds Stress Model (RSM) 23
3.4. Strujanje u blizini krute stijenke (zidne funkcije) 24
3.5. Metoda udjela fluida u volumenu 25
3.6. Metoda konačnih volumena 26
3.7. Podrelaksacija 27
3.8. Verifikacija rezultata numeričke simulacije 27
3.8.1. Konvergencija rezultata iterativnog postupka 28
3.8.2. Procjena nesigurnosti numeričke simulacije 28
3.9. Validacija rezultata 29
4. NUMERIČKA SIMULACIJA POKUSA OTPORA 30
4.1. Definiranje proračunske domene 32
4.2. Definiranje rubnih uvjeta 33
4.3. Diskretizacija geometrijske mreže 34
4.3.1. Profinjenja geometrijske mreže 38
4.3.2. Kontrola geometrijske mreže 43
4.4. Fizikalni model 44
4.5. Početni i rubni uvjeti 45
4.6. Postavljanje parametra rješavača i kriterij zaustavljanja 45

5. REZULTATI 47
5.1. Verifikacija rezultata 47
5.2. Rezultati numeričkih simulacije pokusa otpora 48
5.3. Usporedba raspodjele hidrodinamičkog tlaka 50
5.4. Usporedba slike valova 52
5.5. Usporedba strujanja oko trupa 57
6. ZAKLJUČAK 64
LITERATURA 65

POPIS SLIKA

Slika 1. Podjela ukupnog otpora broda [1] 6
Slika 2. Prikaz sustava valova i Kelvinov kut [13] 10
Slika 3. Valni profil forme bez bulba i forme s bulbom [13] 11
Slika 4. Definicija parametara *f* i *t* [13] 12
Slika 5. Vremensko osrednjavanje strujanja [19] 19
Slika 6. Granični sloj strujanja za ravnu ploču [24] 24
Slika 7. Profil brzine strujanja u turbulentnom graničnom sloju [24] 25
Slika 8. Dio diskretiziranog područja [17] 27
Slika 9. Model 1 [25] 31
Slika 10. Model 2 [25] 31
Slika 11. Model 3 [25] 31
Slika 12. Nacrt rebara svih modela jahte [25] 32
Slika 13. Pramčana kontura forme Modela 1, 2, 3 [25] 32
Slika 14. Udaljenosti granice proračunske domena od modela jahte 33
Slika 15. Promjena trima pri modelskim ispitivanjima[25] 34
Slika 16. Rubni uvjeti proračunske domene [27] 34
Slika 17. Heksaedarska ćelija [27] 35
Slika 18. Diskretizacija geometrijske mreže Modela 1 37
Slika 19. Diskretizacija geometrijske mreže Modela 2 38
Slika 20. Diskretizacija geometrijske mreže Modela 3 38
Slika 21. Volumetričke kontrole trupa 39
Slika 22. Diskretizacija graničnog sloja 40
Slika 23. Diskretizacija pramčanog dijela 41
Slika 24. Diskretizacija krmenog dijela 41
Slika 25. Profinjenja privjesaka 42
Slika 26. Profinjenje slobodne površine i pramčani val 42
Slika 27. Volumetričke kontrole slobodne površine 42
Slika 28. Profinjenje sustava valova 43
Slika 29. Raspodjela parametra y^+ na Modelu 1 43
Slika 30. Raspodjela parametra y^+ na Modelu 2 44
Slika 31. Raspodjela parametra y^+ na Modelu 3 44
Slika 32. Rezultati numeričkih simulacija i eksperimenta 49
Slika 33. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka na Modelu 1 50
Slika 34. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka na Modelu 2 50
Slika 35. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka na Modelu 3 51
Slika 36. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka na Modelu 1 51
Slika 37. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka na Modelu 2 51
Slika 38. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka na Modelu 3 52
Slika 39. Slika valova oko Modela 1 53
Slika 40. Slika valova oko Modela 2 53
Slika 41. Slika valova oko Modela 3 53
Slika 42. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka u simetralnoj ravnini za Model 1 54
Slika 43. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka u simetralnoj ravnini za Model 2 54
Slika 44. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka u simetralnoj ravnini za Model 3 54
Slika 45. Točke elevacije vala u ravnini y = 0,001 m 55
Slika 46. Točke elevacije vala u ravnini y = 0,05 m 55
Slika 47. Točke elevacije vala u ravnini y = 0,1 m 56
Slika 48. Točke elevacije vala u ravnini y = 0,15 m 56

Slika 49. Točke elevacije vala u ravnini y = 0,2 m 57
Slika 50. Strujnice fluida oko Modela 1 (pogled na pramac) 58
Slika 51. Strujnice fluida oko Modela 1 (pogled na krmu) 58
Slika 52. Strujnice fluida oko Modela 2 (pogled na pramac) 58
Slika 53. Strujnice fluida oko Modela 2 (pogled na krmu) 59
Slika 54. Strujnice fluida oko Modela 3 (pogled na pramac) 59
Slika 55. Strujnice fluida oko Modela 3 (pogled na krmu) 59
Slika 56. Polje nominalnog sustrujanja u ravnini brodskog vijka (Model 1, k-ω SST) 60
Slika 57. Polje nominalnog sustrujanja u brodskoj vijka (Model 1, k-ε realizible) 60
Slika 58. Polje nominalnog sustrujanja u brodskoj vijka (Model 1, RSM) 61
Slika 59. Polje nominalnog sustrujanja u ravnini brodskog vijka (Model 2, k-ω SST) 61
Slika 60. Polje nominalnog sustrujanja u ravnini brodskog vijka (Model 2, k-ε realizible) 61
Slika 61. Polje nominalnog sustrujanja u ravnini brodskog vijka (Model 2, RSM) 62
Slika 62. Polje nominalnog sustrujanja u ravnini brodskog vijka (Model 3, k-ω SST) 62
Slika 63. Polje nominalnog sustrujanja u ravnini brodskog vijka (Model 3, k-ε realizible) 62
Slika 64. Polje nominalnog sustrujanja u ravnini brodskog vijka (Model 3, RSM) 63

POPIS TABLICA

Tablica 1. Fizikalni model 14
Tablica 2. Proces numeričke simulacije [17] 15
Tablica 3. Značajke modela ispitanih u bazenu i jahte u stvarnoj veličini [25] 30
Tablica 4. Postavke za finu mrežu modela Model 1 36
Tablica 5. Broj ćelija u mrežama i njihovi omjeri 37
Tablica 6. Parametri rješavača i kriterij zaustavljanja 46
Tablica 7. Rezultati numeričkih simulacija pokusa otpora 47
Tablica 8. Verifikacija geometrijske mreže 47
Tablica 9. Verifikacija vremenskog koraka 48
Tablica 10. Ukupna nesigurnost numeričkih simulacija 48
Tablica 11. Relativna devijacija rezultata svih numeričkih simulacija 49
Tablica 12. Smanjenje sile otpora uslijed dodavanja pramčanog bulba 50

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$\bar{k}$	m^2 / s^2	kinetička energija turbulencije
$\rho\overline{v_i' v_j'}$	N/mm^2	Reynoldsov tenzor naprezanja
a_i	m^2	vektor površine
B	m	širina broda
C_A		koeficijent dodatnog otpora
C_B		blok koeficijent
C_F		koeficijent otpora trenja
C_{F0}		koeficijent otpora trenja ravne ploče
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
$C_{\varepsilon,i}$		koeficijent modela turbulencije
C_μ		koeficijent modela turbulencije
D_{ij}	s^{-1}	tenzor brzine deformacije
D_ω	N/m^4	član unakrsne difuzije
$\mathrm{d}u / \mathrm{d}y$	s^{-1}	komponenta gradijenta brzine u smjeru okomitom na razmatrano tijelo
f		omjer površine bulba na pramčanoj okomici i površine glavnog rebra
f_c		faktor korekcije zakrivljenosti
f_i	m/s^2	gustoća masene sile
Fn		Froudeov broj
F_S		faktor sigurnosti
g	m/s^2	ubrzanje zemljine sile teže
G_b	Pa/s	član produkcije uzgona $k-\omega$ modela turbulencije
G_{ij}	Pa/s	član produkcije uzgona RSM modela turbulencije
G_k	Pa/s	član produkcije turbulencije
G_{nl}	Pa/s	član nelinearne produkcije
G_ω	Pa/s	član produkcije specifične brzine disipacije
I_{ij}		jedinična matrica
k	J/kg	specifična kinetička energija turbulencije
k		faktor forme
k_0	J/(kg s)	specifična kinetička energija turbulencije u okruženju
k_F		koeficijent proporcionalnosti otpora trenja

k_{PV}		koeficijent proporcionalnosti viskoznog otpora tlaka
L	m	duljina broda
L_{WL}	m	duljina vodne linije
L_{PP}	m	duljina između pramčane i krmene okomice broda
p	N/m^2	tlak
P_E	W	efektivna snaga
p_i		red točnosti
P_{ij}	Pa/s	član produkcije turbulencije RSM modela turbulencije
R		koeficijent korelacije
R_A	N	dodatni otpor
R_{AA}	N	otpor zraka i vjetra
R_{AP}	N	otpor privjesaka
R_{AR}	N	otpor hrapavosti oplate
R_{AS}	N	otpor kormilarenja
RD	%	relativna devijacija
R_F	N	otpor trenja
r_i		omjer profinjenja
Rn		Reynoldsov broj
R_P	N	otpor tlaka
R_T	N	ukupni otpor
R_i		omjer konvergencije
R_V	N	viskozni otpor
R_W	N	otpor valova
S	s^{-1}	modul tenzora brzine deformacije
S	m^2	oplakana površina broda
S_L		najmanja vrijednost rezultata numeričke simulacije
S_k	Pa/s	izvorski član specifične kinetičke energije turbulencije
S_U		najveća vrijednost rezultata numeričke simulacije
S_R	Pa/s	izvorski član turbulencije RSM modela turbulencije
S_ε	Pa/s^2	izvorski član disipacije kinetičke energije turbulencije
S_ω	N/m^4	izvorski član specifične brzine disipacije
t		završni omjer (eng. *terminal ratio*)
T	s	period
T	s	turbulentna vremenska skala
T_A	m	gaz na krmi
T_F	m	gaz na pramcu
T_M	m	gaz na glavnom rebru
U	m/s	srednja brzina strujanja
U_i		nesigurnost rješenja fizikalne veličine

$\bar{U}_{SN}$	%	ukupna nesigurnost
u_τ	m/s	brzina trenja
U^+		bezdimenzijska brzina u graničnom sloju
U_g		nesigurnost mreže
u_{gi}	m/s	vektor brzine mreže
u_i	m/s	vektor brzine
U_t		nesigurnost vremenskog koraka
V	m^3	volumen ćelije
v	m/s	brzina broda
y	m	udaljenost od stijenke
y^+		bezdimenzijska udaljenost od stijenke
α_i		udio fluida u volumenu
β		koeficijent k-ω modela turbulencije
β^+		koeficijent k-ω modela turbulencije
γ_{eff}		koeficijent k-ω modela turbulencije
Δ	t	masa istisnine
δ_{ij}		Kroneckerov simbol
ε	J/(kg s)	brzina disipacije kinetičke energije turbulencije k-ε modela turbulencije
ε_0	J/(kg s)	brzina disipacije kinetičke energije turbulencije u okruženju
$\underline{\varepsilon}$	J/(kg s)	brzina disipacije kinetičke energije turbulencije RSM modela turbulencije
κ		Von Karmanova konstanta
∇	m^3	volumen istisnine
μ	Pas	koeficijent dinamičke viskoznosti
υ	m^2/s	koeficijent kinematičke viskoznosti
ρ	kg/m^3	gustoća
Σ_{ij}	N/mm^2	devijatorski dio tenzora naprezanja
σ_{ij}	N/mm^2	tenzor naprezanja
σ_ε		Schmidtov broj turbulencije za disipaciju kinetičke energije
σ_k		Schmidtov broj turbulencije za kinetičku energiju turbulencije
σ_ω		Schmidtov broj turbulencije za brzinu disipacije kinetičke energije
Υ_M	Pa/s	modifikacija modela turbulencije za stlačivost
τ	N/mm^2	tangencijalno naprezanje
φ		promatrano fizikalno svojstvo
ω	s^{-1}	specifična brzina disipacije
ω_0	s^{-1}	specifična brzina disipacije

SAŽETAK

U ovom radu provedene su numeričke simulacije pokusa otpora jahte s ciljem ispitivanja utjecaja pramčanog bulba na ukupni otpor jahte. Modelska ispitivanja provedena su u bazenu za ispitivanje modela *Schiffbautechnische Versuchsanstalt* u Beču za tri modela jahte, jedan bez pramčanog bulba te dva s različitim tipovima pramčanog bulba. Dan je prikaz matematičkog modela temeljenog na Reynoldsovim osrednjenim Navier-Stokesovim jednadžbama (RANS) te je detaljno opisan numerički model. Numeričke simulacije provedene su primjenom komercijalnog programskog paketa STAR-CCM+. Proračunska domena diskretizirana je metodom konačnih volumena, a za praćenje i određivanje položaja slobodne površine primijenjena je metoda udjela fluida u volumenu (eng. *Volume of Fluid, VOF*). Primijenjena su tri modela turbulencije: *k-ω* SST, *k-ε* realizible i Reynolds Stress Model kako bi se ispitao utjecaj modela turbulencije na ukupni otpor jahte. Nadalje, proveden je postupak verifikacije numeričkih rezultata s ciljem određivanja numeričke nesigurnosti. Rezultati numeričkih simulacija pokazali su zadovoljavajuće slaganje s eksperimentalnim rezultatima. Analizirani su slika valova, raspodjela hidrodinamičkog tlaka i strujanje oko trupa za sva tri modela jahte i sva tri modela turbulencije.

Ključne riječi: numerička simulacija, otpor jahte, pramčani bulb, *k-ω* SST, *k-ε* realizible, Reynolds Stress Model, VOF

SUMMARY

In this thesis numerical simulations of resistance test are performed in order to investigate the influence of the bulbous bulb on the total resistance of the yacht. Model test are carried out in the towing tank at the *Schiffbautechnische Versuchsanstalt* in Vienna for three yacht models, one without the bulbous bow and two with different types of bulbous bow. Mathematical model based on Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) equations is presented and the numerical model is described in detail. Numerical simulations are performed using commercial software package STAR-CCM+. The computational domain is discretized by the finite volume method and the volume of fluid method (VOF) is used for tracking and locating the free surface. Three turbulence models are applied: k-ω SST, k-ε realizible and Reynolds Stress Model to investigate the influence of the turbulence model on the total resistance of the yacht. Furthermore, the verification study is performed with the aim of determining numerical uncertainty. The results of the numerical simulations have shown satisfactory agreement with the experimental results. The wave pattern, hydrodynamic pressure distribution and flow around the hull for all three yacht models and all turbulence models are analysed.

Key words: numerical simulation, yacht resistance, bulbous bow, k-ω SST, k-ε realizible, Reynolds Stress Model, VOF

1. UVOD

Osnovni cilj svakog brodograditelja pri projektiranju broda je odrediti takvu formu trupa koja će pri plovidbi stvarati što je moguće manji otpor. Iz toga razloga je poznavanje značajki strujanja vode oko trupa broda vrlo važan element u procesu projektiranja broda. Optimizacijom forme broda u cilju stvaranja što manjeg otpora smanjuje se energija potrebna za gibanje broda, a time se smanjuje i potrebna snaga pogonskog stroja. Ugradnjom pogonskog stroja manje snage smanjuje se potrošnja goriva i emisija štetnih plinova, [1]. Budući da su u današnje vrijeme dimenzije jahti u porastu te se samim time povećava i snaga ugrađenih motora, smanjenje otpora je važno s ekonomskog i ekološkog stajališta.

Za određivanje otpora broda postoje tri temeljne metode: empirijsko-statističke metode, eksperimentalne metode i numeričke metode. Empirijsko-statističke metode koriste se u ranim fazama osnivanja broda, jer projektanti trebaju brze i precizne procjene, ali zbog svoje točnosti nisu prikladne u kasnijim fazama osnivanja. U empirijsko-statističkim metodama kombinira se jednostavni fizički model i regresijska analiza kako bi se odredili traženi koeficijenti, bilo iz jednog sličnog broda ili serije brodova. 40-ih i 50-ih godina prošlog stoljeća provedena su ispitivanja velikih serija formi brodova u kojima su određeni utjecaji osnovnih parametara trupa na otpor broda. Zbog troškova izrade i ispitivanja modela, ne postoje novije ispitane velike serije modernih formi brodova.

Eksperimentalne metode uključuju modelska ispitivanja ili mjerenja na brodovima u naravi. Rezultate modelskih ispitivanja potrebno je ekstrapolirati na brod u naravi. U eksperimentalnim metodama je također potreban određeni stupanj empirije, posebno pri korelaciji model-brod. U osnovnoj metodologiji eksperimentalnih metoda se nije mnogo toga promijenilo od vremena W. Froudea (druga polovica 19. stoljeća), ali su različiti aspekti metoda napredovali. Na primjer, bolja su saznanja o trodimenzijskom strujanju oko brodova s privjescima, posebno o učinku graničnog sloja. Postupci predviđanja otpora broda u naravi na temelju modelskih ispitivanja su postali uobičajena praksa, no mjerenja na brodovima u naravnoj veličini su rijetka i teško ih je ostvariti. Ispitivanja na brodovima u naravi su komplicirana i skupa, posebno u slučaju kada se žele promijeniti neke značajke trupa.

Numeričke metode postaju svakim danom sve važnije, posebno je s razvojem računala napredovala računalna dinamika fluida (RDF) *(*eng. *Computational Fluid Dynamics, CFD*) te je u današnje vrijeme neizostavan proces projektiranja. RDF se koristi u ranijim fazama osnivanja broda, jer daje detaljan uvid u strujanje oko trupa broda te pomaže pri poboljšanju

forme i odabiru najpovoljnijeg projekta za modelsko ispitivanje, što je iznimno važno jer su modelska ispitivanja dugotrajna i skupa u odnosu na RDF, [1].

U ovom radu je uz pomoć komercijalnog programskog paketa za računalnu dinamiku fluida STAR-CCM+ numerički simulirano viskozno strujanje oko tri modela jahte te je napravljena usporedba s modelskim ispitivanjima i dan uvid u prednost primjene pramčanog bulba. Jedan model nema pramčani bulb, a druga dva imaju različite tipove pramčanog bulba. Numeričke simulacije su provedene s različitim modelima turbulencije sa svrhom ispitivanja utjecaja modela turbulencije na dobivene rezultate. U radu je dan pregled literature vezan uz numeričke simulacije viskoznog strujanja oko trupa broda i utjecaja pramčanog bulba na otpor broda. Dana je matematička osnova te je opisan je računalni model gibanja broda na slobodnoj površini vode. U nastavku ovog poglavlja dan je pregled dosadašnjih istraživanja u području.

Za numeričku simulaciju strujanja oko trupa broda na slobodnoj površini najčešće se koriste metode potencijalnog i viskoznog strujanja. Metode viskoznog strujanja daju pouzdanije rezultate od metoda potencijalnog strujanja [2]. Kao što je već navedeno, bitno je poznavati hidrodinamičke značajke broda što ranije u fazi osnivanja kako bi se osnovala forma broda sa što manjim otporom. Choi et al. [3] su u svome radu proveli numeričke simulacije za osam brodova u naravnoj veličini kako bi dobili uvid u hidrodinamičke značajke tih brodova. Provedene su numeričke simulacije pokusa otpora i simulacije pokusa vlastitog pogona. Odabrani su sljedeći brodovi: četiri broda za prijevoz kontejnera, kapaciteta od 5600 do 7800 TEU, zatim brod za prijevoz rasutog tereta nosivosti 172 000 t, tanker nosivosti 319 000 t te dva broda za prijevoz ukapljenog plina kapaciteta 150 000 i 216 000 m^3. Rezultati provedenih numeričkih simulacija su sila otpora, slika valova oko trupa i oko propelera te značajke propulzije. Dobiveni rezultati su uspoređeni s modelskim ispitivanjima u bazenu. Banks et al. [4] su ispitali utjecaj dva različita modela turbulencije na rezultate numeričke simulacije pokusa otpora. Korišteni su SST (eng. *Shear Stress Transport*) i BSL (eng. *Baseline Reynolds Stress*) modeli turbulencije. Za modeliranje slobodne površine korištena je metoda udjela fluida u volumenu (eng. *Volume of Fluid*). Numerička simulacija pokusa otpora je provedena na formi *KCS* kontejnerskog broda, za koju su dostupni rezultati eksperimenta iz prijašnjih istraživanja (Kim et al., [5]). Numerička simulacija je provedena na brodu u naravnoj veličini. Razdvajajući ukupni otpor na komponente, zaključuju kako rezultati dobiveni primjenom BSL modela turbulenciju imaju bolje slaganje s eksperimentom. Farkas et al. [6] ispitali su viskozno strujanje oko trupa modela tankera. Izvršena su modelska ispitivanja u bazenu te su provedene numeričke simulacije pokusa otpora za Froudeov broj u rasponu od 0,064 do 0,212. Autori su

primijenili Reynoldsove osrednjene Navier-Stokesove jednadžbe, turbulencija je modelirana *k-ε* realizible modelom turbulencije, a slobodna površina metodom udjela fluida u volumenu. Modelska ispitivanja su izvršena s modelom u mjerilu $\lambda = 28{,}8$. Za numeričke simulacije pokusa otpora korištena su tri modela u različitim mjerilima, s ciljem utvrđivanja utjecaja mjerila na rezultate numeričke simulacije. Rezultati numeričkih simulacija su pokazali dobro slaganje s eksperimentalnim rezultatima. Također su pokazali da korištenje grublje mreže može dati zadovoljavajuće rezultate i u isto vrijeme znatno sniziti potrebno vrijeme proračuna.

Brodovi koji imaju ugrađen pramčani bulb mogu imati 10-15% manji otpor, odnosno manju potrošnju goriva nego slični brodovi bez pramčanog bulba. To su pokazali Chrismianto et al. [7] ugradnjom pramčanog bulba na katamaran duljine 23,45 m. Pramčani bulb su definirali sa šest parametara koje je odredio Kracht [8]. Tri parametra su linearna, a tri nelinearna. Linearni parametri uključuju odnose dimenzija bulba i glavnih dimenzija broda, dok nelinearni pokazuju odnose površina bulba i površina broda te volumena bulba i volumena broda. Pomoću tih parametara definirano je 9 oblika pramčanog bulba. Ukupni otpor broda proračunat je primjenom RDF-a. Numeričke simulacije su provedene za tri brzine: 16, 20 i 24 čvorova. Rezultati numeričkih simulacija pokazuju da forma s pramčani bulbom definiranim kao bulb broj 8 ima manji ukupni otpor od forme bez pramčanog bulba za 11-13% pri svim zadanim brzinama. Liu et al. [9] su proveli eksperimentalna ispitivanja i numeričke simulacije za novi tip pramčanog privjeska s ciljem smanjenja otpora pri plovidbi većim brzinama, odnosno za Froudeov broj od 0,4 do 0,5. Pramčani privjesak se postavlja blizu slobodne površine i njegov položaj ovisi o brzini plovidbe i sustavu valova koje brod generira. Numeričke simulacije su provedene za model broda bez privjeska te brod opremljen s pramčanim privjeskom pozicioniranim u tri različita položaja. Eksperimentalna ispitivanja su također provedena s modelom broda bez privjeska te s modelom broda opremljenim 3D isprintanim pramčanim privjeskom. Rezultati numeričkih simulacija pri Froudeovom broju od 0,45 pokazuju smanjenje ukupnog otpora od 9% za model opremljen pramčanim privjeskom, dok rezultati eksperimenta za isti Froudeov broj pokazuju smanjenje ukupnog otpora od 8% u odnosu na model bez pramčanog privjeska.

Prethodno navedeni radovi se bave na određivanjem otpora primjenom RDF-a. No, koristeći RDF moguće je i predvidjeti ponašanje brodova u različitim vremenskim uvjetima, što je posebno važno manjim brodovima u područjima plovidbe s jakim vjetrovima. Niklas et al. [10] su proveli numeričke simulacije pokusa otpora i pomorstvenosti u različitim uvjetima plovidbe. Rezultate numeričkih simulacija su validirali ispitivanjima u bazenu. Cilj ispitivanja je bio

promjenom forme u pramčanom dijelu broda dobiti smanjenje ukupnog otpora te bolja svojstva pomorstvenosti. Postojeći brod je imao pramčani bulb V-tipa, a modificirana forma imala je pramac bez bulba X-tipa. Forma je modificirana na način da istisnina, površina vodne linije, gaz, težište istisnine itd. ostanu nepromijenjeni. Numeričke simulacije pokusa otpora su provedene za obje forme te su provedeni pokusi otpora u bazenu. Rezultati su pokazali da modificirana forma ima do 12% niži ukupni otpor pri brzinama od 5 do 8 čvorova, no pri brzinama iznad 10 čvorova ima veći otpor, zbog toga što takav oblik pramca pri većim brzinama generira visoke valove. Zatim je izvršena analiza pomorstvenosti, na način da su provedene numeričke simulacije i modelska ispitivanja u bazenu. Rezultati su pokazali da forma s bulbom X-tipa ima veće amplitude gibanja što može biti neugodno za putnike te da može doći do udaranja pramca (eng. *slamming*).

Prilikom projektiranja velikih trgovačkih brodova, poput brodova za prijevoz rasutog tereta, čak i malo smanjenje otpora u ranoj fazi osnivanja može dovesti do velikih ušteda goriva. Lee et al. [11] su usporedili ukupni otpor dvije varijante forme s različitim pramcem. Prva forma ima pramčani bulb, dok je druga forma modifikacija prve forme bez pramčanog bulba, optimizirana za što manji ukupni otpor. Provedene su numeričke simulacije otpora u mirnoj i valovitoj vodi te su također provedena eksperimentalna ispitivanja u bazenu. Za numeričke simulacije korišten je k-ε realizible model turbulencije, a za modeliranje slobodne površine metoda udjela fluida u volumenu (eng. *Volume of Fluid*). Modelska ispitivanja su provedena u bazenu. Rezultati su pokazali da optimizirana forma bez pramčanog bulba ima za 3% manji ukupni otpor, no bitno je napomenuti da ta forma uslijed modifikacije ima za 1% manju istisninu, što iznosi oko 600 tona. Yu et al [12] su izvršili optimizaciju pramčanog bulba numeričkim simulacijama pokusa otpora. Numerička ispitivanja su provedena za različite tipove pramčanog bulba koji su dobiveni promjenom glavnih parametara pramčanog bulba te je svaki pramčani bulb ispitan pri različitoj brzini, odnosno Froudeovom broju. Iz rezultata numeričke analize izvedene su regresijske jednadžbe koje povezuju ukupni otpor broda i glavne parametre bulba.

2. OTPOR BRODA

Brod u plovidbi izaziva poremećaje u svom okolišu, vodi i zraku. Sila kojom se brod opire pravocrtnom gibanju jednolikom brzinom se naziva otpor broda. Dakle, sila otpora je sila potrebna za održavanje jednolike brzine bez korištenja propulzora. 1870. godine W. Froude predlaže metodu prognoziranja snage otpora koja je postala temelj današnje svakodnevne prakse, [13]. Snaga potrebna za svladavanje te sile otpora naziva se efektivnom snagom (eng. *effective power*) ili snaga tegljenja (eng. *tow-rope*) i izražava se sljedećim izrazom [1]:

$$P_E = R_T \cdot v_S \tag{1}$$

gdje je:

P_E – efektivna snaga, kW;

R_T – ukupni otpor, kN;

v – brzina broda, m/s.

Ukupni otpor R_T je funkcija koja ovisi o:

- geometriji broda
- brzini plovidbe broda, v
- svojstvima tekućine (μ – dinamički koeficijent viskoznosti, ρ – gustoća tekućine)
- ubrzanju zemljine sile teže, g.

Prema tome, ukupni otpor broda se može zapisati u obliku:

$$R_T = C_T\left(\text{geometrija trupa}, Rn, Fn\right)\frac{1}{2}\rho v^2 S \tag{2}$$

gdje je C_T koeficijent ukupnog otpora broda ovisan o geometriji trupa, Reynoldsovom broju Rn i Froudeovom broju Fn, a S je oplakana površina trupa. Reynoldsov i Froudeov broj su dani izrazima:

$$Rn = \frac{\rho v L}{\mu} \tag{3}$$

$$Fn = \frac{v}{\sqrt{gL}} \tag{4}$$

gdje je L duljina broda. [1]

2.1. Podjela ukupnog otpora broda

Ukupni otpor broda se dijeli na različite komponente broda. Uz poznata tangencijalna naprezanja i normalna naprezanja u svim točkama oplakane površine trupa, ukupni otpor se određuje prema sljedećem izrazu:

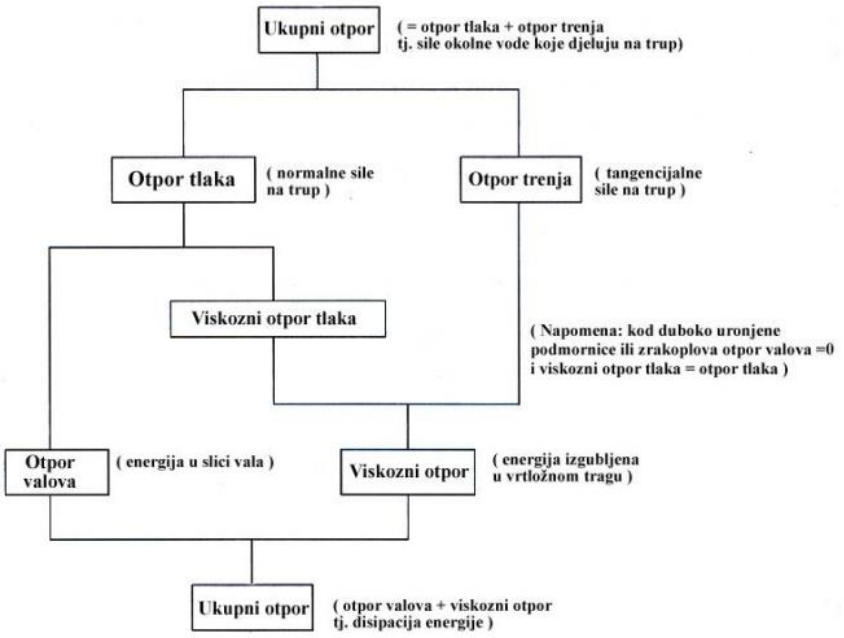
$$R_T = \int_S \tau_0 \cos(\tau_0, x_1)\,\mathrm{d}S + \int_S p\cos(\mathrm{p}, x_1)\,\mathrm{d}S \qquad \textbf{(5)}$$

gdje prvi dio izraza predstavlja otpor trenja, a drugi otpor tlaka. Stoga slijedi:

$$R_T = R_F + R_P \qquad \textbf{(6)}$$

gdje je R_F otpor trenja, a R_P otpor tlaka.

Ova podjela je utemeljena na saznanju da tekućina djeluje na trup kontinuirano raspodijeljenim površinskim silama. Podjela ukupnog otpora prikazana je shematski na slici 1.



Slika 1. Podjela ukupnog otpora broda [1]

Strujanje oko broda dijeli se na područje s dominantnim utjecajem viskoznosti, u što spada granični sloj i hidrodinamički trag i na vanjsko područje s zanemarivim utjecajem viskoznosti (potencijalno strujanje). U idealnoj tekućini otpor postoji samo ako se gibanjem tijela na slobodnoj površini generiraju površinski valovi. Zato je moguća i sljedeća podjela ukupnog otpora [1]:

$$R_T = R_V + R_W \qquad \textbf{(7)}$$

pri čemu je R_V viskozni otpor, a R_W otpor valova.

Viskozni otpor je funkcija Reynoldsovog broja, a otpor valova je funkcija Froudeovog broja. Viskozni otpor se dijeli na otpor trenja R_F koji nastaje uslijed tangencijalnih naprezanja između oplate broda i vode te na viskozni otpor tlaka R_{PV} koji nastaje kao posljedica promjene tlaka duž trupa uzrokovane viskoznim pojavama unutar graničnog sloja. Daljnja promjena tlaka duž trupa uzrokuje stvaranje valova na površini. Prema tome vrijedi [1]:

$$R_P = R_{PV} + R_W \tag{8}$$

$$R_P = C_P\left(Rn, Fn\right)\frac{1}{2}\rho v^2 S \tag{9}$$

$$R_P = \left[C_{PV}\left(Rn\right) + C_W(Fn)\right]\frac{1}{2}\rho v^2 S \tag{10}$$

$$R_V = R_F + R_{PV} \tag{11}$$

$$R_V = C_V\left(Rn\right)\frac{1}{2}\rho v^2 S \tag{12}$$

$$R_V = \left[C_F\left(Rn\right) + C_{PV}\left(Rn\right)\right]\frac{1}{2}\rho v^2 S \tag{13}$$

gdje je C_P koeficijent otpora tlaka, C_{PV} koeficijent viskoznog otpora tlaka, C_W koeficijent otpora valova, C_F koeficijent otpora trenja, a C_V koeficijent viskoznog otpora [1].

2.1.1. Otpor trenja

Otpor trenja je komponenta ukupnog otpora dobivena integracijom tangencijalnih naprezanja preko oplakane površine u smjeru gibanja broda. Trenje uzrokuje viskoznost, što je svojstvo svake realne tekućine te se mjeri otporom tekućine prema smičnoj ili kutnoj deformaciji pri gibanju. Dinamički koeficijent viskoznosti (μ) određuje se omjerom smičnog naprezanja i gradijenta brzine:

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y}} \tag{14}$$

gdje je τ smično naprezanje, du/dy komponenta gradijenta brzine u smjeru okomitom na razmatrano tijelo.

Kinematički koeficijent viskoznosti je omjer dinamičkog koeficijenta viskoznosti i gustoće tekućine:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \tag{15}$$

Viskoznost tekućine ovisi o tlaku i temperaturi, no pri razmatranju otpora broda promjena viskoznosti uslijed promjene tlaka je zanemariva, ali porastom temperature tekućine viskoznost tekućine se smanjuje i to je nužno uzeti u obzir. Otpor trenja se određuje prema izrazu:

$$R_F = C_F\left(Rn\right)\frac{1}{2}\rho v^2 S \tag{16}$$

Određivanje koeficijenta otpora trenja je vrlo složen problem i ne postoje analitičke metode kojima se može pouzdano odrediti. Iz toga razloga se koeficijent otpora trenja određuje primjenom računalne dinamike fluida ili prema regresijskom izrazu predloženom 1957. godine od strane ITTC-a, poznatom kao korelacijska linija model-brod ITTC-1957 [14]:

$$C_F = \frac{0,075}{\left(\log Rn - 2\right)^2} \tag{17}$$

Iz izraza (17) vidljiva je ovisnost koeficijenta otpora trenja o Reynoldsovom broju, bezdimenzijskom parametru koji prikazuje odnos inercijskih i viskoznih sila u tekućini. Također je vidljivo da je koeficijent otpora trenja obrnuto proporcionalan Reynoldsovom broju, što znači da će s povećanjem brzine koeficijent otpora trenja biti manji, odnosno udio otpora trenja u ukupnom otporu broda će biti manji.

Budući da je forma broda zakrivljena u uzdužnom i u poprečnom smjeru, tlak i brzina vanjskog potencijalnog strujanja se mijenjaju uzduž trupa. Te promjene uzrokuju promjene strujanja u graničnom sloju što dovodi do promjene tangencijalnih naprezanja u odnosu na ona kod ekvivalentne ravne ploče kod koje nema uzdužne promjene tlaka. U području pramca broda dolazi do ubrzanja vode zbog negativnog gradijenta tlaka što dovodi do tanjeg graničnog sloja od onoga kod ravne ploče. U području krme broda gradijent tlaka je pozitivan te je granični sloj deblji nego kod ravne ploče i to dovodi do usporavanja strujanja. Istraživanja su pokazala da ukoliko nema odvajanja strujanja, koeficijent otpora trenja broda je proporcionalan koeficijentu otpora trenja ravne ploče C_{F0}:

$$C_F = k_F C_{F0} \tag{18}$$

gdje je k_F faktor koji uzima u obzir uzdužnu i poprečnu zakrivljenost trupa broda.

2.1.2. Viskozni otpor tlaka

Viskozni otpor tlaka nastaje kao posljedica postojanja graničnog sloja. Ovisan je o Reynoldsovom broju i formi trupa. Viskozni otpor tlaka predstavlja integral normalnih naprezanja, nastalih uslijed viskoznosti i turbulencije u graničnom sloju, po oplakanoj površini

trupa broda. Vrijednosti viskoznog otpora tlaka se znatno razlikuju ovisno o tome promatra li se laminarni i mješoviti granični sloj ili turbulentni granični sloj. Ukoliko ne dolazi do odvajanja strujanja u graničnom sloju, koeficijent viskoznog otpora tlaka proporcionalan je koeficijentu otpora trenja ekvivalentne ravne ploče C_{F0}, kako slijedi:

$$C_{PV} = k_{PV} C_{F0} \tag{19}$$

Budući da viskozni otpor u sebi sadržava otpor trenja i viskozni otpor tlaka, prema izrazu (13), koeficijent viskoznog otpora moguće je napisati na sljedeći način:

$$C_V = C_F + C_{VP} = \left(k_F + k_{PV}\right) C_{F0} = \left(1 + k\right) C_{F0} \tag{20}$$

gdje je k_{PV} koeficijent proporcionalnosti viskoznog otpora tlaka, a *k* faktor forme i prikazuje povećanje otpora uslijed zakrivljenosti trupa broda. Ovisi o geometrijskim značajkama forme.

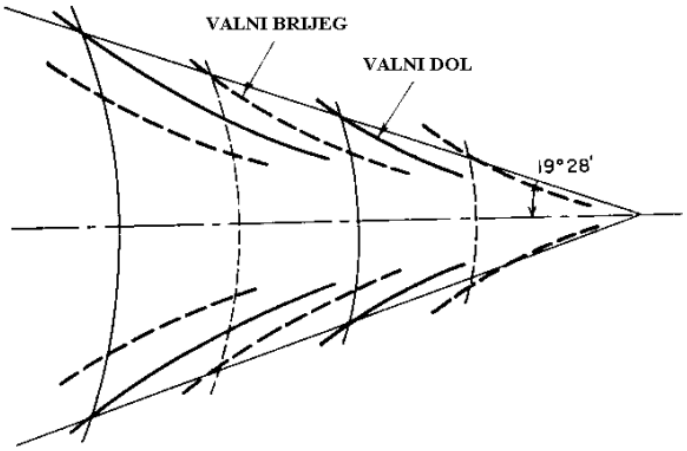
2.1.3. Otpor valova

Brod koji plovi na površini vode ima iste komponente otpora kao tijelo koje plovi duboko ispod površine, ali uslijed postojanja slobodne površine javlja se dodatna komponenta otpora koja se naziva otpor valova. Osnovna razlika plovidbe na slobodnoj površini i plovidbe duboko ispod nje je u raspodjeli tlakova po oplakanoj površini broda. Na pramcu se javlja pramčani val koji povisuje tlak u usporedbi s uronjenim tijelom, a na krmenom dijelu broda tlak je niži nego kod uronjenog tijela.

Do prvih spoznaju o sustavu valova koji nastaju pri plovidbi broda došao je Lord Kelvin sredinom 20. stoljeća. Promatrao je jednu točku koja se gibala pravocrtno na površini vode te se iza nje formirao sustav poprečnih i razilaznih valova. Uočio je da se valovi uvijek šire pod istim kutom u odnosu na simetralu broda. Vrijednost tog kuta iznosi 19° 28' kao što je i prikazano na slici 2. Takav sustav valova formira se na pramcu, pramčanom i krmenom ramenu, kao i na krmi broda. Krmeni sustav valova je često nejasan budući da na njega utječu valovi pramca i valovi pramčanog i krmenog ramena.

Otpor valova se dijeli na otpor slike vala i na otpor lomljenja vala. Otpor lomljenja vala se javlja kod formi koje imaju omjer duljine i širine manji od 6 te kod formi s tupim pramcem. Tupi pramac uzrokuje porast tlaka na pramcu te stvaranje pramčanog vala. Lom tog vala stvara vrtloge koji se slijevaju duž brodskog trupa. Gubitak energije pri lomljenju vala ovisi o Reynoldsovom broju, dok stvaranje pramčanog vala ovisi o Froudeovom broju, [13].

Otpor slike valova moguće je odrediti mjerenjem reljefa slobodne površine iza modela broda u bazenu, [15].



Slika 2. Prikaz sustava valova i Kelvinov kut [13]

2.1.4. Dodatni otpor

Dodatni otpor broda određuje se izrazom:

$$R_A = C_A \frac{1}{2} \rho v^2 S \tag{21}$$

gdje C_A predstavlja koeficijent dodatnog otpora. Prema tome, ukupni otpor broda glasi:

$$R_T = \left[C_F \left(Rn \right) + C_{PV} \left(Rn \right) + C_W \left(Fn \right) + C_A \right] \frac{1}{2} \rho v^2 S \tag{22}$$

Važno je napomenuti da je dodatni otpor uglavnom viskozni, ali može biti i posljedica valova. U dodatne komponente otpora ubraja se [1]:

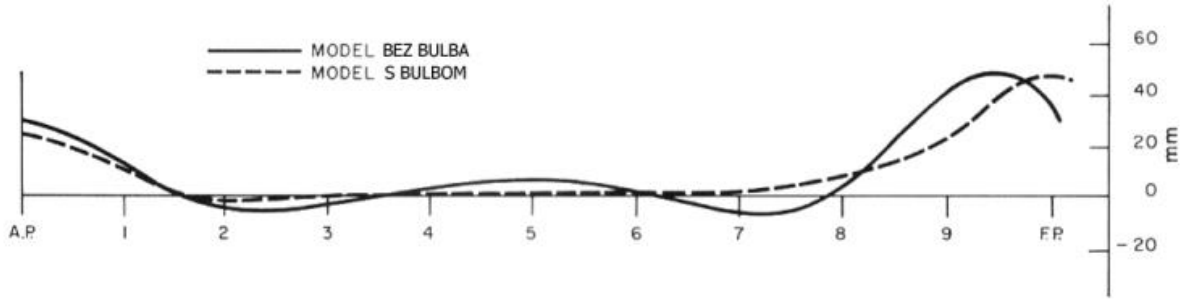
- otpor zraka i vjetra - R_{AA} (otpor nadvodnog dijela trupa uslijed gibanja broda kroz zrak i vjetar),
- otpor privjesaka - R_{AP} (otpor ljuljnih kobilica, skrokova, osovina, otvora za poprečne propulzore, itd.),
- otpor hrapavosti oplate - R_{AR} (otpor uslijed hrapavosti izazvane korozijom ili obraštanjem trupa),
- otpor kormilarenja - R_{AS} (nastaje zbog upotrebe kormila za korekciju putanje broda i održavanje kursa).

Ako na modelu nema privjesaka onda je riječ o otporu golog trupa. Uzrok povećanja otpora može biti i okolina, preciznije plovidba u ograničenom prostoru (plovidba u kanalu) ili plovidba u plitkoj vodi.

2.1.5. Utjecaj pramčanog bulba na otpor broda

Osnovni cilj pramčanog bulba je smanjiti otpor valova. D.W. Taylor [13] je smatrao da se smanjenje R_W može postići uvođenjem dodatnog vala koji djeluje na poprečni valni sustav broda. Prvi brod s pramčanim bulbom bio je *USS Delaware* izgrađen 1907. godine.

1936. godine Wigley postavlja prvi matematički model koji opisuje utjecaj pramčanog bulba na otpor valova. Zaključio je da pri manjim brzinama plovidbe pramčani bulb uzrokuje porast ukupnog otpora zbog povećanja trenja i otpora vrtloženja čemu su uzrok površina i oblik bulba. Unatoč tome pri višim brzinama smanjenje otpora valova uslijed interferencije valova je veće nego porast otpora zbog trenja i vrtloženja. Prema tome pri višim brzinama plovidbe ugradnja pramčanog bulba rezultira manjim ukupnim otporom.



Slika 3. Valni profil forme bez bulba i forme s bulbom [13]

Na slici 3. prikazan je profil poprečnog vala između pramčane i krmene okomice za formu bez bulba i formu s bulbom. Na slici je vidljivo da su u području pramčane okomice forme s bulbom niži brijegovi poprečnih valova.

Daljnjim istraživanjima Wigley donosi sljedeće teorijske zaključke:

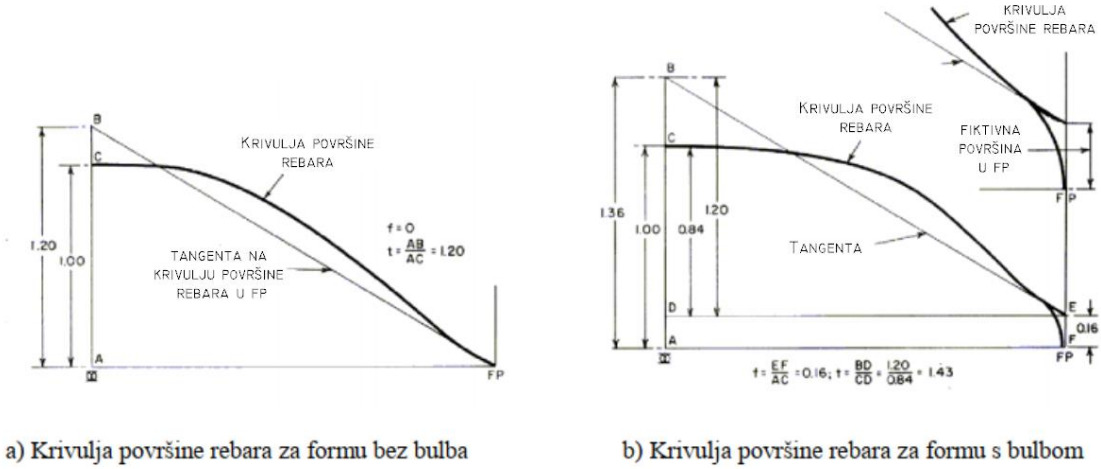
- najbolje brzine za ugradnju pramčanog bulba odgovaraju vrijednostima *Fn* od 0,24 do 0,57,
- ukoliko linije pramčanog bulba nisu previše konkavne, težište bi se trebalo nalaziti na pramčanoj okomici,
- pramčani bulb treba biti što je moguće kraći i što je moguće širi,
- pramčani bulb ne smije biti preblizu slobodne površine.

Pri projektiranju pramčanog bulba potrebno je definirati njegove glavne parametre, a to su:

- *f* – omjer površine bulba na pramčanoj okomici i površine glavnog rebra,
- *t* – završni omjer (eng. *terminal ratio*).

Na slici 4. prikazani su parametri pramčanog bulba. Parametar *f*, odnosno omjer površine je omjer vrijednosti ordinate na glavnom rebru i na pramčanoj okomici. Na slici 4.a) parametar *f*

iznosi 0 budući da je riječ o formi bez pramčanog bulba, a slici 4.b) iznosi 0,16 i za takvu formu se kaže da ima 16 % bulb. Parametar *t* se definira kao omjer vrijednosti ordinate tangente na krivulju površine rebara u točki pramčane okomice i ordinate koja određuje površinu glavnog rebra.



a) Krivulja površine rebara za formu bez bulba

b) Krivulja površine rebara za formu s bulbom

Slika 4. Definicija parametara *f* i *t* [13]

Rezultati mnogih istraživanja potvrdili su Wigleyeve teorijske zaključke. Pokazano je da se primjenom pramčanog bulba na konvencionalnim formama ukupni otpor može smanjiti za 10 do 15%, dok se iskoristivost propulzije može povećati za 3 do 5%, što konačno može dovesti do 20% manje potrebne snage na brodskom vijku, [13].

3. RAČUNALNA DINAMIKA FLUIDA

Mehanika fluida je teorijsko eksperimentalna znanost. Teorijski pristup se temelji na analitičkom rješavanju matematičkih problema mehanike fluida. Analitičkim rješenjem može se dobiti kompletan uvid u fiziku problema. Također je moguće odrediti utjecaj pojedinih parametara na rješenje. Međutim, većina problema vezana uz strujanje fluida je opisana nelinearnim parcijalnim diferencijalnim jednadžbama, koje nemaju opće analitičko rješenje. Štoviše, ukoliko je riječ o turbulentnom strujanju ono se ni ne može opisati analitički, zbog svoje stohastičke prirode. Eksperimentalnim metodama moguće je riješiti probleme turbulentnog strujanja, no glavni nedostatak eksperimentalnih metoda je ograničeni broj informacija o promatranoj pojavi. Iz rezultata jednog mjerenja nije moguće donijeti zaključak o utjecaju pojedinog parametra na rješenje, kao što je moguće iz analitičkog rješenja. Provođenjem eksperimenta za različite kombinacije parametara moguće je donijeti zaključak o utjecaju tih parametara. Treća grana mehanike fluida je računalna dinamika fluida, ona se počela razvijati s razvojem računala budući da su se time stvorili uvjeti za numeričko rješavanje matematičkih modela. Računalna dinamika fluida se temelji na teorijskom pristupu, ali također ima sličnosti s eksperimentalnim pristupom. Iz jednog numeričkog rezultata nije moguće zaključiti o utjecaju pojedinih parametara na rješenje, ali prednost ove metode nad eksperimentalnim metodama je ušteda vremena. Kao rezultat se dobiva potpuna slika strujanja te je moguće simulirati uvjete koje nije moguće ostvariti u eksperimentu. Nedostatak je to što za svaki problem mora postajati dobar i pouzdan matematički model te je za postavljanje simulacije je potrebno iskustvo, [16].

3.1. Proces numeričke simulacije

Numeričke simulacije se temelje na matematičkom modelu, koji predstavlja matematički zapis fizikalnog modela, a fizikalni model obuhvaća niz pretpostavki pri aproksimaciji pojave u stvarnom svijetu. Pretpostavke fizikalnog modela su dane u tablici 1. Glavna pretpostavka u opisu strujanja fluida je definicija fluida kao kontinuum. Kontinuum je zamišljena tvorevina koja u potpunosti ispunjava prostor i zadržava sva svojstva u slučaju infinitezimalno malog volumena. To je idealizacija koja ne odgovara stvarnosti, jer se smanjivanjem volumena na veličinu međumolekularnog prostora dolazi do toga da se u tako malom volumenu ne mogu definirati fizikalna svojstva poput gustoće, viskoznosti itd. No, ukoliko je riječ o problemu strujanja, gdje je promatrano područje dovoljno veliko u odnosu na međumolekularni razmak, hipoteza kontinuuma je dovoljno točna. Uz kontinuum, potrebno je uvesti još pretpostavki

poput homogenosti i izotropnosti fluida. Homogenost znači da su fizikalna svojstva jednaka u svim točkama fluida, a izotropnost da su jednaka u svim smjerovima. Homogena smjesa plinova se tretira kao jednokomponentan fluid, no ako je koncentracija nekog plina različita u različitim točkama, promatra se kao višekomponentan fluid. Ako je problem takav da se može zanemariti promjena fizikalnih veličina u nekom smjeru, 3D problem se svodi na 2D ili 1D problem. Iako je strujanje u stvarnosti nestacionarno, povremeno je u fizikalnom modelu moguće pretpostaviti stacionarno strujanje. Strujanje u prirodi je uglavnom turbulentno, a laminarno strujanje se pojavljuje samo pri niskim Reynoldsovim brojevima. Postoje različiti pristupi modeliranju turbulencije, a u ovom radu korištena su tri modela turbulencije o kojima će biti više govora u idućim poglavljima.

Tablica 1. Fizikalni model

Fizikalni model	
• Kontinuum	• 1D/2D/3D
• Homogenost, izotropnost	• Stacionarno/Nestacionarno
• Jednokomponentan/Višekomponentan	• Neviskozno/Laminarno/ Turbulentno
• Jednofazan/Višefazan	

Nakon definiranja matematičkog modela potrebno ga je riješiti i to se odvija u tri koraka. Prvi korak je diskretizacija područja proračuna (tzv. proračunske domene), što znači podijeliti područje na određeni broj manjih volumena. Svakom volumenu dodjeljuje se jedan ili više čvorova u kojima se računa vrijednost polja fizikalnih veličina iz jednadžbi matematičkog modela. Rezultat diskretizacije prostora naziva se geometrijska mreža. Drugi korak je diskretizacija jednadžbi uzimajući u obzir rubne uvjete. Diskretizacija jednadžbi se provodi jednom od metoda diskretizacije, a neke od njih su metoda konačnih volumena, metoda konačnih elemenata, metoda konačnih razlika itd. U ovome radu korištena je metoda konačnih volumena. Posljednji korak je rješavanje sustava diskretiziranih jednadžbi. Sustav se rješava iterativnim postupkom koji u sebi sadrži rješavanje sustava linearnih algebarskih jednadžbi.

Dobiveno numeričko rješenje je potrebno analizirati. Analiza rješenja podrazumijeva prikaz skalarnih, vektorskih i tenzorskih polja, sile, momenata i sl. te konačno dijagramski prikaz željenih veličina.

Tablica 2. Proces numeričke simulacije [16]

Numerička simulacija		
1. Predprocesor	**2. Procesor**	**3. Postprocesor**
Definicija matematičkog modela	Numeričko rješavanje matematičkog modela: • Diskretizacija prostora • Diskretizacija jednadžbi • Rješavanje sustava diskretiziranih jednadžbi	Analiza rješenja

Promatrano organizacijski, proces numeričke simulacije se provodi kroz tri faze navedene u tablici 2.: predprocesor, procesor i postprocesor. Predprocesor je računalni program za generiranje geometrijski mreže. Pri generiranju geometrijski mreže važno je voditi računa o rubnim uvjetima. U području graničnog sloja koji nastaje pri opstrujavanju tijela, postoje veliki gradijenti fizikalnih veličina, a to zahtijeva popunjavanje tog područja manjim volumenima. Generiranje mreže u složenim trodimenzijskim problemima nije trivijalan posao i čini znatan dio ukupnog vremena potrebnog za provođenje simulacije. Procesor je program koji numerički rješava željeni matematički model sa zadanim početnim i rubnim uvjetima. U ovome radu korišten je programski paket STAR-CCM+, koji ima u sebi ugrađen matematički model gdje korisnik kroz sučelje definira pretpostavke modela. Postprocesor je program koji služi za vizualizaciju rezultata dobivenih numeričkom simulacijom, odnosno za izračunavanje pojedinih integralnih veličina. Postprocesor može biti integriran s procesorom ili biti program za sebe, [16].

3.2. Osnovni zakoni dinamike fluida

Osnovni zakoni dinamike fluida su: zakon očuvanja mase, zakon očuvanja količine gibanja, zakon očuvanja momenata količine gibanja, zakon očuvanja energije te zakon termodinamike.

Strujanja fluida se dijele na nestlačiva (uglavnom kapljevine) i stlačiva (strujanja plinova velikom brzinom).

Zakon očuvanja mase govori da je brzina promjene mase materijalnog volumena jednaka nuli. Jednadžba zakona očuvanja mase glasi [17]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho v_j\right) = 0 \tag{23}$$

gdje je ρ gustoća fluida, a v_j vektor brzine.

Zakon očuvanja količine gibanja glasi da je brzina promjene količine gibanja materijalnog volumena jednaka sumi vanjskih masenih i površinskih sila, koje djeluju na materijalni volumen. Jednadžba zakona očuvanja količine gibanja je [17]:

$$\rho \frac{\mathrm{D}v_i}{\mathrm{D}t} = \rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \rho v_j \frac{\partial v_j}{\partial x_j} = \rho f_i + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \tag{24}$$

gdje je D/D*t* materijalna derivacija, v_i je vektor brzine, f_i predstavlja gustoću masene sile te σ_{ij} tenzor naprezanja.

Jednadžbe (23) i (24) tvore sustav koji nije zatvoren, jer je broj nepoznanica (9) veći od broja raspoloživih jednadžbi (4). Poznate veličine su gustoća u jednadžbi očuvanja mase i gustoća masene sile u jednadžbi očuvanja količine gibanja. Prema tome, nepoznanice su polje brzina iz jednadžbe očuvanja mase te polje brzine i tenzor naprezanja iz jednadžbe očuvanja količine gibanja. Budući da je više nepoznanica nego poznatih veličina potrebno je uvesti dopunske (konstitutivne) jednadžbe. Promatrani fluid je newtonski, dakle tenzor viskoznog naprezanja i tenzor brzine promjene deformacije su linearno povezani. Prema tome konstitutivne jednadžbe su [17]:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \Sigma_{ij} \tag{25}$$

$$p = -\frac{1}{3}\sigma_{kk} \tag{26}$$

$$\Sigma_{ij} = 2\mu D_{ij} - \frac{2}{3}\mu D_{kk}\delta_{ij} \tag{27}$$

$$D_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right) \tag{28}$$

Konstitutivne jednadžbe uspostavljaju vezu između kinematike i dinamike fluida, odnosno tenzora brzine deformacije i tenzora naprezanja. δ_{ij} je Kroneckerov simbol (za $i = j$ iznosi 1, a

za $i \neq j$ iznosi 0), p je tlak, Σ_{ij} je devijatorski dio tenzora naprezanja, a D_{ij} je tenzor brzine deformacije.

Rezultat uvrštavanja konstitutivnih jednadžbi u (24) su Navier-Stokesove jednadžbe za nestlačivi, newtonski fluid:

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \rho v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \rho f_i - \frac{\partial}{\partial x_i}\left(p + \frac{2}{3}\mu D_{kk} \right) + 2\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu D_{ij} \right) \tag{29}$$

Za problem strujanja fluida oko trupa broda može se pretpostaviti da je riječ o viskoznom, izotermičkom i nestlačivom strujanju newtonovskog fluida te se može pretpostaviti da je μ konstantan. U tom slučaju jednadžba (29) prelazi u sljedeći oblik [17]:

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} + \upsilon \nabla^2 v_i \tag{30}$$

gdje je υ kinematički koeficijent viskoznosti.

3.3. Turbulentno strujanje

Većina strujanja fluida u prirodi su turbulentna strujanja. Turbulentno strujanje se pojavljuje pri visokim vrijednostima Reynoldsovog broja. Glavne karakteristike turbulentnog strujanja su [18]:

- nestacionarnost,
- trodimenzijsko strujanje,
- visoka vrtložnost,
- turbulencija povećava brzinu miješanja veličina,
- uslijed miješanja veličina dolazi do pretvaranja kinetičke energije fluida (što uzrokuje smanjenje brzine) u unutarnju energiju fluida – disipacijski proces,
- „nasumičnost“ turbulentnog strujanja čini analizu strujanja složenom,
- fluktuacije u velikom rasponu veličina te su stoga direktne metode rješavanja vrlo zahtjevne.

3.3.1. Modeliranje turbulencije

Cilj modeliranja turbulencije je dobiti rješenje Navier-Stokesovih jednadžbi. Najpreciznije rješenje Navier-Stokesovih jednadžbi dobiva se metodom direktnog numeričkog rješavanja (eng. *Direct Numerial Simulation, DNS*). Problem te metode je što je za točno rješenje potrebno koristiti tako finu geometrijsku mrežu i tako sitan vremenski korak integracije da se obuhvate najviše frekvencije. Takav pristup je moguće koristiti samo za probleme strujanja pri niskom

Reynoldsovom broju, odnosno za laminarno strujanje, no takvi probleme nisu realni. Za sve ostale probleme ova metoda je previše zahtjevna sa stajališta računalnog kapaciteta i brzine računanja. Također, rezultat direktnog rješavanja Navier-Stokesovih jednadžbi je skup numeričkih vrijednosti u velikom broj prostornih točaka za veliki broj vremenskih trenutaka. Inženjerima takvi podaci nisu potrebni, važnije su integralne veličine poput protoka, ukupne sile tlaka, ukupne viskozne sile na neku površinu itd. Inženjerima nisu zanimljive pojedine trenutne vrijednosti, nego prosječne vrijednosti i moguća odstupanja od njih, dakle rezultati uprosječeni po vremenu. Prema tome, Navie-Stokesove jednadžbe je potrebno osrednjiti, odnosno osrednjiti sve fizikalne veličine u njima. Takvim pristupom se značajno olakšava numeričko rješavanje tih jednadžbi, [16].

Međutim, to ne znači da DNS nije u upotrebi. Direktno numeričko rješavanje se koristi u znanstvene svrhe kao alat za produbljivanje znanja o turbulenciji, a s daljnjim razvojem računala sve će više napredovati.

3.3.1.1. Reynoldsove osrednjene Navier-Stokesove jednadžbe

Ako se pretpostavi statistički stacionarno strujanje svaka varijabla može biti zapisana kao suma vremenski osrednjene vrijednosti i fluktuacija oko te vrijednosti, prema sljedećem obliku [16]:

$$f\left(x,t\right)=\overline{f}\left(x_i\right)+f'\left(x_i,t\right) \tag{31}$$

gdje je

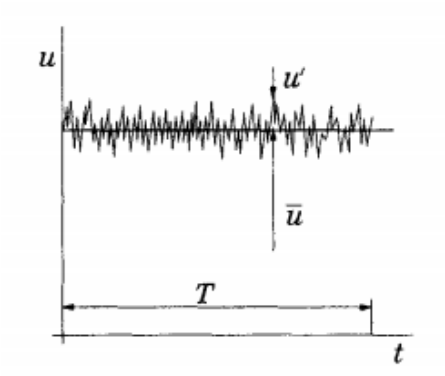
$$\overline{f}\left(x_i\right)=\lim_{T\to\infty}\int_0^T f\left(x_i,t\right)\mathrm{d}t \tag{32}$$

gdje je T period osrednjenja, a t vrijeme. Period osrednjenja mora biti dovoljno velik u usporedbi s tipičnim vremenskim fluktuacijama, prema tome postavlja se da $T\to\infty$. Ako je period osrednjenja dovoljno velik, vremenski osrednja vrijednost $\overline{f}$ ne ovisi o trenutku u kojem je započeto osrednjavanje. Na slici 5. prikazano je vremensko osrednjavanje fizikalne veličine u.

Za dobro odabran T vrijedi sljedeće:

$$\overline{f}'=0 \tag{33}$$

što znači da je vremenski osrednjena vrijednost fluktuacije bilo koje fizikalne veličine jednaka nuli.



Slika 5. Vremensko osrednjavanje strujanja [18]

Ako su *f* i *g* dvije veličine u kvazistacionarnom turbulentnom strujanju pri čemu je:

$$f = \overline{f} + f' \tag{34}$$

$$g = \overline{g} + g' \tag{35}$$

vrijedi sljedeće:

$$\overline{f \cdot g} = \left(\overline{f} + f'\right) \cdot \left(\overline{g} + g'\right) = \overline{f} \cdot \overline{g} + \overline{f' \cdot g'} \tag{36}$$

Vidljivo je da prosječna vrijednost umnoška dvaju fluktuirajućih dijelova fizikalnih veličina nije jednaka nuli. Na temelju toga se govori o korelaciji dviju veličina izraženom koeficijentom korelacije:

$$R = \frac{\overline{f' \cdot g'}}{\sqrt{\overline{f \cdot f'}} \cdot \sqrt{\overline{g \cdot g'}}} \tag{37}$$

Vrijednost koeficijenta *R* je u granicama od nula do jedan. Ukoliko je vrijednost nula, fluktuacije veličina su potpuno nezavisne, a vrijednost jedan ukazuje na to da postoji jednoznačna veza. Nezavisnost veličina je rijedak slučaj, pogotovo u turbulentnom strujanju, iz toga razloga u jednadžbama očuvanja gibanja postoji član $\rho\overline{v_i' v_j'}$. Taj član se naziva Reynoldsovo turbulentno naprezanje.

U ovome radu je simulirano nestlačivo turbulentno strujanje fluida konstantne gustoće u kojem se zanemaruje utjecaj masenih sila. Takvo strujanje je opisano jednadžbama (23) i (30), u kojima su nepoznate veličine polje brzine v_i i polje tlaka *p*. Te veličine se prikazuju kao zbroj osrednjene vrijednosti i fluktuirajuće vrijednosti:

$$v_i = \overline{v}_i + v_i' \tag{38}$$

$$p = \overline{p} + p' \tag{39}$$

gdje su $\overline{v}_i$ i $\overline{p}$ osrednjene vrijednosti brzine i tlaka, a v_i' i p' fluktuirajuće vrijednosti brzine i tlaka.

Uvrštavanjem jednadžbe (38) u jednadžbu kontinuiteta za nestlačivo strujanje dobije se:

$$\frac{\partial\left(\overline{v}_j + v_j'\right)}{\partial x_j} = 0 \tag{40}$$

Osrednjavanjem jednadžbe (40) dobiva se jednadžba kontinuiteta za osrednjeno strujanje, koja glasi:

$$\frac{\partial \overline{v}_j}{\partial x_j} = 0 \tag{41}$$

Oduzimanjem jednadžbe (41) od jednadžbe (38) dobiva se jednadžba kontinuiteta za fluktuirajuće strujanje:

$$\frac{\partial v_j'}{\partial x_j} = 0 \tag{42}$$

Uvrštavanjem jednadžbi (38) i (39) u jednadžbu (30) te vremenskim osrednjavanjem dobije se Reynoldsova osrednjena Navier-Stokesova jednadžba koja glasi:

$$\rho\frac{\partial \overline{v}_i}{\partial t} + \rho\overline{v}_j\frac{\partial \overline{v}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu\frac{\partial \overline{v}_i}{\partial x_j} - \rho\overline{v_i' v_j'}\right) \tag{43}$$

Član $\rho\overline{v_i' v_j'}$ u jednadžbi (43) naziva se Reynoldsov tenzor naprezanja, koji je posljedica turbulentnog strujanja. Budući da je tenzor simetričan, uvodi šest novih nepoznanica i tako čini sustav nezatvorenim. Moguće je izvesti jednadžbu Reynoldsovih naprezanja, no to dovodi do novih nepoznanica. Stoga se taj član linearizira. Već je objašnjeno kako se Reynoldsovim osrednjavanjem pokušava stohastička priroda turbulentnog strujanja prikazati kroz vremenski osrednjena polja brzine i tlaka, a to je moguće samo ako je poznat beskonačan broj korelacija brzina i tlaka. No, prema iskustvu dovoljno je poznavati konačan broj korelacija kako bi se proračunale karakteristike polja strujanja interesantna s inženjerskog stajališta. Iz temelja te činjenice proizlaze modeli turbulencije, čiji je zadatak uskladiti broj jednadžbi i broj nepoznatih polja, [16].

3.3.1.2. Model turbulencije

Svaki model turbulencije mora zadovoljiti neke opće zahtjeve, a to su: univerzalnost, točnost, mogućnost ekonomičnog rješavanja i jednostavnost. Modeli turbulencije dijele se s obzirom na red korelacije brzina za koju se rješava transportna jednadžba. Tako modeli turbulencije mogu biti modeli prvog, drugog i trećeg reda. Najjednostavniji je model prvog reda, u njemu se modelira dvojna korelacija brzina odnosno tenzor Reynoldsovih naprezanja prema Boussinesquovoj hipotezi [16]:

$$-\rho\overline{v_i'v_j'} = \mu_t\left(\frac{\partial\overline{v}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial\overline{v}_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\rho\overline{k}\,\delta_{ij} \qquad \textbf{(44)}$$

gdje je μ_t koeficijent turbulentne viskoznosti, koji nije fizikalno svojstvo fluida već funkcija uvjeta strujanja (za slučaj laminarnog strujanja iznosi nula), a $\overline{k}$ je kinetička energija turbulencije prema izrazu:

$$\overline{k} = \frac{\overline{v_i'v_j'}}{2} \qquad \textbf{(45)}$$

Boussinesqovom hipotezom šest komponenti tenzora Reynoldsovih naprezanja modelirano je jednim nepoznatim poljem koeficijenta turbulentne viskoznosti. Uvrštavanjem Boussinesqove hipoteze u Reynoldsove osrednjene Navier-Stokesove jednadžbe, one prelaze u sljedeći oblik:

$$\frac{\partial\overline{v}_j}{\partial x_j} = 0 \qquad \textbf{(46)}$$

$$\frac{\partial\rho\overline{v}_i}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho\overline{v}_j\overline{v}_i\right) = -\frac{\partial\left(\overline{p}+\frac{2}{3}\rho\overline{k}\right)}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\mu_t\right)\left(\frac{\partial\overline{v}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial\overline{v}_j}{\partial x_i}\right)\right] \qquad \textbf{(47)}$$

U jednadžbi (47) prvi izraz s desne strane predstavlja efektivni tlak, a drugi efektivnu viskoznost. Prijelazom s Navier-Stokesovih jednadžbi na Reynoldsove osrednjene Navier-Stokes jednadžbe izgubile su se informacije o pulsirajućem strujanju (u jednadžbama (46) i (47) nema informacija u pulsirajućem strujanju), pa vremenski i prostorni koraci integracije ne moraju biti mali kao pri direktnom rješavanju Navier-Stokesovih jednadžbi, međutim javlja se problem modeliranja koeficijenta turbulentne viskoznosti.

U ovom radu su korištena tri modela turbulencije radi ispitivanja utjecaja modela na rezultat simulacije. Ti modeli su *k-ω* SST model turbulencije, *k-ε* realizible model turbulencije i

Reynolds Stress Model. *k-ω* SST i *k-ε* realizible modeli turbulencije su diferencijalni modeli s dvije jednadžbe.

Također je korišten model turbulencije Reynolds Stress Model (RSM) koji rješava sustav od šest jednadžbi, jer rješava tenzor Reynoldsovih naprezanja. Ključna razlika *k-ω* SST i *k-ε* realizible te RSM je ta što RSM ne modelira koeficijent turbulentne viskoznosti.

3.3.1.3. k-ε realizible model turbulencije

k-ε realizible model turbulencije je model s dvije jednadžbe. Jedna jednadžba dana je za kinetičku energiju turbulencije k, a druga za brzinu disipacije kinetičke energije turbulencije ε. Jednadžbe modela su [19]:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_V \rho k \mathrm{d}V + \int_A \rho k\left(u_i - u_{gi}\right)\,\mathrm{d}a_i = \int_A \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\,\mathrm{d}a_i + \int_V \left[f_c G_k + G_b - \rho\left(\left(\varepsilon - \varepsilon_0\right) + \Upsilon_M\right) + S_k \right]\mathrm{d}V \tag{48}$$

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_V \rho \varepsilon \mathrm{dV} + \int_A \rho \varepsilon\left(u_i - u_{gi}\right)\,\mathrm{d}a_i = \int_A \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\,\mathrm{d}a_i + \int_V \left[f_c C_{\varepsilon 1} S\varepsilon + \frac{\varepsilon}{k}\left(C_{\varepsilon 1} C_{\varepsilon 3} G_b\right) - \frac{\varepsilon}{k + \sqrt{\upsilon\varepsilon}} C_{\varepsilon 2}\rho\left(\varepsilon - \varepsilon_0\right) + S_\varepsilon \right]\mathrm{d}V \tag{49}$$

gdje je V volumen ćelije, u_i je vektor brzine, u_{gi} je vektor brzine mreže, a_i je vektor površine, σ_k je Schmidtov broj za kinematičku energiju turbulencije, σ_ε je Schmidtov broj za disipaciju kinetičke energije turbulencije, f_c je koeficijent korekcije zakrivljenosti, G_k je član produkcije turbulencije, G_{nl} je nelinearni član produkcije, G_b je član produkcije uslijed uzgona, ε_0 je brzina disipacije kinetičke energije turbulencije u okruženju, Υ_M je modifikacija modela turbulencije za stlačivost, S_k je izvorski član specifične kinetičke energije turbulencije, S_ε je izvorski član brzine disipacije kinetičke energije turbulencije, $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, $C_{\varepsilon 3}$ su koeficijenti modela, S je modul srednje brzine naprezanja i υ je koeficijent kinematičke viskoznosti. Turbulentna viskoznost dana je izrazom:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{50}$$

gdje je C_μ kritični koeficijent modela turbulencije i on je funkcija srednjeg protoka [19].

3.3.1.4. k-ω SST model turbulencije

k-ω SST model turbulencije je model s dvije jednadžbe. Rješava jednadžbu za kinetičku energiju turbulencije *k* i specifičnu brzinu disipacije ω kinetičke energije, jednadžbe modela su sljedeće [19]:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_V \rho k \,\mathrm{d}V + \int_A \rho k\left(u_i - u_{gi}\right)\mathrm{d}a_i = \int_A \left(\mu + \sigma_k \mu_t\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\mathrm{d}a_i + \int_V \left[\gamma_{eff} G_k - \gamma' \rho \beta^* f_{\beta^*}\left(\omega k - \omega_0 k_0\right) + S_k\right]\mathrm{d}V \tag{51}$$

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_V \rho \omega \,\mathrm{d}V + \int_A \rho \omega\left(u_i - u_{gi}\right)\mathrm{d}a_i = \int_A \left(\mu + \sigma_\omega \mu_t\right)\frac{\partial \omega}{\partial x_i}\mathrm{d}a_i + \int_V \left[G_\omega - \rho\beta\left(\omega^2 - \omega_0{}^2\right) + D_\omega + S_\omega\right]\mathrm{d}V \tag{52}$$

gdje je S_ω izvorski član specifične brzine disipacije, k_0 je specifična kinetička energija turbulencije u okruženju, ω_0 je specifična brzina disipacije kinetičke energije u okruženju, γ_{eff} je koeficijent modela turbulencije, σ_ω je Schmidtov broj turbulencije za brzinu disipacije kinetičke energije, G_k i G_ω su članovi produkcije turbulencije, β i β^* su koeficijenti modela turbulencije, D_ω je član unakrsne difuzije te f_{β^*} je funkcija korištena za modifikaciju slobodnog smicanja i γ' je kao:

$$\gamma' = \min\left[\max\left(\gamma_{eff,}, 0.1\right), 1\right] \tag{53}$$

Turbulentna viskoznost je definirana izrazom:

$$\mu_t = \rho k T \tag{54}$$

gdje je *T* turbulentna vremenska skala [19].

3.3.1.5. Reynolds Stress Model (RSM)

Transportne jednadžbe za model Reynoldsovih naprezanja su sljedeće:

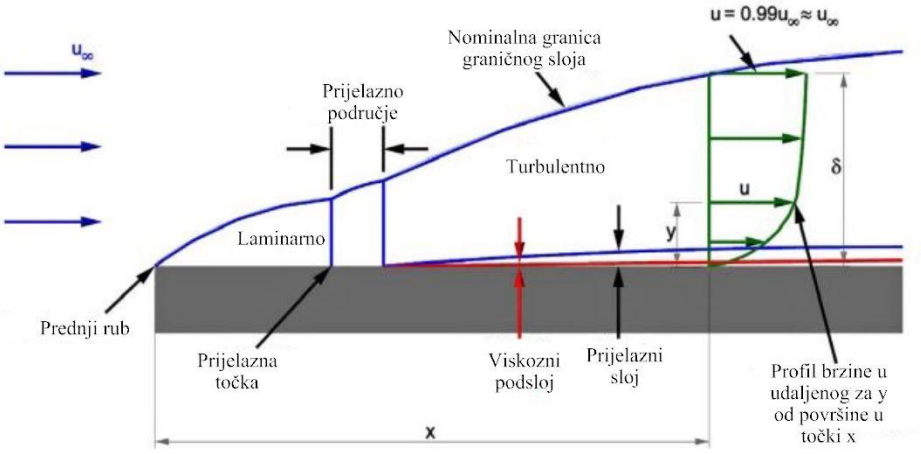
$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_V \rho\overline{u_i' u_j'}\mathrm{d}V + \int_A \rho\overline{u_i' u_j'}\left(u_i - u_{gi}\right)\mathrm{d}a_i = \int_V D_{ij}\mathrm{d}a_i + \int_V \left[P_{ij} + G_{ij} - \frac{2}{3}\rho I_{ij}\Upsilon_M + \underline{\varphi} + \underline{\varepsilon} + S_R\right]\mathrm{d}V \tag{55}$$

gdje je D_{ij} difuzija Reynoldsovih naprezanja, P_{ij} je član produkcije turbulencije, G_{ij} je član produkcije turbulencije uslijed uzgona, I_{ij} je matrica identiteta, Υ_M je modifikacija modela

turbulencije za stlačivost, $\underline{\varepsilon}$ je brzina disipacija kinetičke energije turbulencije i S_R je izvorski član turbulencije. Pretpostavka je da je disipacijski član izotropan [19].

3.4. Strujanje u blizini krute stijenke (zidne funkcije)

Uslijed strujanja fluida u blizini zidne granice stvara se turbulentni granični sloj, prikazan na slici 6. Na početku ploče strujanje je laminarno, a nakon prijelazne točke strujanje ulazi u prijelazno područje koje je kombinacija laminarnog i turbulentnog strujanja. Poslije prijelaznog područja strujanje prelazi u područje turbulentnog strujanja.



Slika 6. Granični sloj strujanja za ravnu ploču [23]

Bezdimenzijski profil brzine strujanja izražava se izrazom:

$$U^+ = f\left(y^+\right) \tag{56}$$

gdje je U^+ bezdimenzijska brzina u graničnom sloju, a y^+ bezdimenzijska udaljenost od stijenke kako slijedi:

$$U^+ = \frac{U}{U_\tau} \tag{57}$$

$$y^+ = \frac{yU_\tau}{\upsilon} \tag{58}$$

gdje je U srednja brzina strujanja, U_τ brzina trenja definirana izrazom $U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$, τ_w je tangencijalno naprezanje na stijenci, a y je udaljenost od stijenke. Na slici 7. je prikazana ovisnost U^+ o y^+, odnosno profil brzine strujanja u turbulentnom graničnom sloju.

U linearnom podsloju vrijedi:

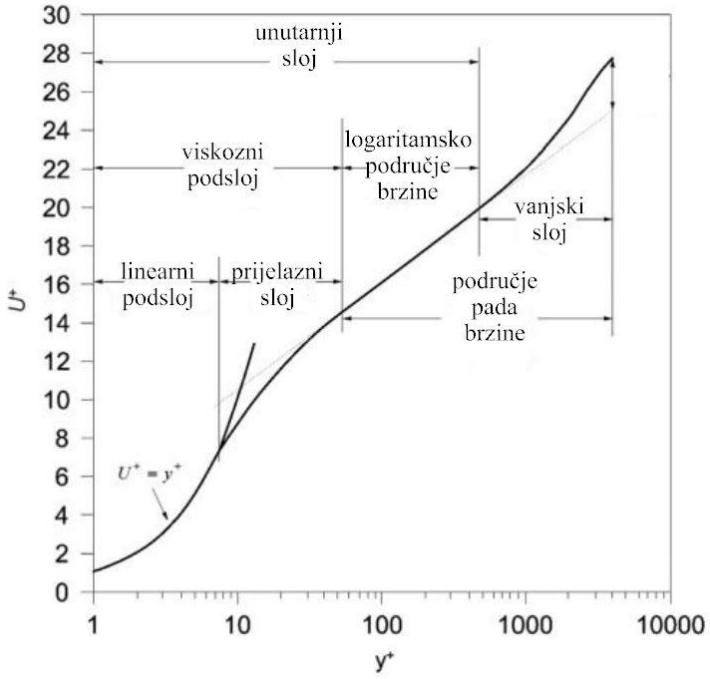
$$U^+ = y^+ \tag{59}$$

a u logaritamskom području brzine vrijedi:

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B \tag{60}$$

gdje je κ von Karmanova konstanta, a B je konstanta integracije.

Pri modeliranju graničnog sloja važno je vrijednost y^+ održavati u graničnom sloju kao $y^+ < 1$ ili $30 < y^+ < 300$ kako bi numeričko rješenje bilo što točnije. Svakako je potrebno izbjeći da vrijednost parametra y^+ bude u prijelaznom području, tj. između linearnog podsloja i logaritamskog područja brzine, jer je za taj slučaj U^+ teško opisati, [23].



Slika 7. Profil brzine strujanja u turbulentnom graničnom sloju [23]

3.5. Metoda udjela fluida u volumenu

Metoda udjela fluida u volumenu (eng. *Volume of Fluid, VOF*) je metoda za praćenje i određivanje položaja slobodne površine. Metoda udjela fluida u volumenu se temelji na činjenici da se dva ili više fluida (faza) međusobno ne miješaju. Svaka faza u ćeliji ima svoju varijablu α_i, čijom se vrijednošću definira udio te faze u ćeliji. Za simuliranje slobodne površine u pokusu otpora broda koriste se dvije faze: voda i zrak. Dakle, ako se varijablom α_i definira udio vode u ćeliji, moguća su tri stanja:

1. $\alpha_i = 0$, u ćeliji nema vode, odnosno 100% je ispunjena zrakom
2. $0 < \alpha_i < 1$, ćelija je na granici između faza vode i zraka
3. $\alpha_i = 1$, ćelija je 100% ispunjen vodom

Za slučaj $\alpha_i = 0,5$, ćelija se nalazi na slobodnoj površini.

Prema metodi udjela fluida u volumenu se računaju i fizikalna svojstva (gustoća, specifična toplina, dinamički koeficijent viskoznosti). Izrazi za gustoću i dinamički koeficijent viskoznosti glase:

$$\rho = \sum_i \rho_i \alpha_i \tag{61}$$

$$\mu = \sum_i \mu_i \alpha_i \tag{62}$$

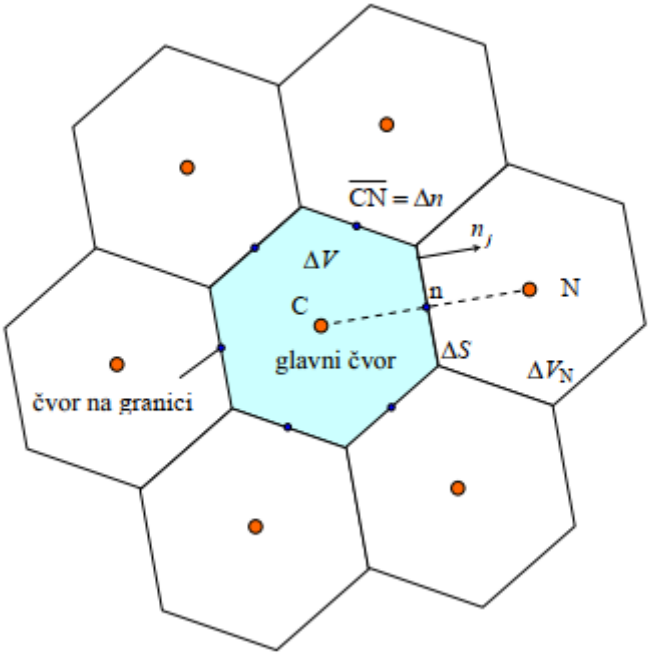
Analogno jednadžbama (61) i (62) se određuju i ostala fizikalna svojstva.

3.6. Metoda konačnih volumena

Metoda konačnih volumena je jedna od metoda diskretizacije parcijalnih diferencijalnih jednadžbi. Ona pretvara parcijalne diferencijalne jednadžbe u sustav algebarskih jednadžbi. Time se omogućava rješavanje Navier-Stokesovih jednadžbi numeričkim putem. Metoda konačnih volumena je integralna metoda koja se temelji na integriranju konzervativnog oblika transportnih jednadžbi. Integral transportne jednadžbe po konačnom volumenu prema slici 8. glasi [16]:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_{\Delta V} \rho\varphi \mathrm{d}V = -\int_{\Sigma\Delta S}\left(\rho v_j - \Gamma\frac{\partial\varphi}{\partial x_j}\right)n_j \mathrm{d}S + \int_{\Delta V} S_\varphi \mathrm{d}V \tag{63}$$

gdje prvi član predstavlja brzinu promjene razmatranog svojstva φ, drugi član je konvekcijski i difuzijski protok fizikalnog svojstva φ kroz granice te posljednji član predstavlja izvor φ. Prema konvenciji, protok je pozitivan za slučaj protoka od konačnog volumena prema okolini. Minus ispred integrala u jednadžbi (56) uzima u obzir da će se uslijed pozitivnog protoka sadržaj unutar volumena smanjivati.



Slika 8. Dio diskretiziranog područja [16]

3.7. Podrelaksacija

Kako bi se smanjila mogućnost pojave divergencije rješenja iterativnog postupka, koristi se postupak podrelaksacije. Postupkom podrelaksacije se od ukupnog rješenja jednadžbe u jednom koraku uzima samo dio promjene rješenja i tako se smanjuje promjena rješenja u iterativnom postupku. Na primjer, za rješenje u čvoru *C* vrijedi [19]:

$$\varphi_C^{podr} = \varphi_c^k + \alpha\left(\varphi_c^{k+1} - \varphi_c^k\right) \tag{64}$$

gdje je α faktor podrelaksacije i on je manji od 1. Ukoliko je α veći od 1, riječ je o nadrelaksaciji.

3.8. Verifikacija rezultata numeričke simulacije

Verifikacija rezultata numeričke simulacije je proces procjene nesigurnosti rezultata i provjera konvergencije rezultata iterativnog postupka rješavanja numeričke simulacije. Provjera nesigurnosti provodi se na temelju geometrijske mreže i vremenskog koraka. Za potrebe verifikacije mreže, numeričku simulaciju je potrebno provesti s grubom, srednjom i finom geometrijskom mrežom. Za potrebe verifikacije vremenskog koraka, provode se numeričke simulacije primjenom grubog, srednjeg i finog vremenskog koraka, [20].

3.8.1. Konvergencija rezultata iterativnog postupka

Razlika rezultata za različite gustoće mreže i vremenskog koraka iznose [20]:

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

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

gdje $\hat{S}_{i,1}$, $\hat{S}_{i,2}$, $\hat{S}_{i,3}$ označuju rješenja fine, srednje i grube mreže (i vremenskog koraka) u indeksnoj notaciji. Iz razlika rezultata numeričkih simulacija moguće je odrediti omjer konvergencije [20]:

$$R_i = \frac{\varepsilon_{i,21}}{\varepsilon_{i,32}} \tag{67}$$

Prema omjeru konvergencije vidljiv je tip konvergencije rezultata numeričke simulacije, [20]:

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

3.8.2. Procjena nesigurnosti numeričke simulacije

Ukupna nesigurnost numeričke simulacije se određuje prema izrazu [20]:

$$\bar{U}_{SN} = \sqrt{\bar{U}_T^2 + \bar{U}_G^2} \tag{68}$$

pri čemu je $\bar{U}_T$ nesigurnost vremenskog koraka, a $\bar{U}_G$ nesigurnost gustoće mreže. $\bar{U}_T$ i $\bar{U}_G$ se mogu odrediti prema [20] i izražavaju se kao postotak:

$$\bar{U}_i = \frac{U_i}{\hat{S}_{i,1}} \cdot 100 \tag{69}$$

Metoda određivanja U_i ovisi o tipu konvergencije numeričke simulacije. Za monotonu konvergenciju nesigurnost se procjenjuje uz pomoć Richardsonove ekstrapolacije, koja glasi:

$$U_i = F_s \delta_{RE_{i,1}}^{*(1)} \tag{70}$$

gdje je F_S faktor sigurnosti, koji iznosi $F_S = 1,25$. $\delta_{RE_{i,1}}^{*(1)}$ je greška i određuje se prema izrazu:

$$\delta_{RE_{i,1}}^{*(1)} = \frac{\varepsilon_{i,21}}{r_i^{p_i} - 1} \tag{71}$$

gdje je r_i omjer profinjenja, a p_i red točnosti, koji glasi:

$$p_i = \frac{\ln\left(\varepsilon_{i,32} / \varepsilon_{i,21}\right)}{\ln\left(r_i\right)} \tag{72}$$

U slučaju oscilatorne konvergencije, izraz za nesigurnost glasi:

$$U_i = \frac{1}{2}\left|S_U - S_L\right| \tag{73}$$

pri čemu S_U predstavlja najveću vrijednost rezultata numeričke simulacije, a S_L najmanju vrijednost rezultata numeričke simulacije.

Konačno, za slučaj divergencije nesigurnost se određuje prema:

$$U_i = F_S\left|S_U - S_L\right| \tag{74}$$

3.9. Validacija rezultata

Nakon provođenja numeričkih simulacija rezultate je potrebno validirati, odnosno usporediti s rezultatima dobivenim eksperimentalno. U ovome radu rezultati numeričkih simulacija se uspoređuju s rezultatima pokusa otpora provedenih u bazenu. Razlika između rezultata numeričke simulacije i eksperimenta se naziva relativna devijacija [21]:

$$RD = \frac{R_{T,RDF} - R_{T,EKSP}}{R_{T,EKSP}} \cdot 100\ \% \tag{75}$$

gdje je $R_{T,RDF}$ rezultat dobivenim numeričkim simulacijom, a $R_{T,EKSP}$ rezultat dobivenim eksperimentom.

4. NUMERIČKA SIMULACIJA POKUSA OTPORA

Numeričke simulacije pokusa otpora provedene su za model jahte, čije su značajke prikazane u tablici 3. Modelska ispitivanja pokusa otpora provedena su u *Schiffbautechnische Versuchsanstalt* u Beču. U ovom radu je napravljena usporedba rezultata numeričke simulacije s dobivenim eksperimentalnim rezultatima [24]. Budući da je cilj ispitivanja bio utjecaj pramčanog bulba na otpor broda, napravljena su tri modela. Prvi je model bez pramčanog bulba (koji će se nadalje u radu nazivati „Model 1“), drugi je s prvom varijantom pramčanog bulba (nadalje „Model 2“) i treći je s drugom varijantom pramčanog bulba (nadalje „Model 3“). Svi su modeli napravljeni u mjerilu $\lambda = 12$.

Tablica 3. Značajke modela ispitanih u bazenu i jahte u stvarnoj veličini [24]

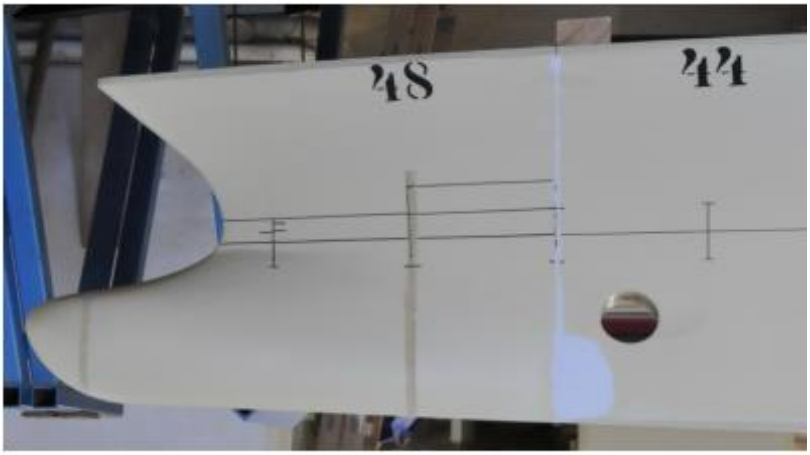
Značajka	Model 1		Model 2		Model 3	
	Jahta	Model	Jahta	Model	Jahta	Model
L_{PP}, m	62,88	5,24	63,60	5,30	63,60	5,30
B, m	11,50	0,96	11,50	0,96	11,50	0,96
T_M, m	3,98	0,332	3,95	0,329	3,98	0,332
T_F, m	3,98	0,332	3,95	0,329	3,98	0,332
T_A, m	3,98	0,332	3,95	0,329	3,98	0,332
L_{WL}, m	66,47	5,54	70,53	5,88	71.03	5.92
∇, m^3	1220	0,71	1220	0,71	1220	0,71
Δ, t	1252	0,71	1252	0,71	1252	0,71
S, m^2	837	5,81	874	6,07	837	5,81
C_B	0,4239	0,4239	0,4223	0,4223	0,4191	0,4191

U tablici 3., L_{PP} predstavlja duljinu između pramčane i krmene okomice broda, B je širina broda, T_M je gaz na glavnom rebru, T_F je gaz na pramcu broda, T_A je gaz na krmi broda, L_{WL} je duljina vodne linije, ∇ je volumen istisnine, Δ je masa istisnine, S je oplakana površina

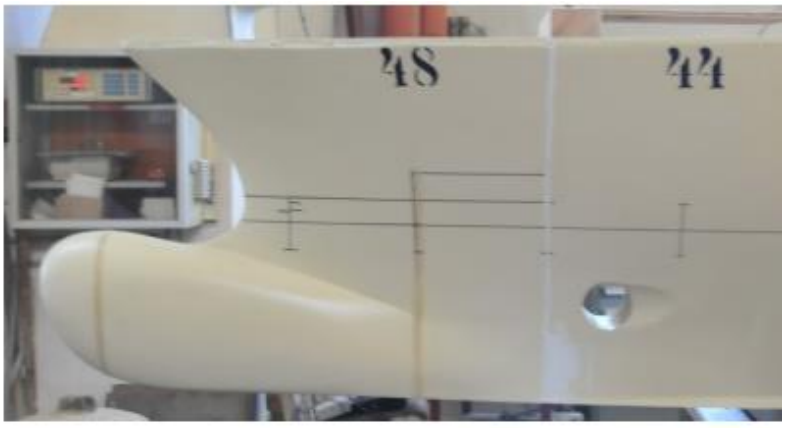
broda, a C_B je blok koeficijent broda. Na slikama 9.-11. prikazan je pramčani dio modela jahte s kojima su provedena modelska ispitivanja.



Slika 9. Model 1 [24]

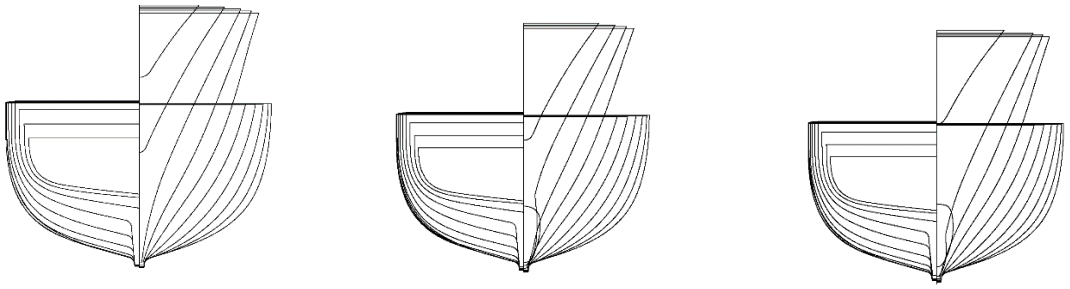


Slika 10. Model 2 [24]



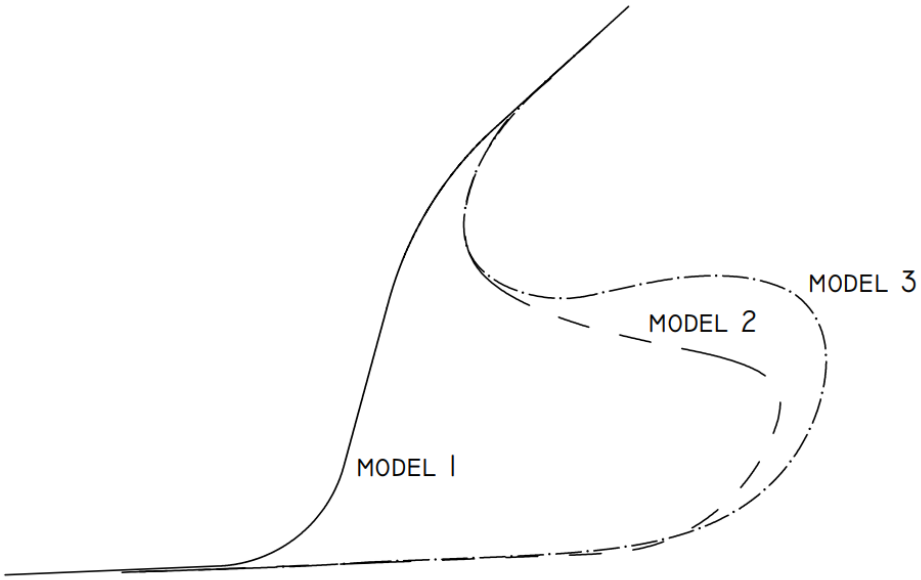
Slika 11. Model 3 [24]

Za provođenje numeričkih simulacija potrebno je generirati 3D model broda u nekom CAD programskom paketu. Modeli sve tri varijante trupa su generirani u programskom paketu „Rhinoceros“. Na slici 12. prikazani su nacrti rebara za tri ispitana modela jahte. Slika 13. prikazuje pramčanu konturu ispitanih modela.



a) Model 1 b) Model 2 c) Model 3

Slika 12. Nacrt rebara svih modela jahte [24]

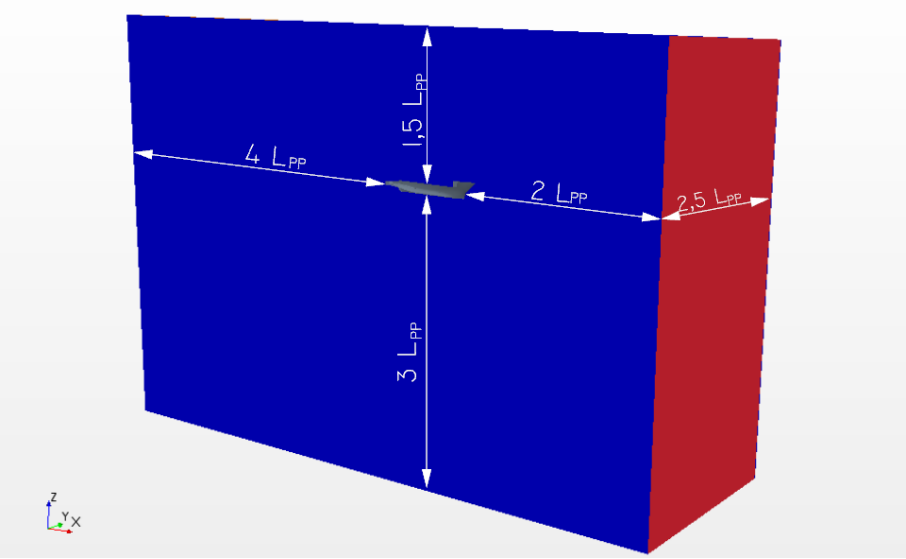


Slika 13. Pramčana kontura forme Modela 1, 2, 3 [24]

4.1. Definiranje proračunske domene

Prvi korak provođenja numeričke simulacije pokusa otpora je definiranje proračunske domene i unošenje CAD modela broda. Domena je zatvorena granicama i na svakoj granici se postavlja rubni uvjet. Granice je potrebno postaviti dovoljno daleko od broda kako bi se izbjegao njihov utjecaj na konačni rezultat numeričke simulacije. Udaljenosti granica domene od fizičke

granice broda postavljene su prema preporuci [25]: iza broda 4 L_{PP}, ispred broda 2 L_{PP}, ispod 3 L_{PP}, iznad 2 L_{PP} te bočno 2,5 L_{PP}. Na slici 14. prikazan je Model 1 te proračunska domena oko njega. Domena je identična za ostala dva modela.

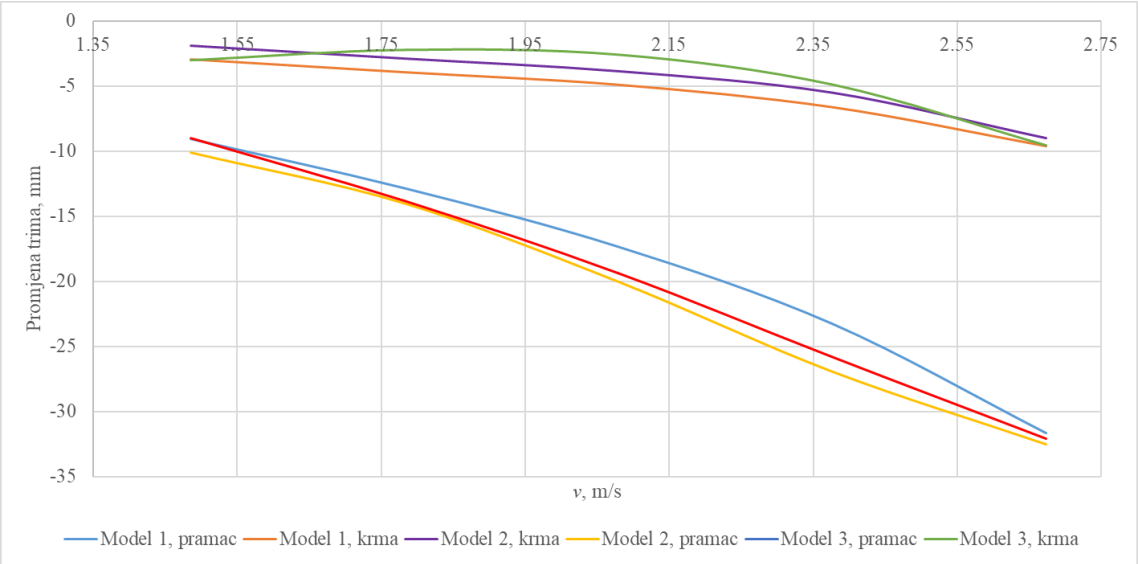


Slika 14. Udaljenosti granice proračunske domena od modela jahte

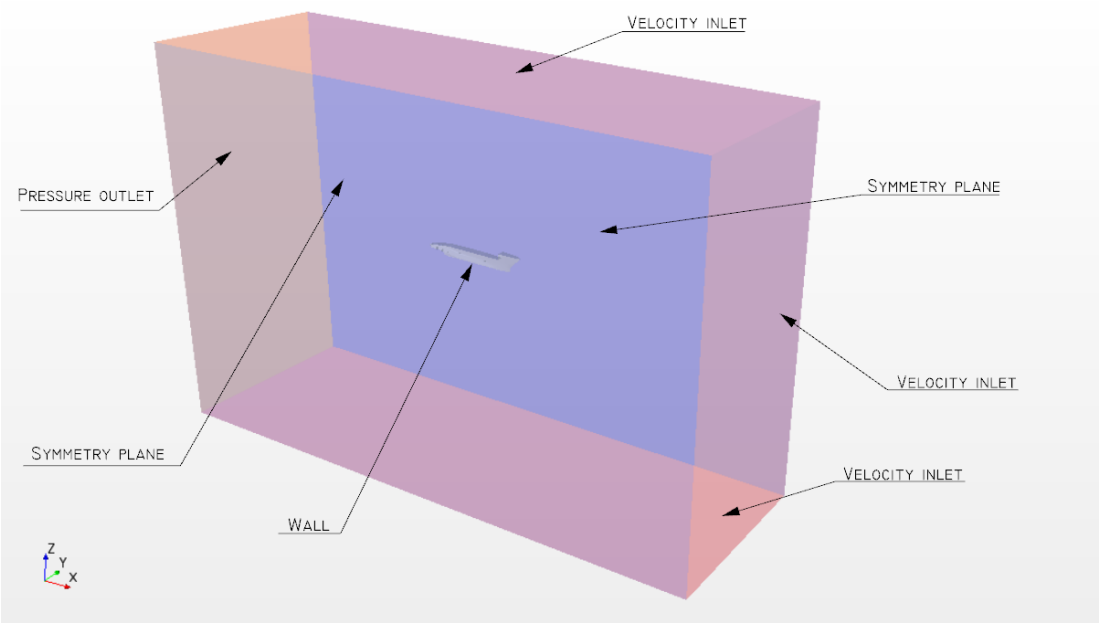
4.2. Definiranje rubnih uvjeta

Svakoj granici proračunske domene potrebno je dodijeliti rubni uvjet na sve granice domene. Općenito, rubni uvjet proračunske domene može biti ulazna granica, izlazna granica, ravnina simetrije i zidna granica. U ovome radu, numerička simulacija je postavljena tako da jahta miruje, a na nju nastrujava fluid konstantnom brzinom. Prema tome na fizičku granicu modela jahte postavljen je rubni uvjet zida (eng. *wall)*. Na dnu, vrhu i ulazu proračunske domene postavljen je Dirichletov rubni uvjet temeljen na brzini strujanja (eng. *velocity inlet*), a za izlaznu granicu odabran je von Neummanov rubni uvjet temeljen na tlaku (eng. *pressure outlet*). Na obje bočne stranice domene postavljen je rubni uvjet simetrije (eng. *symmetry plane*).

Numeričke simulacije pokusa otpora provedene su za fiksiran model jahte. Trim i gaz broda unaprijed su postavljeni na iznose dobivene modelskim ispitivanjima u bazenu, što je uobičajena praksa ukoliko nisu izmjerene masene karakteristike modela. Trim i gaz očitani su prema dijagramu sa slike 15. Važno je napomenuti kako negativan predznak označavan uron broda. Vidljivo je da svi modeli imaju pretegu. Prema tome trim modela je namješten tako da je prvo proveden paralelni uron, a zatim je brod rotiran oko točke na krmenoj okomici kako bi se postigao traženi trim. Na slici 16. su prikazani rubni uvjeti numeričke simulacije.



Slika 15. Promjena trima pri modelskim ispitivanjima[24]

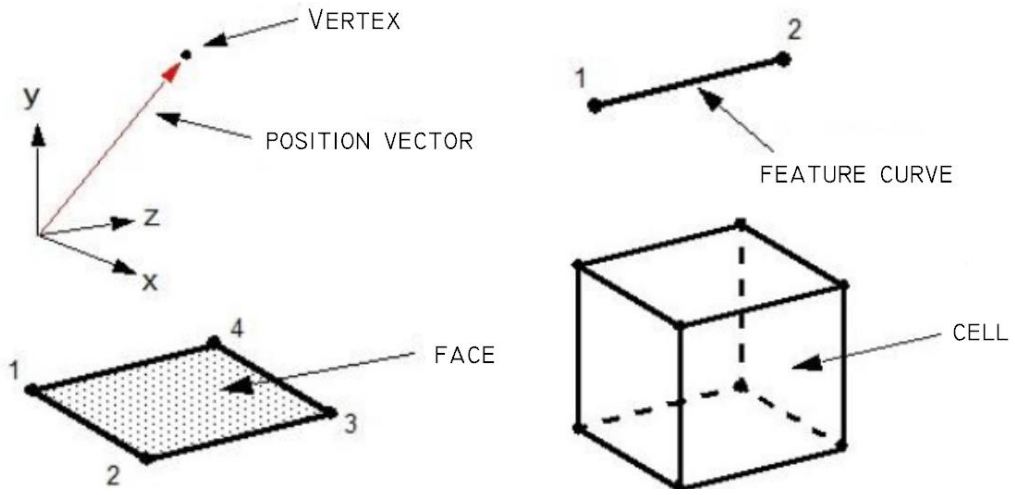


Slika 16. Rubni uvjeti proračunske domene [26]

4.3. Diskretizacija geometrijske mreže

Osnovni element diskretizirane geometrijske mreže računalne domene je ćelija (eng. *cell*). Svaka ćelija se sastoji od vrhova (eng. *vertex*), rubova (eng. *feature curve*) i stranica (eng. *face*). Vrh je neka točka u prostoru definirana svojim vektorom položaja. Dva vrha čine rub ćelije, a

stranica je površina omeđena rubovima i može imati proizvoljan broj vrhova. Konačno, ćelija je prostor u volumenu koji može imati bilo koji broj stranica, sve dok je taj broj dovoljan za zatvaranje volumena. Stranice moraju imati zajedničke rubove te se ne smiju preklapati. Najčešći oblik ćelije je heksaedar prikazan na slici 17. U ovome radu diskretizacija geometrijske mreže je napravljena prema [27]. U nastavku ovog poglavlja opisan je postupak diskretizacije.



Slika 17. Heksaedarska ćelija [26]

Prilikom diskretizacije domene važno je odabrati dobre alate diskretizacije, u ovome radu alati diskretizacije su odabrani prema [27] te su sljedeći:

- alat za rediskretizaciju površine (eng. *Surface Remesher*)
- alat za automatski popravak površine (eng. *Automatic Surface Repair*)
- alat za odsijecanje suvišnih površina (eng. *Trimmed Cell Mesher*)
- alat za diskretizaciju graničnog sloja (eng. *Prism Layer Mesher*)

Alat za rediskretizaciju površine poboljšava kvalitetu postojeće površine i priprema ju za volumensku diskretizaciju. Alat za automatski popravak površine se nadovezuje na alat za rediskretizaciju površine, što znači da popravlja nastale probleme na površini, koji nastaju prilikom rediskretizacije. Alat za odsijecanje suvišnih površina uklanja nepotrebne površine kako bi ugladio površine i stvorio dobru heksaedarsku mrežu poravnatu s odabranim koordinatnim sustavom. Alat za diskretizaciju graničnog sloja je nužan za generiranje prizmatičnih ćelija u blizini zidne granice kao i za poboljšavanje točnosti rješenja. Definiranje prizmatičnih ćelija u graničnom sloju je detaljnije objašnjeno kasnije u radu.

Nakon izbora alata diskretizacije potrebno je definirati ključne postavke diskretizacije. One su sljedeće: osnovna veličina volumena, automatsko popravljanje površine, maksimalna veličina volumena, broj volumena u prizmatičnom sloju, ukupna debljina prizmatičnog sloja, zakrivljenost površine, minimalna veličina površine, ciljana veličina površine i stopa rasta. Svi navedeni parametri definirani su u skladu s preporukama [26], [27]. Zbog potrebe verifikacije mreže generirane su tri geometrijske mreže za svaki model jahte. To su gruba, srednja i fina mreža. U tablici 4. su prikazani parametri diskretizacije za finu mrežu Modela 1.

Tablica 4. Postavke za finu mrežu modela Model 1

Svojstvo	Opcija	Vrijednost
Osnovna veličina	Vrijednost	0,05 m
Automatsko popravljanje površine	Minimalna neposredna blizina	0,001
Maksimalna veličina volumena	Postotak osnovne veličine	1600 %
Broj volumena u prizmatičnom sloju	Broj	7
Faktor rastezanja prizmatičnog sloja	Broj	1,13
Ukupna debljina prizmatičnog sloja	Vrijednost	0,01493 m
Zakrivljenost površine	Broj točaka po krugu	36
Minimalna veličina površine	Postotak osnovne veličine	6,25 %
Ciljana veličina površine	Postotak osnovne veličine	50 %
Stopa rasta	Zadana stopa rasta	Sporo
Stopa rasta	Stopa rasta granice	Sporo

Postavke diskretizacije su jednake za grubu, srednju i finu mrežu. Jedina razlika između tih mreža je u osnovnoj veličini, koja iznosi 0,1 m za grubu, 0,07 m za srednju te 0,05 m za finu mrežu. Važno je uzeti u obzir da omjer broja ćelija između grube i srednje te srednje i fine mreže bude približno jednak, prema izrazu [25]:

$$r_{21} \approx r_{32} \tag{76}$$

pri čemu je:

$$r_{21} = \sqrt[3]{\frac{N_1}{N_2}} \tag{77}$$

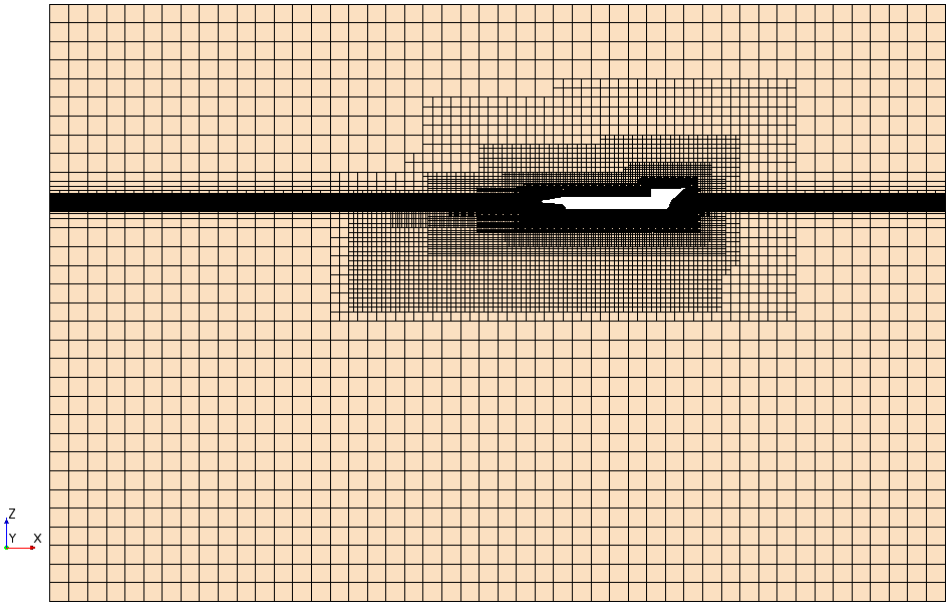
$$r_{32} = \sqrt[3]{\frac{N_2}{N_3}} \tag{78}$$

gdje je *N* broj ćelija pojedine mreže, indeks 1 predstavlja finu mrežu, indeks 2 srednju te indeks 3 grubu. U tablici 5. dan je pregled broja ćelija u pojedinoj mreži te provjera omjera broja ćelija prema izrazima (76)-(78). Vidljivo je da su vrijednosti r_{32} i r_{21} približno jednake.

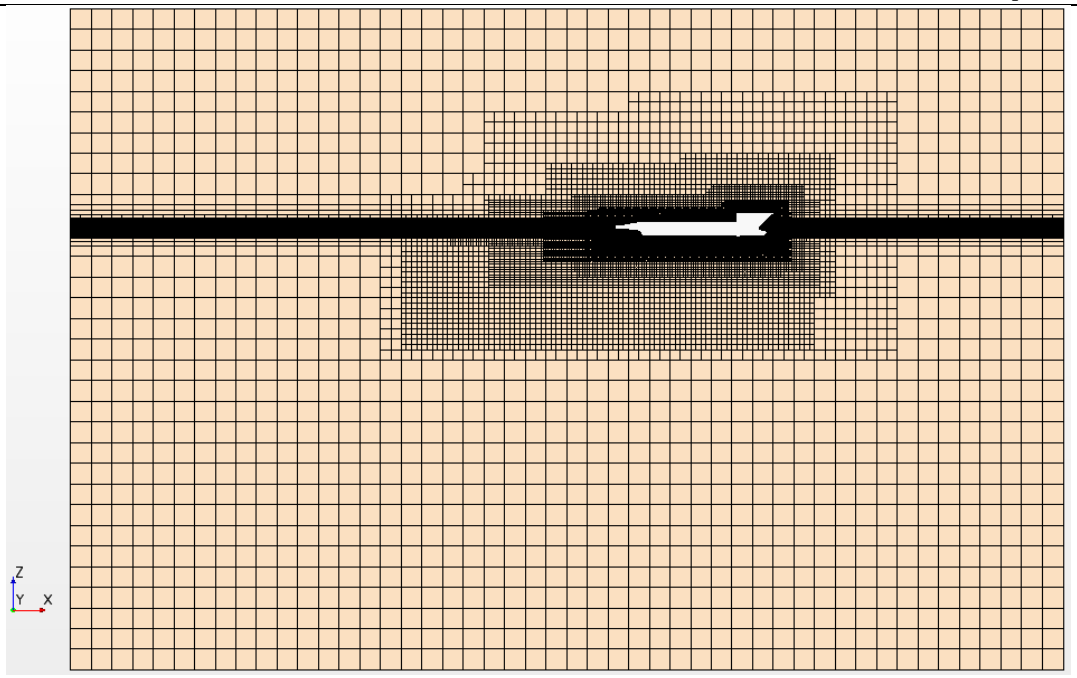
Tablica 5. Broj ćelija u mrežama i njihovi omjeri

	N_3	N_2	N_1	r_{32}	r_{21}
Model 1	1,09 M	2,18 M	4,42 M	1,25	1,26
Model 2	1,17 M	2,35 M	4,92 M	1,26	1,27
Model 3	1,13 M	2,31 M	4,80 M	1,27	1,27

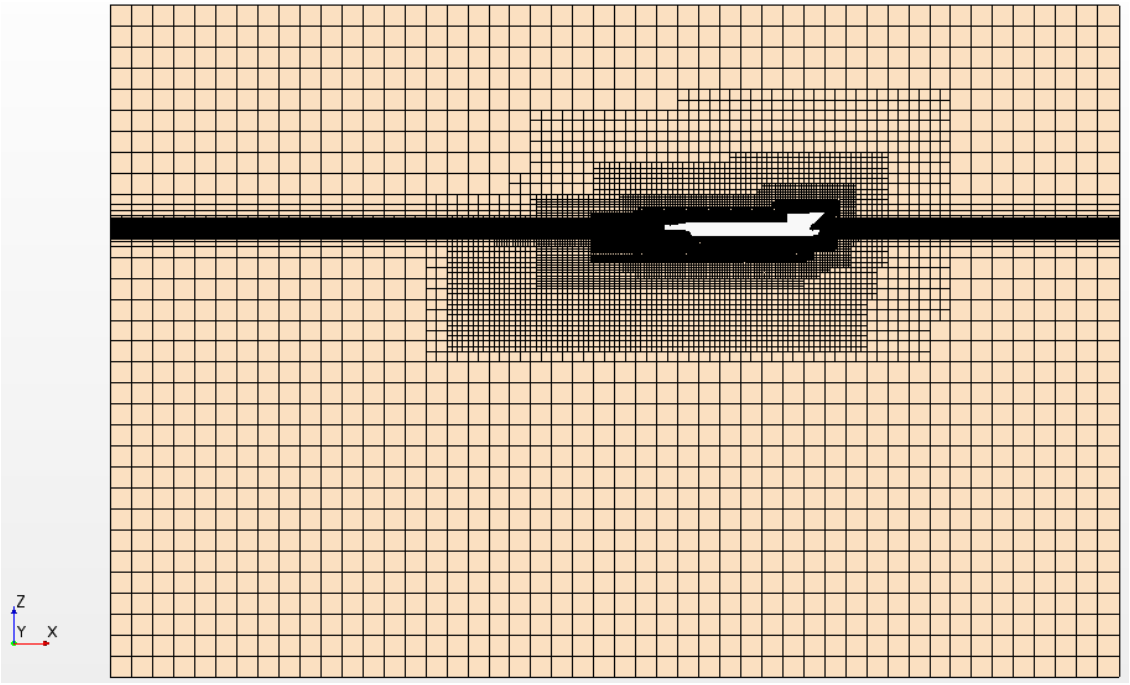
Na slikama 18-20. prikazana je fina geometrijska mreža ispitanih modela.



Slika 18. Diskretizacija geometrijske mreže Modela 1



Slika 19. Diskretizacija geometrijske mreže Modela 2



Slika 20. Diskretizacija geometrijske mreže Modela 3

4.3.1. Profinjenja geometrijske mreže

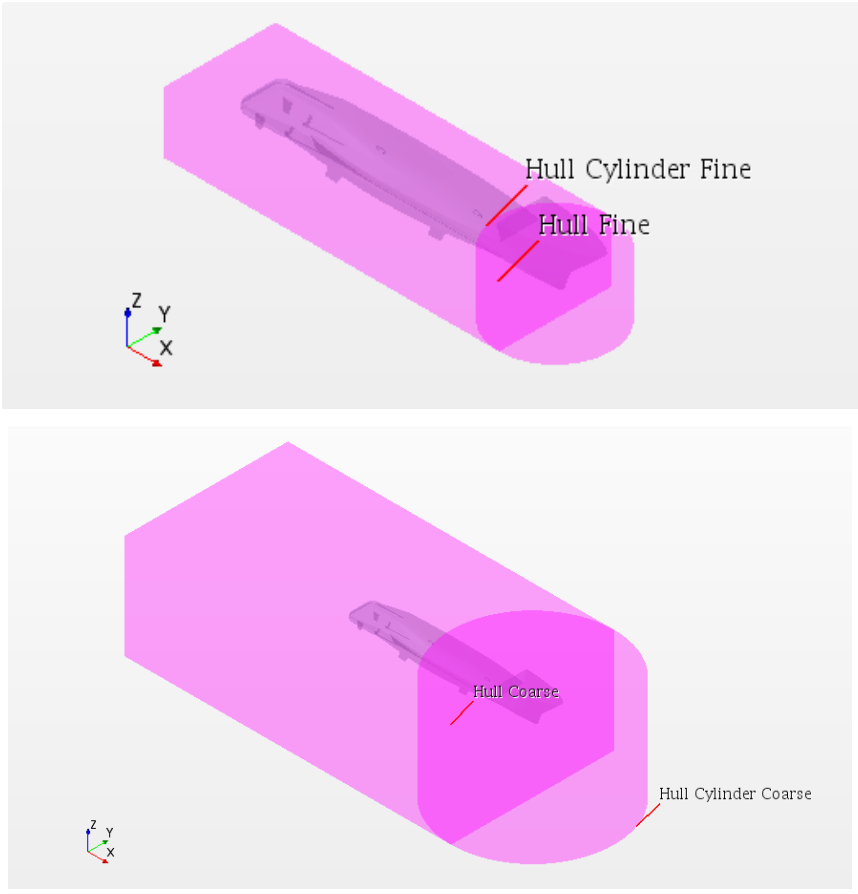
Prilikom diskretizacije geometrijske mreže u potrebno je u nekim dijelovima mreže napraviti profinjenja, odnosno napraviti „gušću“ mrežu. Profinjenja se mogu zadati volumetrički što znači da se definira neki volumen u domeni i u njemu se postavi zadana veličina ćelije ili neki drugi parametar. Također, profinjenja mogu biti površinska. Površinska profinjenja se

definiraju tako da se odabere površina u modelu i toj površini se posebno postavi neki parametar. Priručnik STAR-CCM+ [26] predlaže profinjenja oštrih rubova ili kutova na geometriji broda primjerice na pramcu broda, kao i profinjenja u području gdje se očekuje odvajanje strujanja. U ovome radu glavna profinjenja su u sljedećim područjima domene:

- trup,
- granični sloj turbulentnog strujanja,
- pramac,
- krma,
- privjesci,
- slobodna površina,
- valovi te Kelvinov kut.

U nastavku su detaljnije prikazana pojedina profinjenja.

Volumetričko profinjenje ili volumetrička kontrola trupa obuhvaća cijeli trup i definira veličinu ćelija u tom volumenu. Proces profinjena trupa objašnjen je u [22] te su u skladu s tim definirana profinjenja trupa jahte.



Slika 21. Volumetričke kontrole trupa

Na slici 21. prikazane su gruba i fina volumetrička kontrola trupa, a na slikama 18.-20. vidljiv je postupni rast ćelija od trupa prema krajevima proračunske domene.

Profinjenje graničnog sloja turbulentnog strujanja diskretizira se kao sloj prizama uz granicu zida. Ključna je visina prve ćelije uz zid kako bi se zadovoljio parametar y^+ opisan u poglavlju 3.6. On se približno određuje prema izrazu [23]:

$$y^+ = 0{,}172\left(\frac{y}{L}\right)Rn^{0{,}9} \tag{79}$$

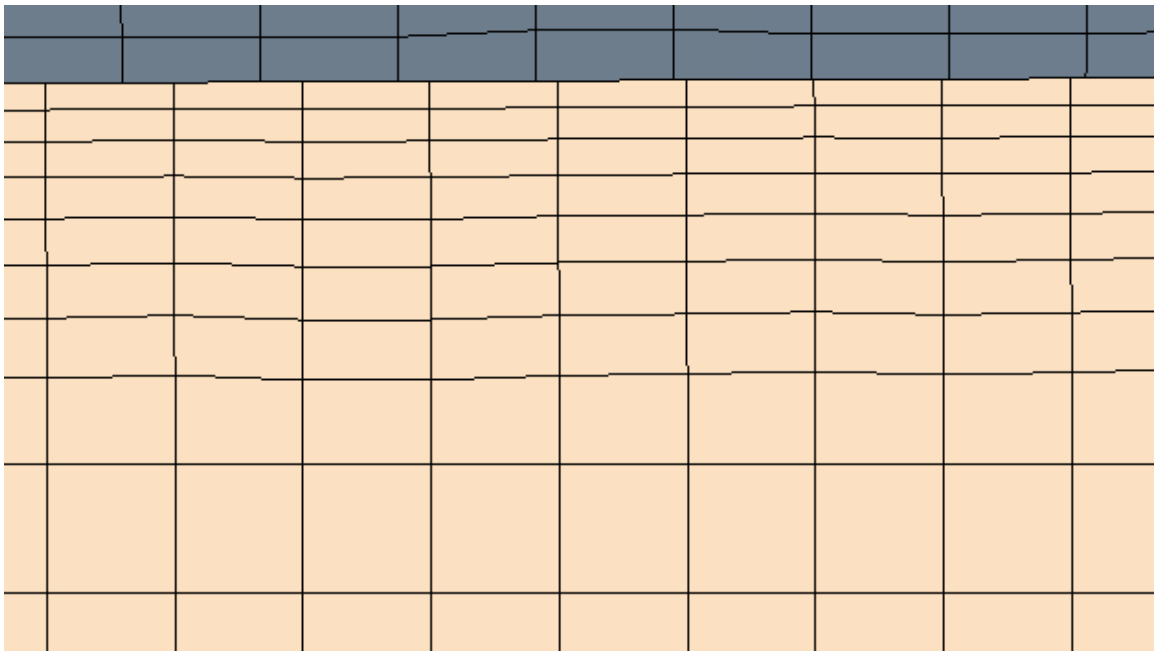
gdje je y udaljenost od zida, L dužina granica zida i Rn Reynoldsov broj. Budući da je ciljana vrijednost $30 < <y^+ < 300$, iz izraza (79) moguće je odrediti y, a visina prve ćelije od zida je:

$$h = 2y \tag{80}$$

Pri visokim Reynoldosovim brojevima će h biti jako malen kako bi se zadovoljio parametar y^+, zato se granični sloj diskretizira kao sloj prizama koje linearno rastu tako da posljednja ćelija u graničnom sloju bude malo manja od iduće ćelije izvan sloja.

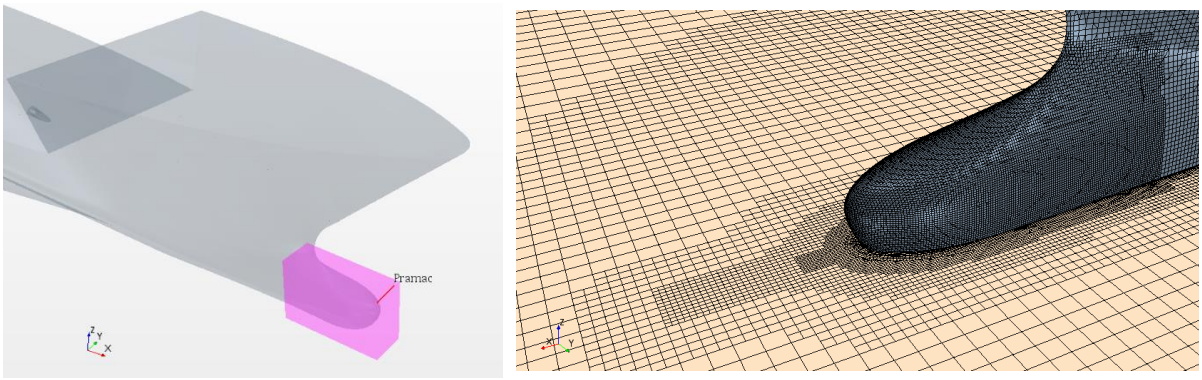
Parametri sloja prizama su sljedeći, a njegove vrijednosti su navedene u tablici 4.:

- ukupna debljina sloja
- broj prizama u sloju
- faktor rastezanja



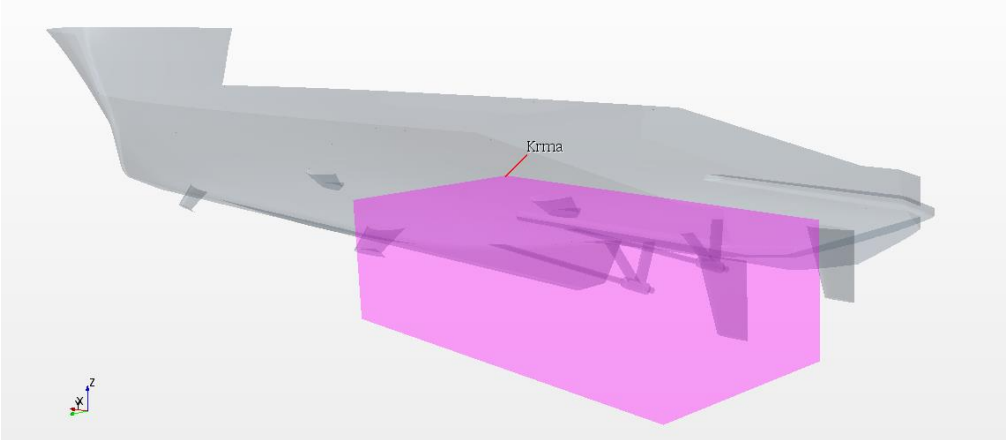
Slika 22. Diskretizacija graničnog sloja

Na slici 22. vidljiv je linearni rast ćelija od granice zida. Budući da je fokus ovog rada usporedba otpora različitih pramčanih bulbova, posebna pažnja je posvećena diskretizaciji u području pramca, gdje je generirana jako fina mreža veličine 6,25% osnovne veličine. Volumetrička kontrola pramca prikazana je na slici 23.



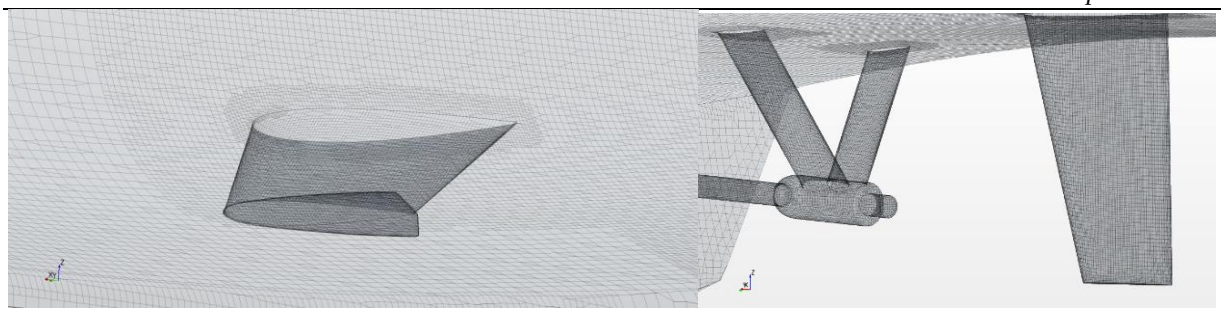
Slika 23. Diskretizacija pramčanog dijela

Volumetrička kontrola čija veličina ćelije iznosi 12,5 % osnovne veličine je postavljena i oko krmenog dijela modela, slika 24.



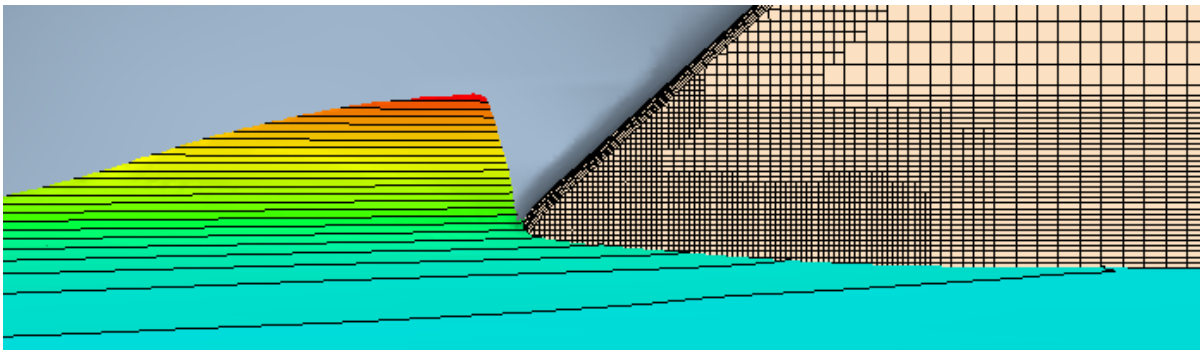
Slika 24. Diskretizacija krmenog dijela

Pokus otpora je proveden s privjescima, koji utječu na otpor broda. Zato je postavljena volumetrička kontrola u blizini ljuljnih kobilica, brodskog vijka i kormila. Za ovu volumetričku kontrolu zadana je veličina jednaka 6,25% osnovne veličine. Na slici 25. prikazano je profinjenje mreže u području privjesaka.



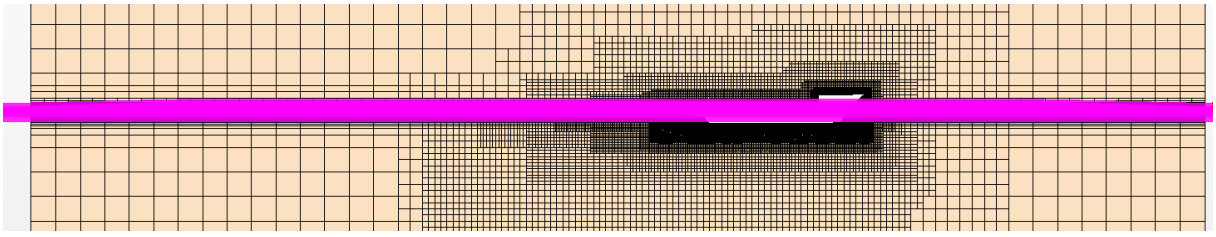
Slika 25. Profinjenja privjesaka

Volumetrička kontrola slobodne površine je definirana ne izotropno, odnosno veličina ćelija u smjeru *x* i *y* osi iznosi 800% osnovne veličine, a u smjeru *z* osi 12,5, 25,5, i 50% osnovne veličine za fino, srednje i grubo profinjenje slobodne površine. Treba napomenuti da fino profinjenje slobodne površine treba obuhvatiti cijelu visinu pramčanog vala, kako je prikazano na slici 26., da bi se dobili što točniji rezultati.



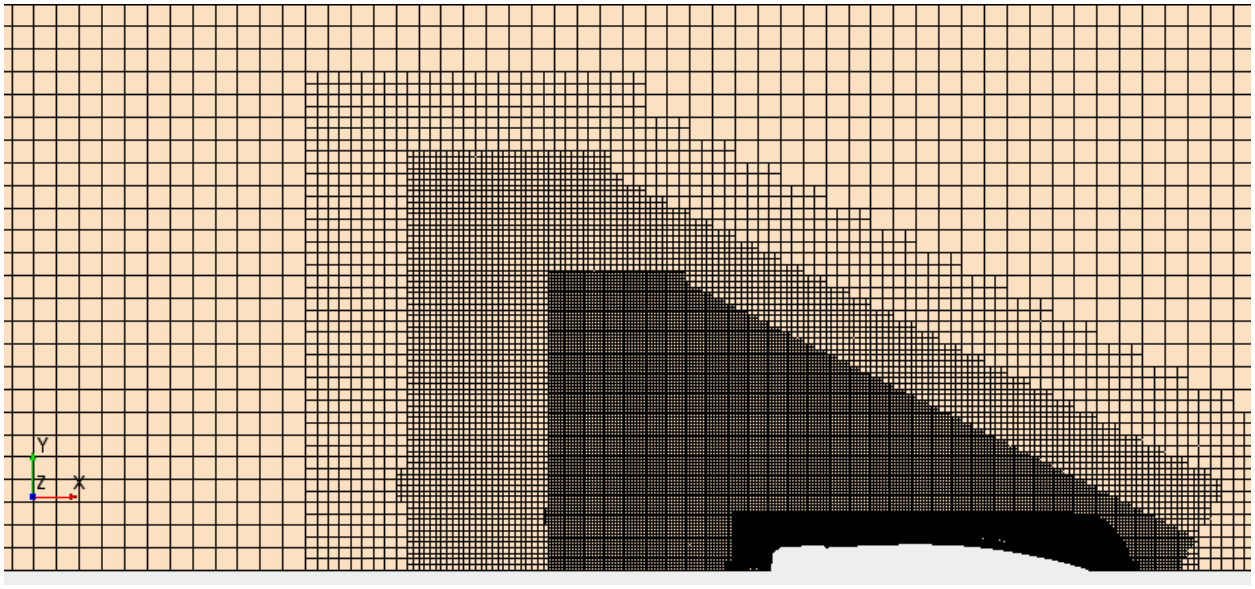
Slika 26. Profinjenje slobodne površine i pramčani val

Na slici 27. prikazani su volumeni koji obuhvaćaju područje profinjenja slobodne površine, a na slikama 18.-20. vidljiva je gušća mreža ćelija u području slobodne površine u odnosu na ostatak domene.



Slika 27. Volumetričke kontrole slobodne površine

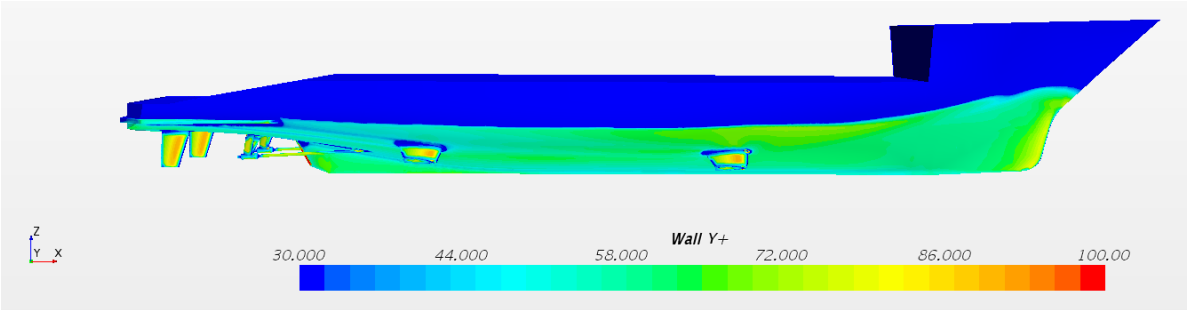
Za postizanje dobrog opisa Kelvinovog kuta (poglavlje 2.1.3) geometrijska mreža je profinjena primjenom tri volumetričke kontrole u ravnini slobodne površine. Napravljene su tri kontrole kako bi se dobila što točnija slika valova. Na slici 28. prikazana su profinjenja mreže.



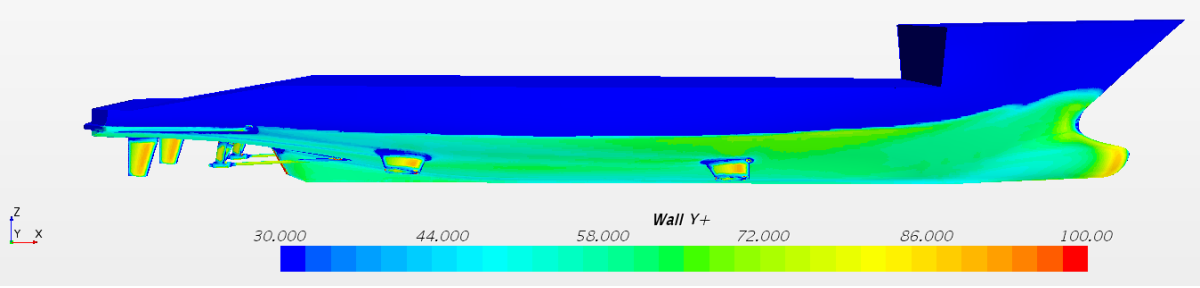
Slika 28. Profinjenje sustava valova

4.3.2. Kontrola geometrijske mreže

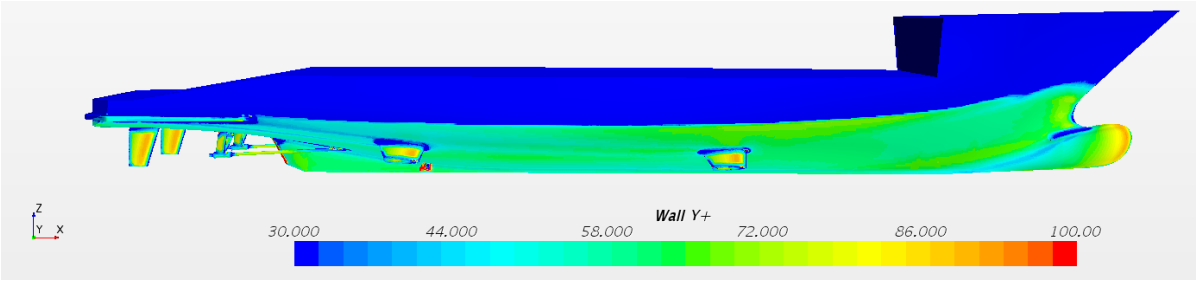
Kontrola geometrijske mreže u području graničnog sloja se može provesti koristeći parametar *Wall* y^+ objašnjen u poglavlju 3.6. Na slikama 29.-31. je prikazana vrijednost parametra y^+ za sve modele. Vidljivo je da je vrijednost parametra y^+ duž većine trupa jahte oko 60, što pokazuje da je u logaritamskom području brzine, slika 7.



Slika 29. Raspodjela parametra y^+ na Modelu 1



Slika 30. Raspodjela parametra y^+ na Modelu 2



Slika 31. Raspodjela parametra y^+ na Modelu 3

4.4. Fizikalni model

Nakon diskretizacije proračunske domene sljedeći korak je odabir odgovarajućeg fizikalnog modela za opisivanje viskoznog strujanja oko trupa modela. Fizikalni model je kako slijedi:

- *Three Dimensional*
- *Implicit Unsteady*
- *Eulerian Multiphase*
- *Multiphase Interaction*
- *Volume of Fluid (VOF)*
- *Multiphase Equation of State*
- *Segregated Flow*
- *Gradients*
- *Turbulent*
- *Reynolds-Averaged Navier-Stokes*
- *k-ω* SST / *k-ε* realizible / RSM
- *Exact Wall Distance*
- *All / Two-Layer All / High y+ Wall Treatment*
- *Gravity*
- *Cell Quality Remediation*
- *VOF Waves*

Detaljan opis odabranog fizikalnog modela dan je u [28]. Vidljivo je da su odabrana tri modela turbulencije, *k-ω* SST, *k-ε* realizible i RSM. U ovome radu provedene su simulacije tri modela jahte primijenjujući tri modela turbulencije, u cilju ispitivanja utjecaja modela turbulencije na rješenje numeričke simulacije. Modeli turbulencije su detaljno objašnjeni u poglavlju 3.

4.5. Početni i rubni uvjeti

Početni i rubni uvjeti se mogu postaviti kao funkcija VOF vala. Prema tome su na donjoj, gornjoj i ulaznoj granici domene postavljeni rubni uvjeti brzine kao vektorska funkcija brzine VOF vala. Također se na tim granicama postavlja volumni udio faza fluida kao funkcija VOF vala. Na izlaznoj granici se postavlja rubni uvjet kao skalarna funkcija hidrostatskog tlaka VOF vala, kao i volumni udio faza fluida. Na ulaznoj, izlaznoj i bočnoj stranici se postavlja i uvjet prigušivanja VOF valova, za duljinu prigušenja postavljena je duljina modela jahte prema [27].

4.6. Postavljanje parametra rješavača i kriterij zaustavljanja

Za provođenje simulacije viskoznog strujanja oko trupa modela broda potrebno je definirati vremenski korak, broj unutarnjih iteracija po vremenskom koraku i ukupno fizičko vrijeme simulacije. Također, definiraju se podrelaksacijski faktori koji poboljšavaju konvergenciju po vremenskom koraku. Podrelaksacijski faktor za brzinu je 0,7, za tlak 0,3, za k i ω 0,6, a za turbulentnu viskoznost 0,8. Ukupno fizičko vrijeme simulacije i vremenski korak definirani su prema vremenu koje je potrebno fluidi da obiđe tijelo te se računa prema izrazu [31]:

$$T = \frac{L}{V} \tag{81}$$

gdje je L duljina modela, a V brzina strujanja fluida.

Odabrano je da je ukupno fizičko vrijeme $50T$ te je to i ujedno kriterij zaustavljanja. Vremenski korak je definiran kao funkcija, za prvih $40T$ ukupnog fizičkog vremena odabran je veći ili grubi vremenski korak, a za posljednjih $10T$ manji ili fini vremenski korak. Grubi vremenski korak određuje se prema izrazu:

$$t_{grubi} = T / 25 \tag{82}$$

Fini vremenski korak prema sljedećem izrazu:

$$t_{fini} = T / 200 \tag{83}$$

Postavke parametara rješavača dane su u tablici 6.

Prema tablici 6., moguće je napisati funkciju varijabilnog vremenskog koraka, ona glasi:

$$(\$Time <= 80)\,?\,0.08 : 0.01$$

dakle, ukoliko je proteklo fizičko vrijeme numeričke simulacije manje ili jednako 80 s, vremenski korak je 0,08 s, dok je za ostatak numeričke simulacije vremenski korak 0,01 s.

Tablica 6. Parametri rješavača i kriterij zaustavljanja

T	2 s
$40T$	80 s
$10T$	20 s
t_{grubi}	0,08 s
t_{fini}	0,01 s
Broj unutarnjih iteracija	5

5. REZULTATI

U ovome poglavlju dani su rezultati provedenih numeričkih simulacija. Prvo su prikazani rezultati postupka verifikacije, zatim je napravljena usporedba rezultata numeričke simulacije pokusa otpora s rezultatima eksperimentalnih ispitivanja. Provedena je analiza strujanja oko modela jahte. Dana je vizualizacija hidrodinamičkog tlaka na trup, slike valova i slobodne površine te prikaz strujnica oko trupa i polja nominalnog sustrujanja. Ispitan je utjecaj pramčanog bulba na svaku od tih stavki. Konačno, ispitan je utjecaj različitih modela turbulencije na dobivene rezultate numeričkih simulacija.

5.1. Verifikacija rezultata

Verifikacija rezultata napravljena je za sva tri modela forme, koristeći *k-ω* SST model turbulencije. Brojevi ćelija za različite gustoće geometrijske mreže dani su u tablici 5., a vremenski korak je definiran na sljedeći način: grubi vremenski korak iznosi 0,04 s, srednji 0,02 s te fini 0,01 s. U tablici 7. prikazani su rezultati numeričkih simulacija pokusa otpora.

Tablica 7. Rezultati numeričkih simulacija pokusa otpora

			Model 1	Model 2	Model 3
R_T, N	Geometrijska mreža	Gruba	136.32	125.84	128.29
		Srednja	133.13	123.15	125.85
		Fina	131.80	122.27	125.20
	Vremenski korak	Grubi	126.70	122.54	124.75
		Srednji	126.76	122.80	125.81
		Fini	126.55	119.08	125.20

Numeričke simulacije provedene za potrebe verifikacije geometrijske mreže provedene su s finim vremenskim korakom, a numeričke simulacije za potrebe verifikacije vremenskog koraka provedenu su na finoj geometrijskom mreži.

Tablica 8. Verifikacija geometrijske mreže

	$\varepsilon_{g,32}$	$\varepsilon_{g,21}$	R_g	Tip konvergencije	U_g	$\bar{U}_g$, %
Model 1	1,593	0,666	0,418	Monotona konvergencija	0,598	0,907
Model 2	1,344	0,441	0,329	Monotona konvergencija	0,270	0,442
Model 3	1,220	0,332	0,267	Monotona konvergencija	0,148	0,237

Tablica 9. Verifikacija vremenskog koraka

	$\varepsilon_{t,32}$	$\varepsilon_{t,21}$	R_t	Tip konvergencije	U_t	$\bar{U}_t$, %
Model 1	-0,034	0,106	-3,142	Oscilatorna konvergencija	0,053	0,084
Model 2	-0,133	1,860	-13,96	Oscilatorna konvergencija	0,930	1,562
Model 3	-0,529	0,304	-0,574	Oscilatorna konvergencija	0,152	0,243

U tablici 8. i 9. prikazane su nesigurnosti geometrijske mreže i vremenskog koraka. Iz nesigurnosti geometrijske mreže i nesigurnosti vremenskog koraka moguće je odrediti ukupnu nesigurnost numeričkih simulacija, koja je dana u tablici 10.

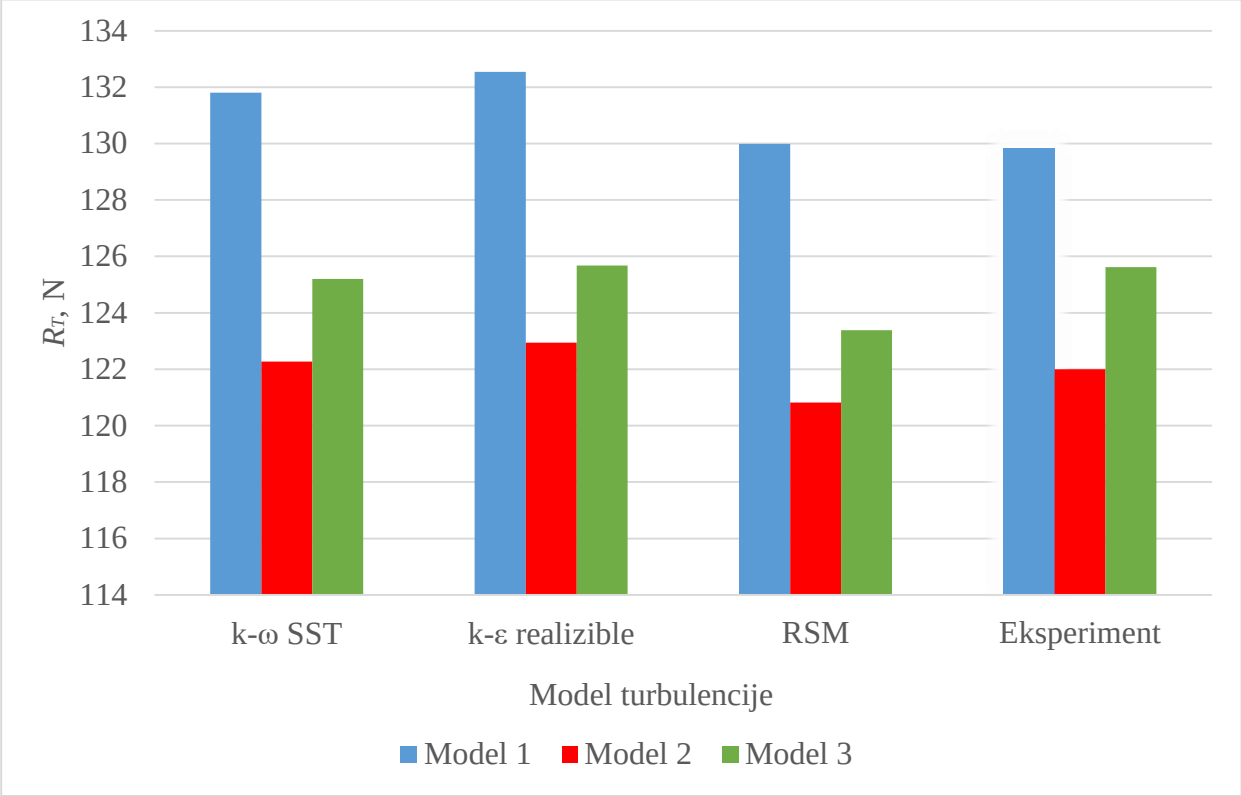
Tablica 10. Ukupna nesigurnost numeričkih simulacija

	Model 1	Model 2	Model 3
$\bar{U}_{SN}$, %	0,911	1,624	0,339

U tablici 10. dane su vrijednosti ukupnih nesigurnosti numeričkih simulacija, vidljivo je da je maksimalni postotak ukupne nesigurnosti 1,624 % za numeričke simulacije Modela 2, što je prihvatljivo.

5.2. Rezultati numeričkih simulacije pokusa otpora

Kako je projektna brzina broda 17 čvorova [24], numeričke simulacije pokusa otpora provedene su pri brzini od 2,524 m/s (što odgovara brzini od 17 čvorova za brod u naravi) za tri modela broda i s tri različita modela turbulencije. Na slici 32. prikazana je ukupna sila otpora pri brzini od 2,524 m/s za svaki model broda i model turbulencije. Također su na slici vidljivi rezultati eksperimenta, s kojima je provedena validacija. Vidljivo je jako dobro slaganje rezultata numeričke simulacije s eksperimentom. Također se može uočiti kako su primjenom raznih modela turbulencije dobiveni slični rezultati.



Slika 32. Rezultati numeričkih simulacija i eksperimenta

U tablici 11. dana je relativna devijacija rezultata numeričkih simulacija te eksperimentalnih rezultata. Vidljivo je da je dobivena relativna devijacija za sve modele turbulencije zadovoljavajuća. Tako je maksimalna vrijednost relativne devijacije dobivena za *k-ε* realizible model turbulencije za numeričku simulaciju strujanja fluida oko Modela 1.

Tablica 11. Relativna devijacija rezultata svih numeričkih simulacija

	Model 1	Model 2	Model 3
$R_{T,eksp}$, N	129.84	121.99	125.62
$R_{T,k-\omega}$, N	131.80	122.27	125.20
RD, %	1.51	0.23	-0.34
$R_{T,k-\varepsilon}$, N	132.54	122.94	125.67
RD, %	2.08	0.78	0.04
$R_{T,RSM}$, N	129.99	120.82	123.38
RD, %	0.11	-0.97	-1.79

Prema izvještaju s eksperimentalnih ispitivanja u bazenu Model 2 pokazuje smanjenje otpora od 7,7 % u odnosu na Model 1, dok je za Model 3 dobiveno smanjenje otpora 3,65 % u odnosu

na Model 1 [24]. U tablici 12. prikazana su dobivena smanjenja otpora ugradnjom pramčanog bulba primjenom numeričkih simulacija.

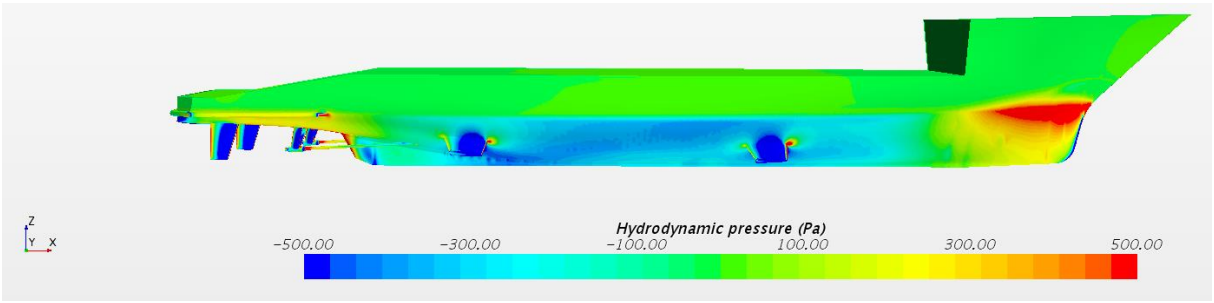
Tablica 12. Smanjenje sile otpora uslijed dodavanja pramčanog bulba

	$R_{T,\mathrm{k}-\omega}$	$R_{T,\mathrm{k}-\varepsilon}$	$R_{T,RSM}$
Model 1	131,80	132,54	129,99
Model 2	122,27	122,94	120,82
Smanjenje, %	7,23	7,24	7,05
Model 3	125,20	125,67	123,38
Smanjenje, %	5,00	5,18	5,08

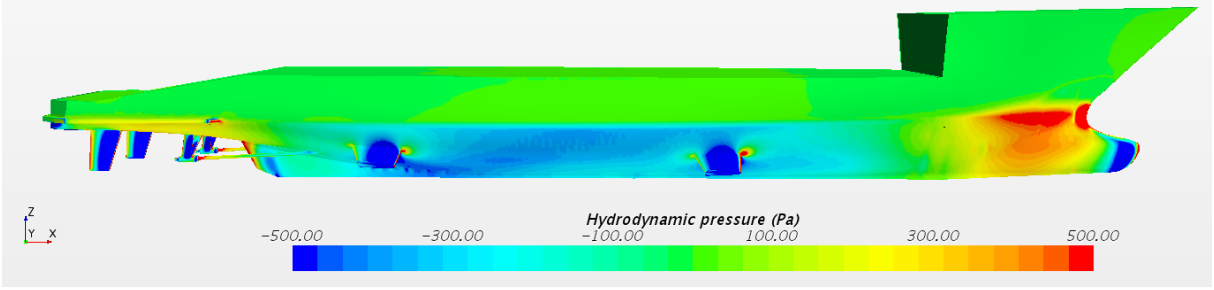
Rezultati numeričkih simulacija pokazuju oko 7 % manji otpor Modela 2 u odnosu na Model 1, dok Model 3 ima oko 5 % manji otpor nego Model 1.

5.3. Usporedba raspodjele hidrodinamičkog tlaka

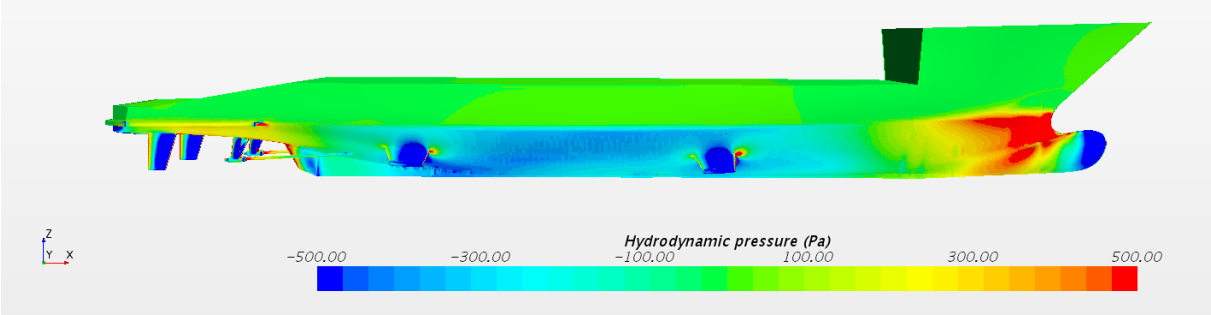
Na sljedećim slikama (33.–38.) prikazana je raspodjela hidrodinamičkog tlaka vala duž trupa modela jahte. Prikazane raspodjele tlakova su rezultat numeričkih simulacija u kojima je primijenjen *k-ω* SST model turbulencije.



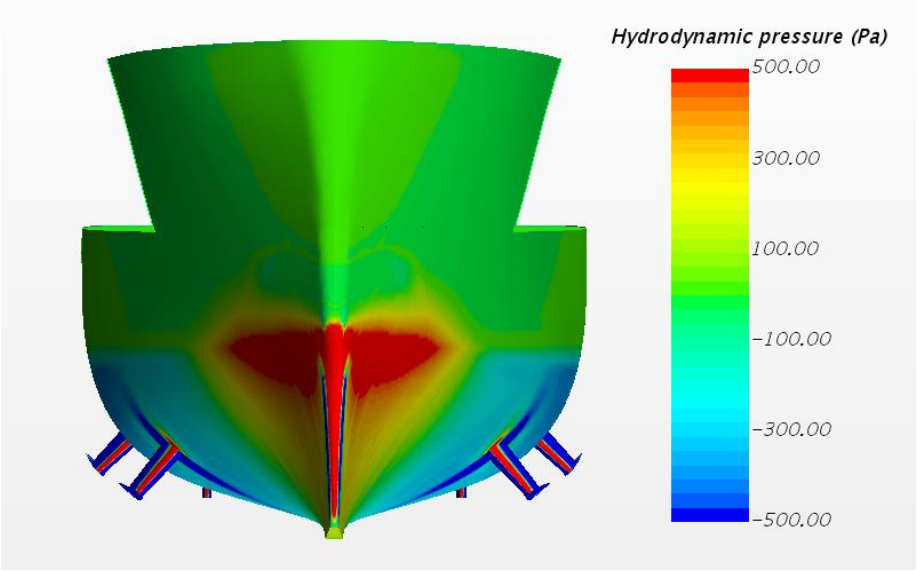
Slika 33. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka na Modelu 1



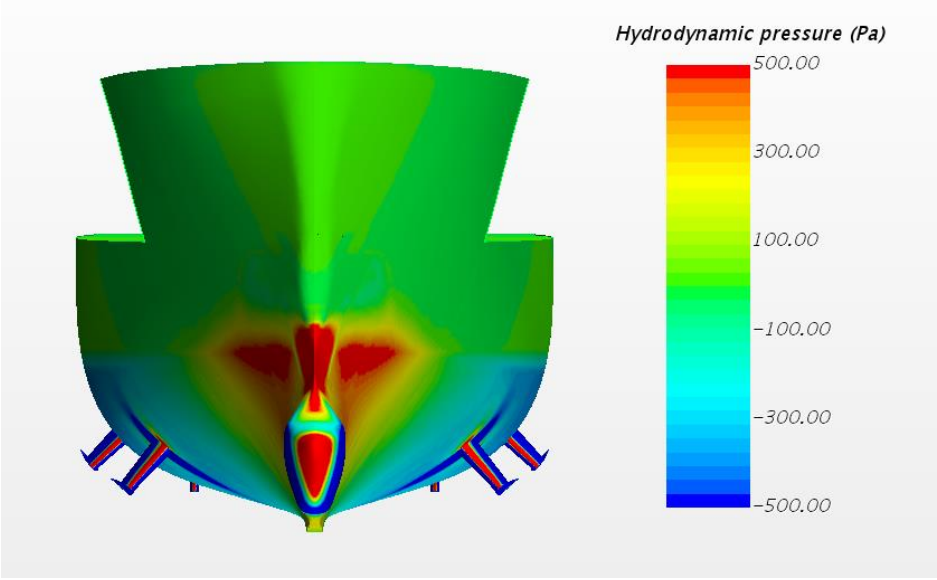
Slika 34. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka na Modelu 2



Slika 35. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka na Modelu 3

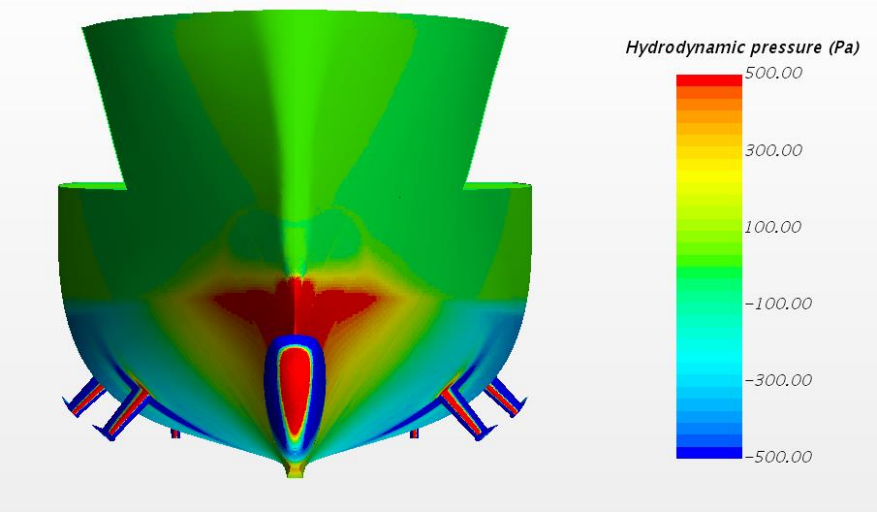


Slika 36. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka na Modelu 1



Slika 37. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka na Modelu 2

Uspoređujući prikazane raspodjele hidrodinamičkog tlaka za različite modele jahte vidljiva je znatna promjena polja tlaka u području pramca. Na Modelu 1 (slike 33. i 36.), vidljivo je veliko područje pretlaka oko slobodne površine i podtlak na samom vrhu pramca. Model 2 (slike 34. i 37) ima najmanje polje pretlaka, a na pramčanom bulbu se javlja i podtlak. Model 3 (slike 35. i 38.) ima sličnu raspodjelu hidrodinamičkog tlaka kao i Model 2, međutim polje pretlaka mu je veće.



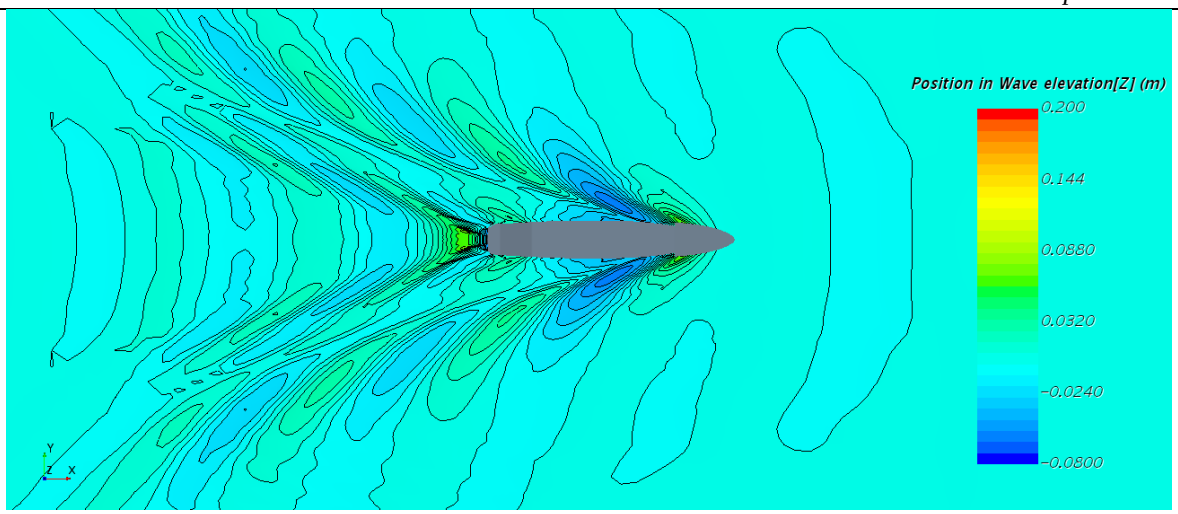
Slika 38. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka na Modelu 3

Važno je napomenuti kako model s manjim gradijentom tlaka (Model 2) ima manji ukupni otpor, [11]. Promatrajući ostatak trupa vidljivo je da je raspodjela tlaka vrlo slična za sve modele jahte, što upućuje na to da promjena u pramčanom dijelu forme nema značajan utjecaj na raspodjelu hidrodinamičkog tlaka na ostatku trupa.

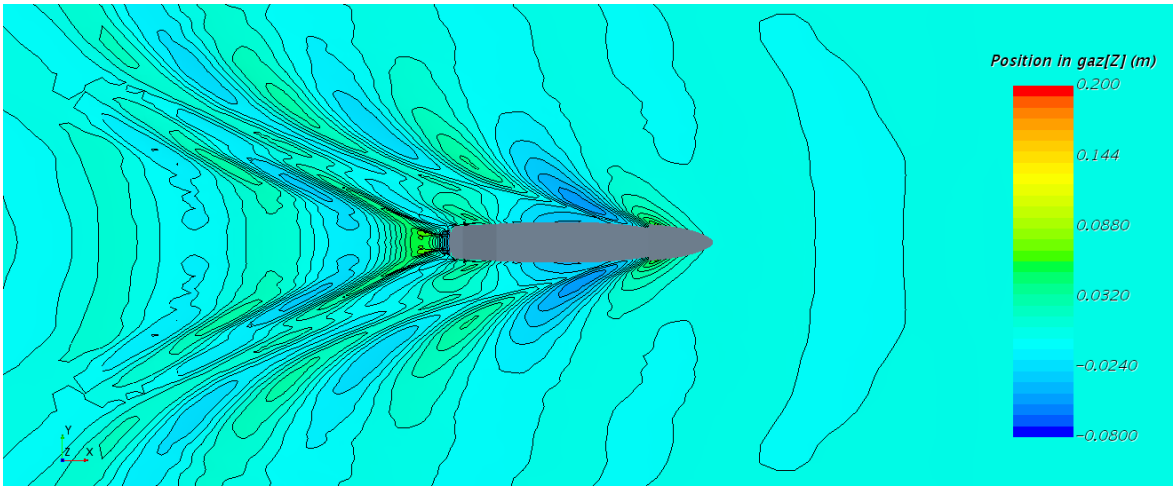
Primjenom različitih modela turbulencije vidljivo je da nema značajne promjene u raspodjeli hidrodinamičkog tlaka duž trupa modela jahte, kao što je pokazano u [19].

5.4. Usporedba slike valova

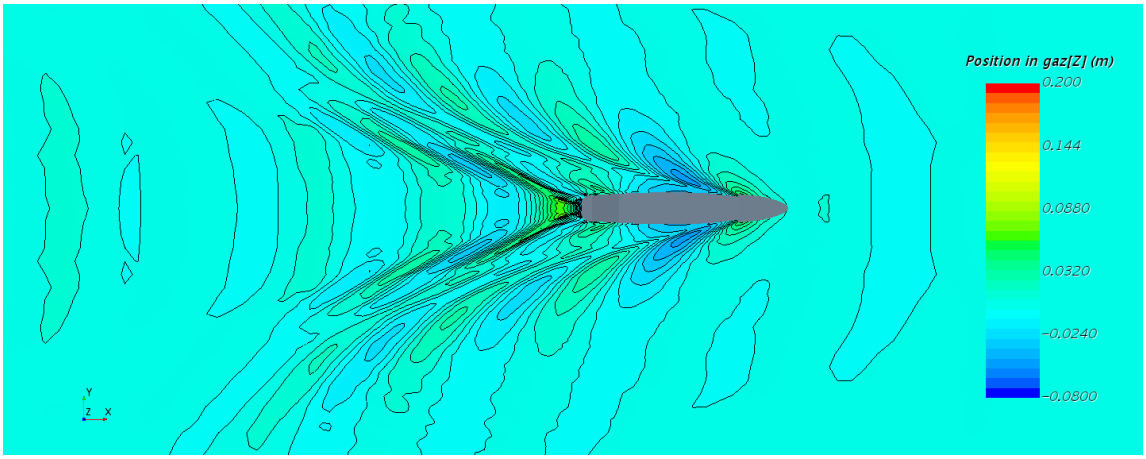
Kako je cilj ovoga rada ispitati utjecaj pramčanog bulba na otpor broda, važno je prikazati sliku vala za različite modele jahte. Na slikama 39.-41. prikazana je slika valova za svaki model jahte. Jasno je vidljiv Kelvinov kut opisan u poglavlju 2.1.3. Najviše valne elevacije su dobivene u području pramca te iza modela jahte, a najniže oko sredine trupa modela jahte te na krmi.



Slika 39. Slika valova oko Modela 1

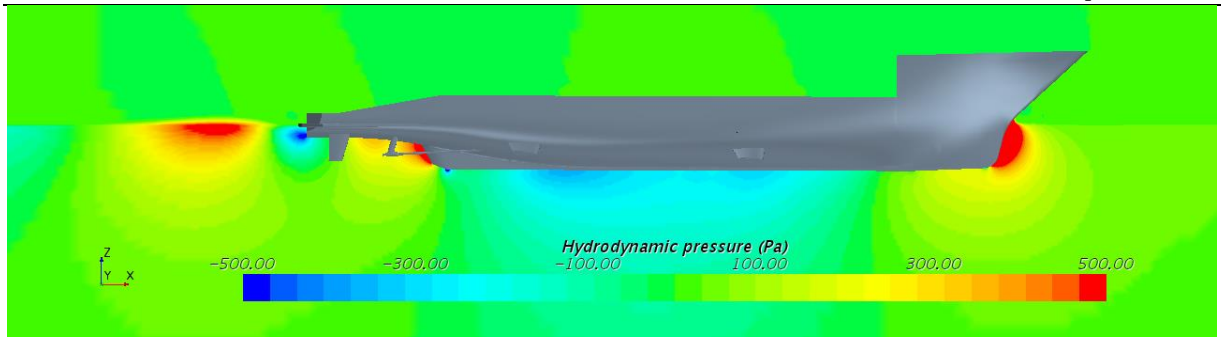


Slika 40. Slika valova oko Modela 2

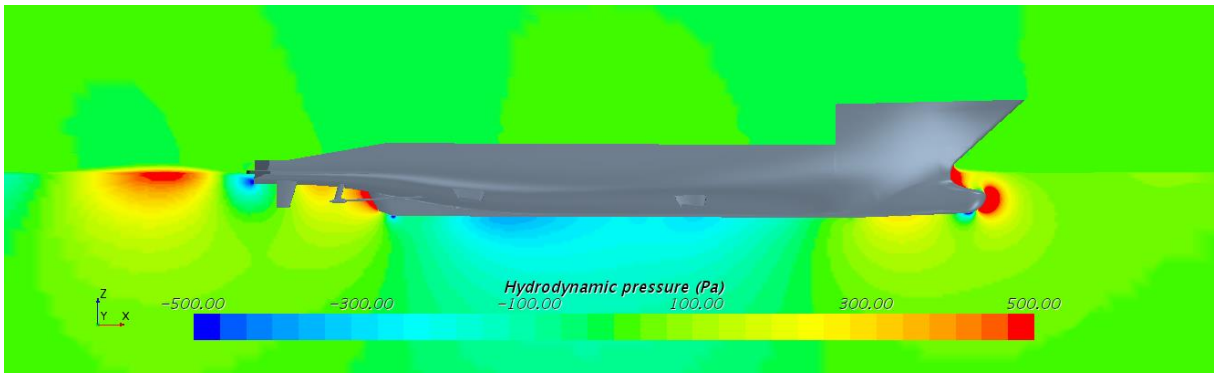


Slika 41. Slika valova oko Modela 3

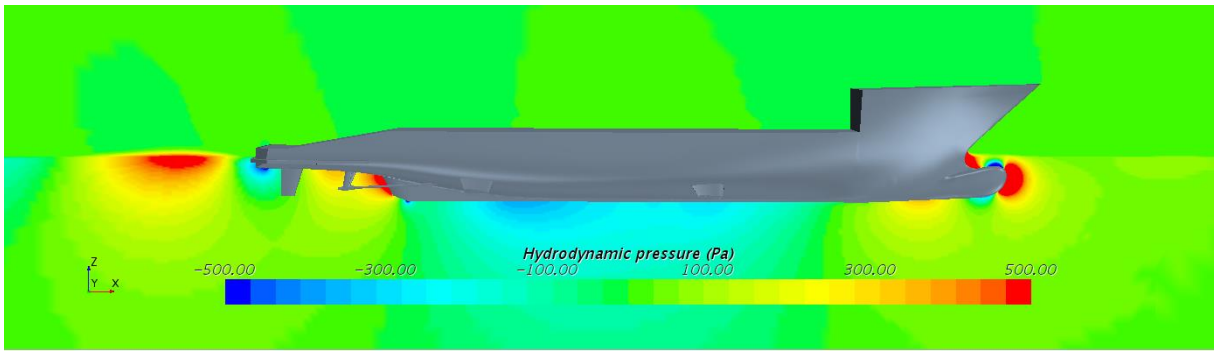
Kako bi se povezala slika valova s raspodjelom hidrodinamičkog tlaka dan je prikaz raspodjele hidrodinamičkog tlaka na simetralnoj ravnini broda. Raspodjela je prikazana na slikama 42.-44.



Slika 42. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka u simetralnoj ravnini za Model 1



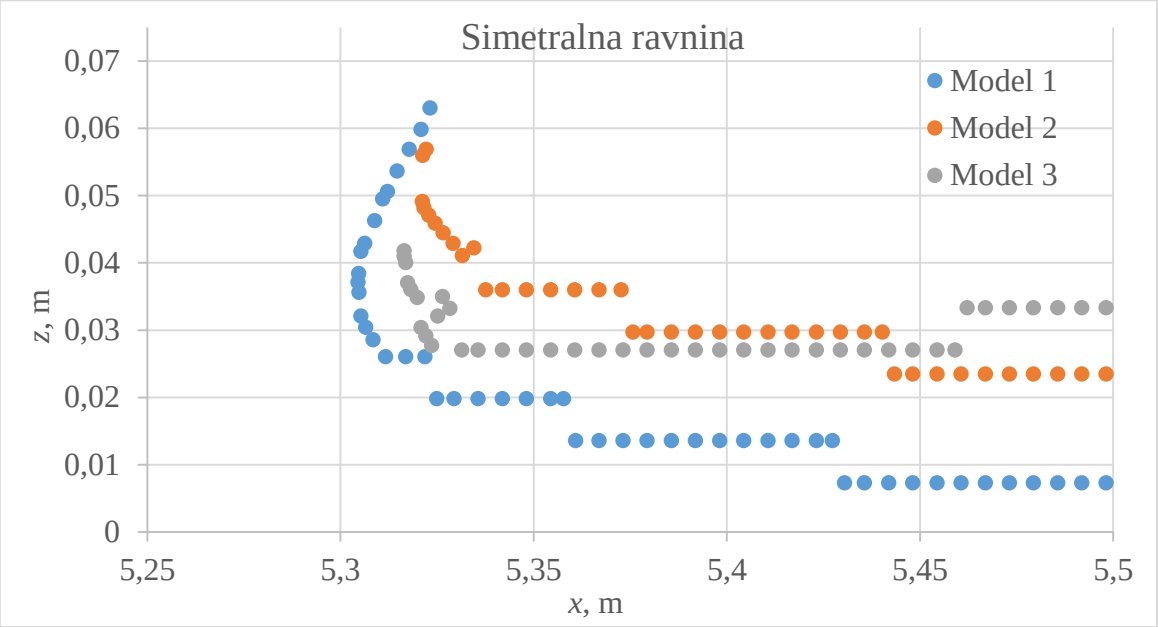
Slika 43. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka u simetralnoj ravnini za Model 2



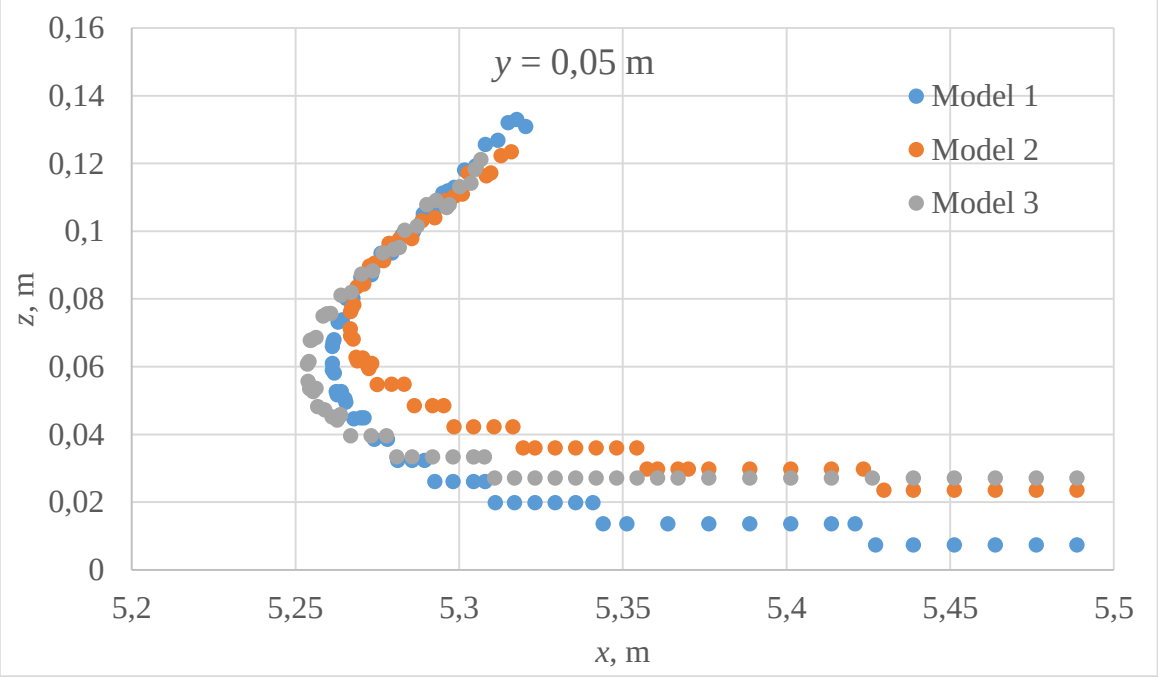
Slika 44. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka u simetralnoj ravnini za Model 3

U području pramca te iza broda vidljivo je da se javlja pretlak. Na slikama 43. i 44. u području pramca vidljivo je uz pretlak i djelomično područje podtlaka. Na području pretlaka pojavljuju se valni brijegovi, što se vidi iz slika 39.-41. Oko sredine trupa i na krmi broda vidljivo je područje podtlaka te se u tome području pojavljuju valni dolovi, također vidljivo na slikama 39.-41.

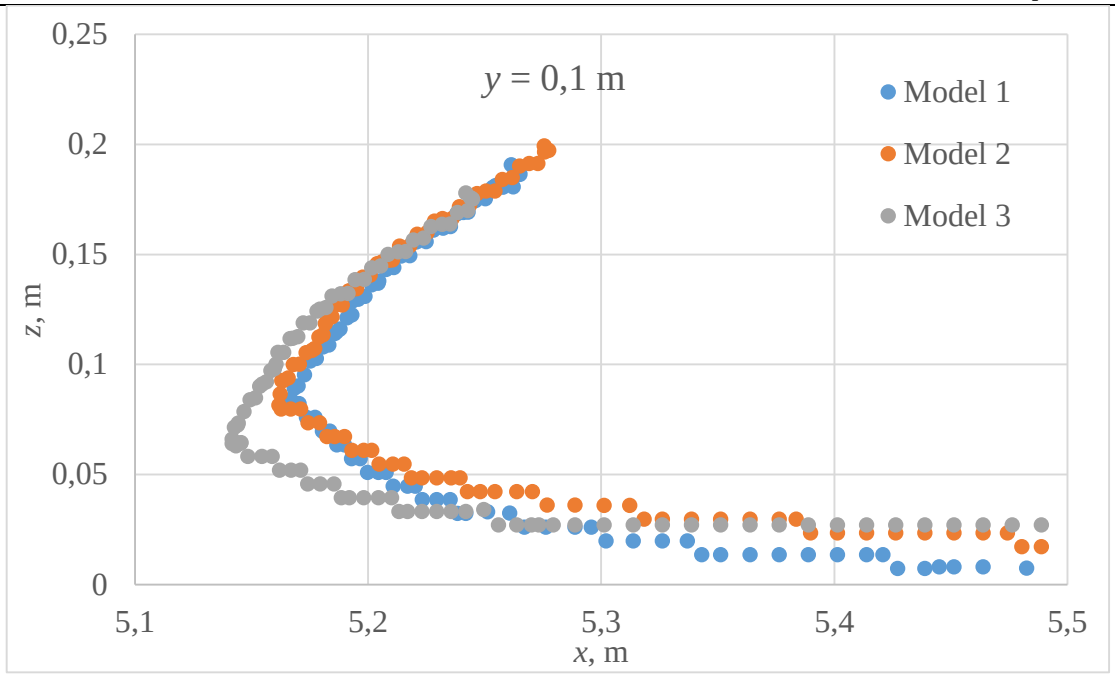
Kako bi se bolje usporedile visine valova za pojedini model, napravljeni su presjeci izopovršine s parametrom $\alpha = 0,5$ u simetralnoj ravnini i na njima su kao točke označene elevacije vala po dužini broda. Napravljeno je 5 presjeka, od simetrale broda do $y = 0,2$ m. Budući da je u ovom radu ispitan utjecaj pramčanog bulba, dane su točke elevacije vala samo u blizini pramčanog dijela. Na slikama 45.-49. prikazane su točke elevacije vala.



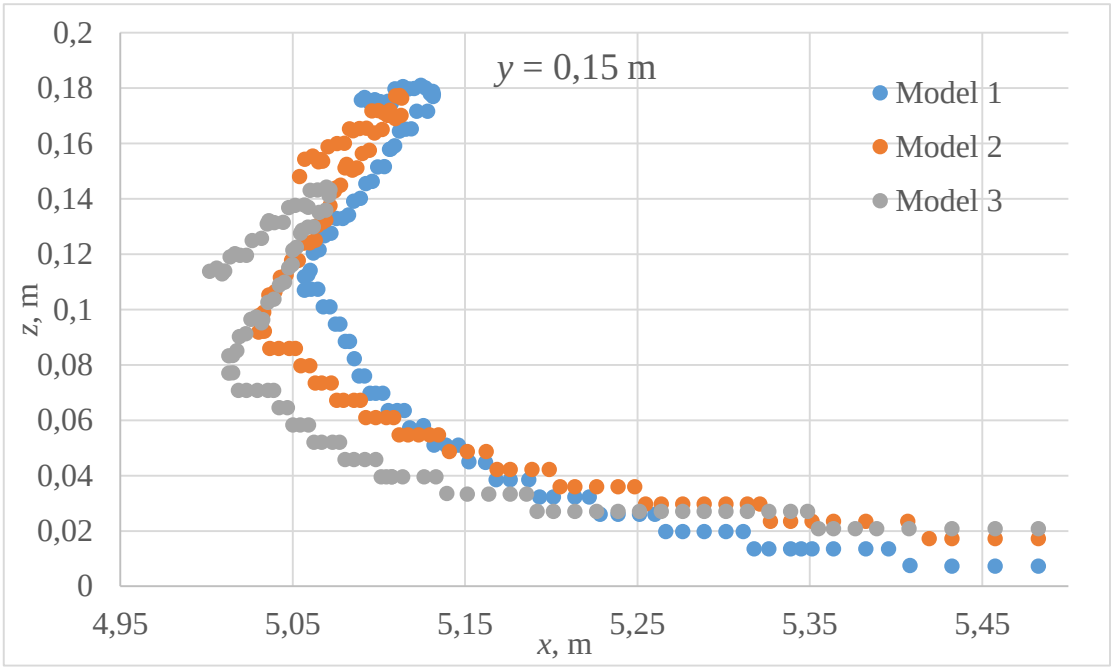
Slika 45. Točke elevacije vala u ravnini *y* = 0,001 m



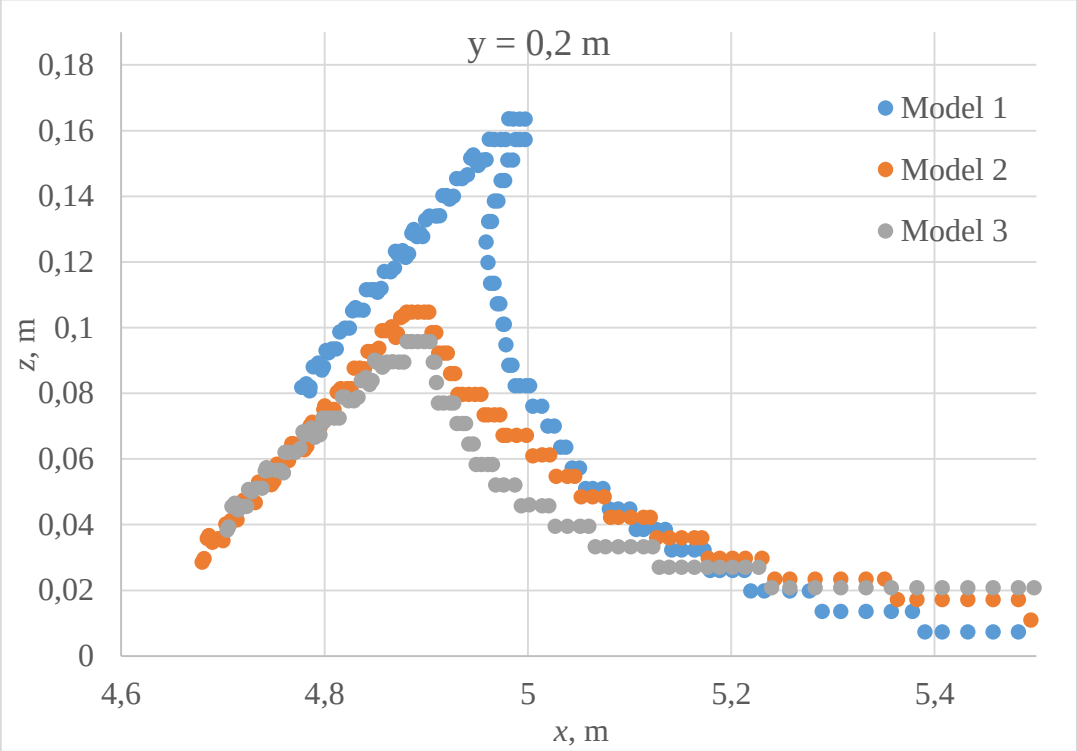
Slika 46. Točke elevacije vala u ravnini *y* = 0,05 m



Slika 47. Točke elevacije vala u ravnini *y* = 0,1 m



Slika 48. Točke elevacije vala u ravnini *y* = 0,15 m

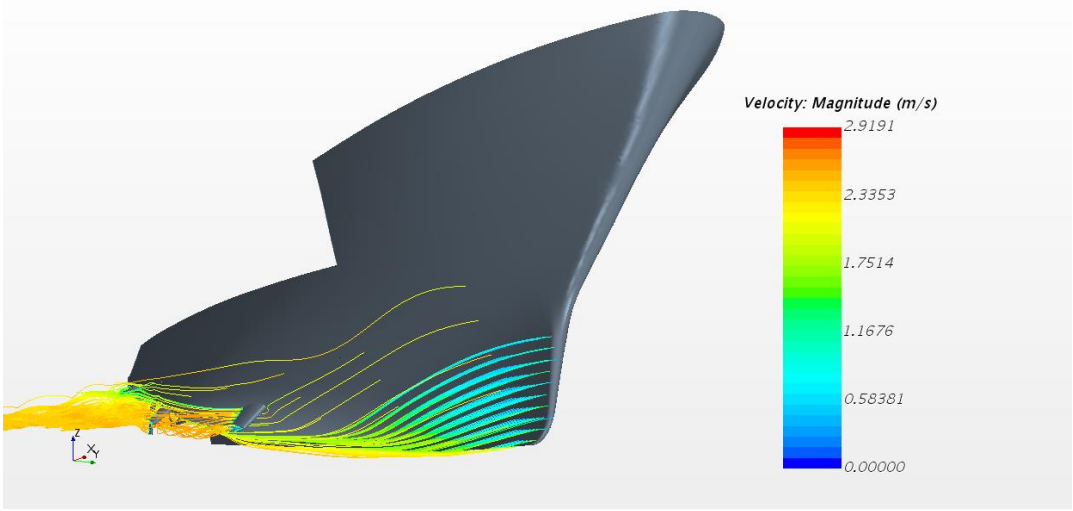


Slika 49. Točke elevacije vala u ravnini *y* = 0,2 m

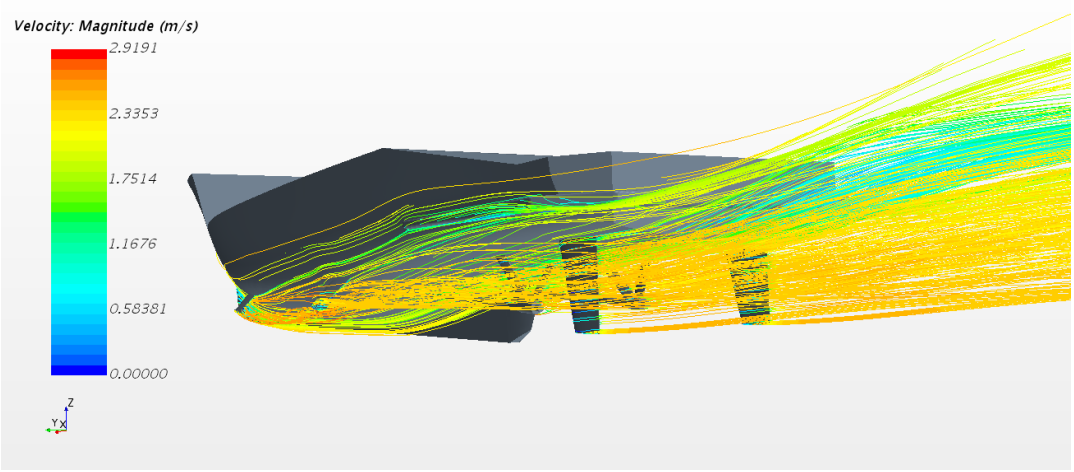
Vidljivo je da su elevacije valova najveće i između ravnina *y* = 0,1 m i *y* = 0,15 m. Najveće elevacije valova javljaju se kod Modela 1, što je i očekivano. Slika i hidrodinamički tlakovi prikazani na slikama 39. -44. su rezultati numeričkih simulacija na kojima je primijenjen *k-ω* SST model turbulencije. Rezultati dobiveni primjenom ostalih modela turbulencije su vrlo slični što je u skladu s rezultatima prezentiranima u radu [19].

5.5. Usporedba strujanja oko trupa

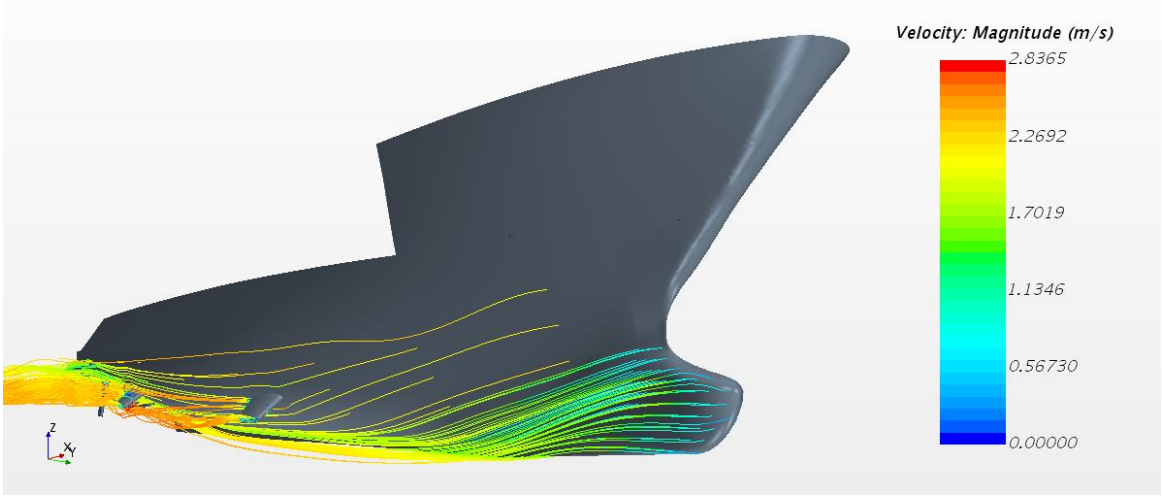
U ovom poglavlju napravljena je usporedba strujanja oko trupa što uključuje prikaz strujnica fluida oko trupa modela i polje nominalnog sustrujanja u ravnini brodskog vijka. Strujnice su prikazane na slikama 50.-55. Vidljivo je da promjena oblika pramca jahte uzrokuje značajnu promjenu smjera strujanja. Može se uočiti velika razlika između Modela 1 i 3. Na slikama strujnica vidljiv je pad brzine strujanja ispred pramca i iza krme broda. Na slikama 50.-55. su prikazane strujnice dobivene primjenom *k-ω* SST modela turbulencije, a rezultati numeričkih simulacija s ostalim modelima turbulencije ukazuju na to da primjena različitih modela turbulencije ne utječe na smjer strujnica,



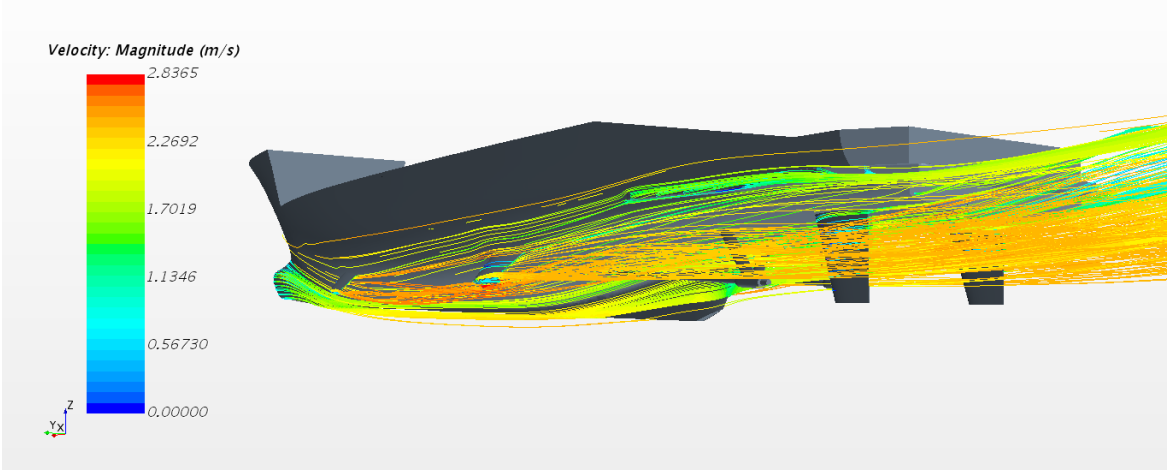
Slika 50. Strujnice fluida oko Modela 1 (pogled na pramac)



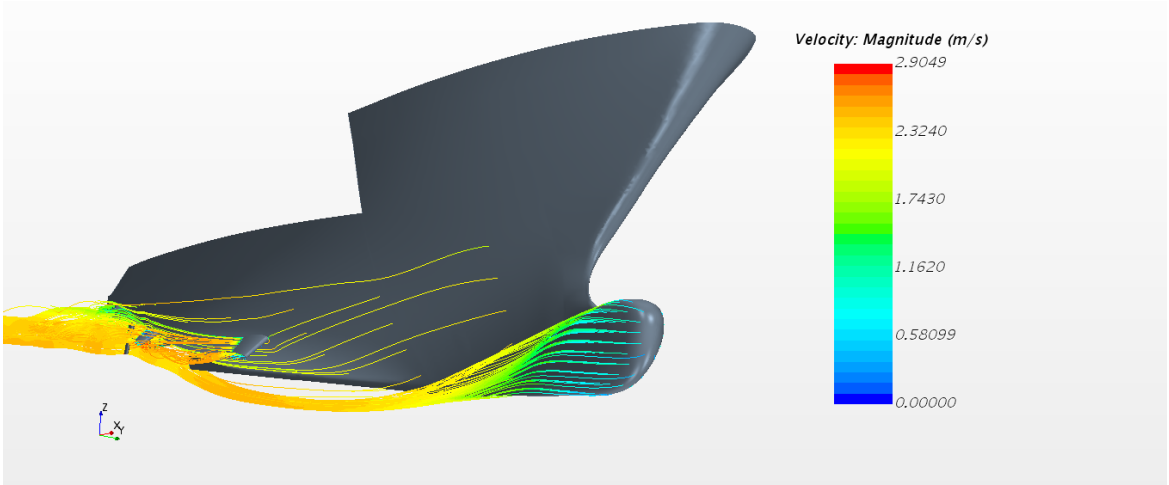
Slika 51. Strujnice fluida oko Modela 1 (pogled na krmu)



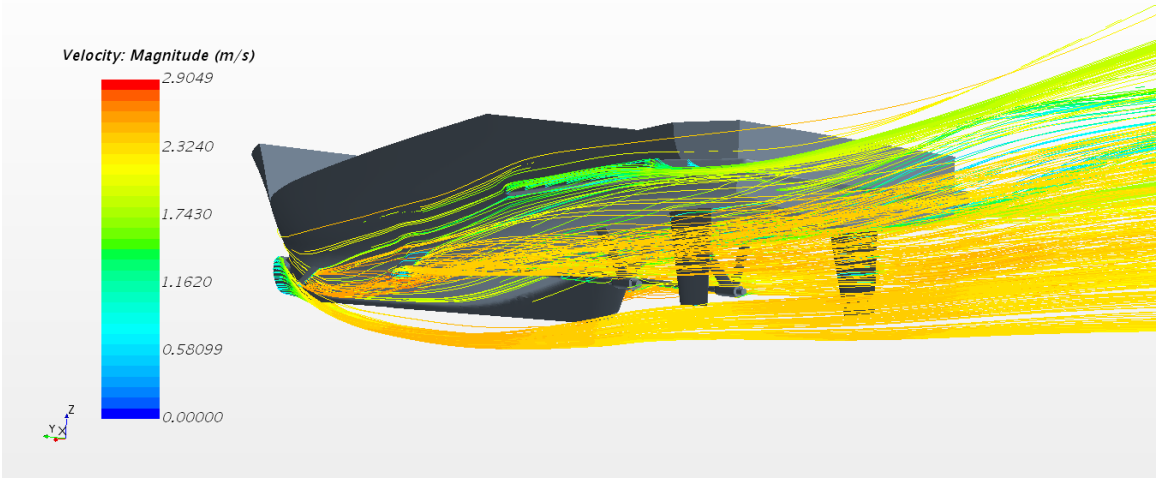
Slika 52. Strujnice fluida oko Modela 2 (pogled na pramac)



Slika 53. Strujnice fluida oko Modela 2 (pogled na krmu)

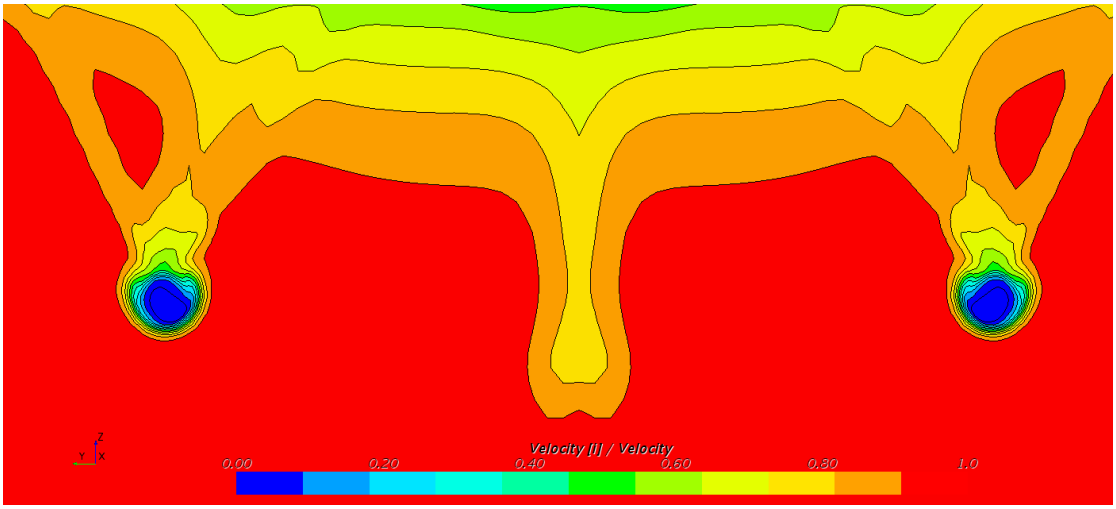


Slika 54. Strujnice fluida oko Modela 3 (pogled na pramac)

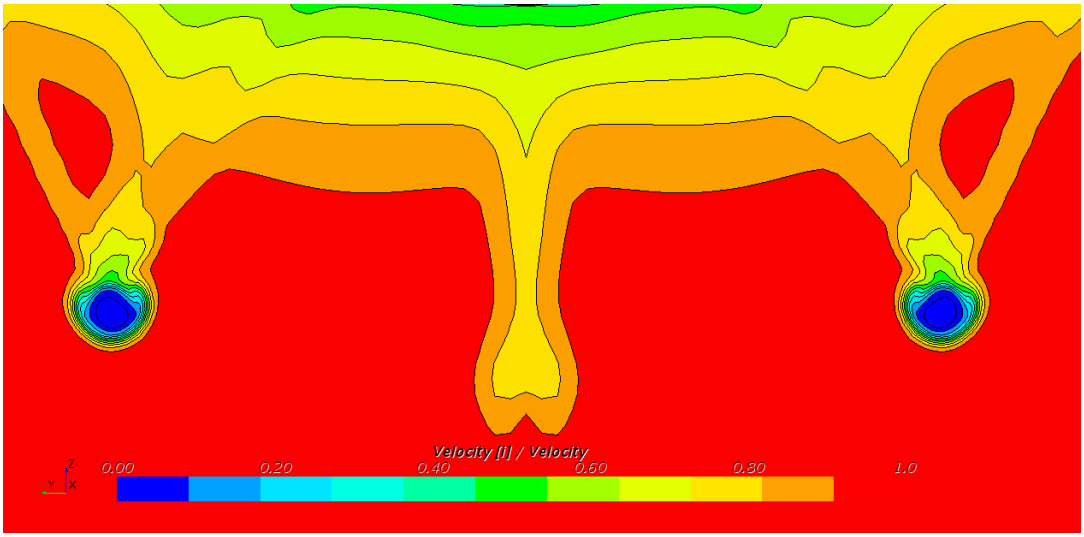


Slika 55. Strujnice fluida oko Modela 3 (pogled na krmu)

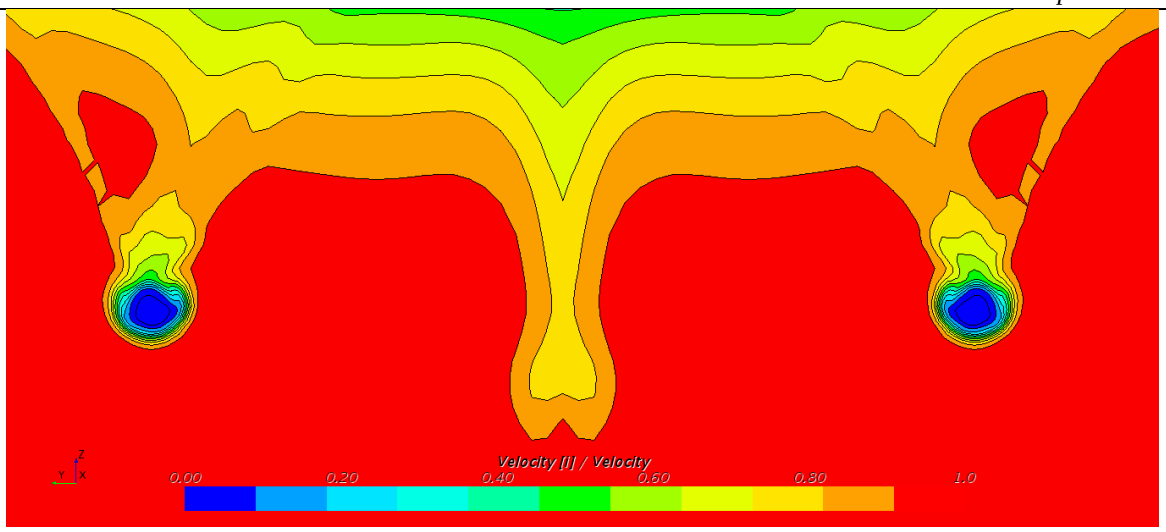
Na slikama 56.-64. prikazano je nominalno polje sustrujanja u ravnini brodskog vijka za sve ispitane modele jahte i primijenjene modele turbulencije. Cilj prikazanih rezultata numeričkih simulacija je pokazati utjecaj različitih modela turbulencije na nominalno polje sustrujanja. Prema ITTC-u [32], RSM je najbolji model turbulencije za određivanje nominalnog polja sustrujanja pri ispitivanju modela broda. Usporedbom dobivenih rezultata vidljivo je da polje nominalog sustrujanja dobiveno primjenom RSM modela turbulencije pokazuje najveće smanjenje brzine što je u skladu s rezultatima prikazanim u [33]. Također je vidljiv utjecaj različitih modela forme na polje nominalnog sustrujanja, primjerice u polju nominalnog sustrujanja Modela 3 (slike 62.-64.) vidljiv je dodatan pad brzine koji nije prisutan u poljima nominalnog sustrujanja Modela 1 i 2 (slike 56.-61.), što dovodi do zaključka da promjena forme u pramčanom dijelu jahte utječe na strujanje oko cijeloga trupa jahte.



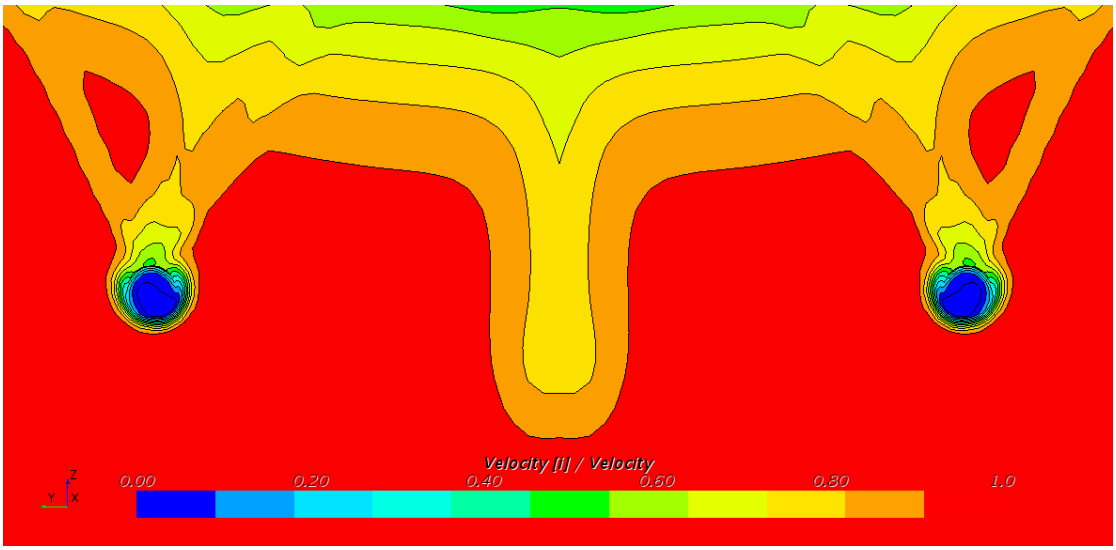
Slika 56. Polje nominalnog sustrujanja u ravnini brodskog vijka (Model 1, *k-ω* SST)



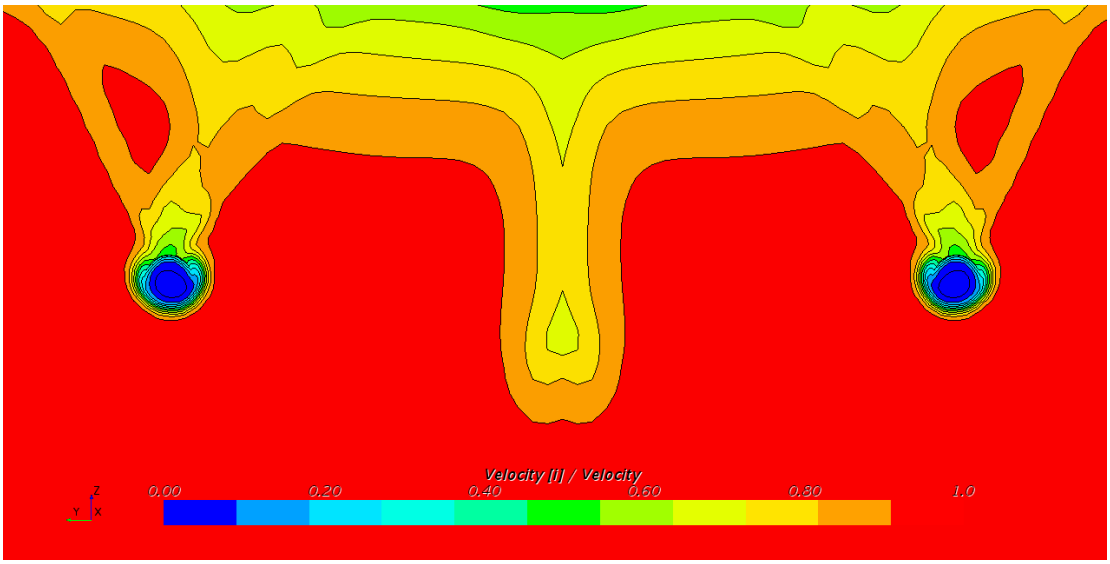
Slika 57. Polje nominalnog sustrujanja u brodskoj vijka (Model 1, *k-ε* realizible)



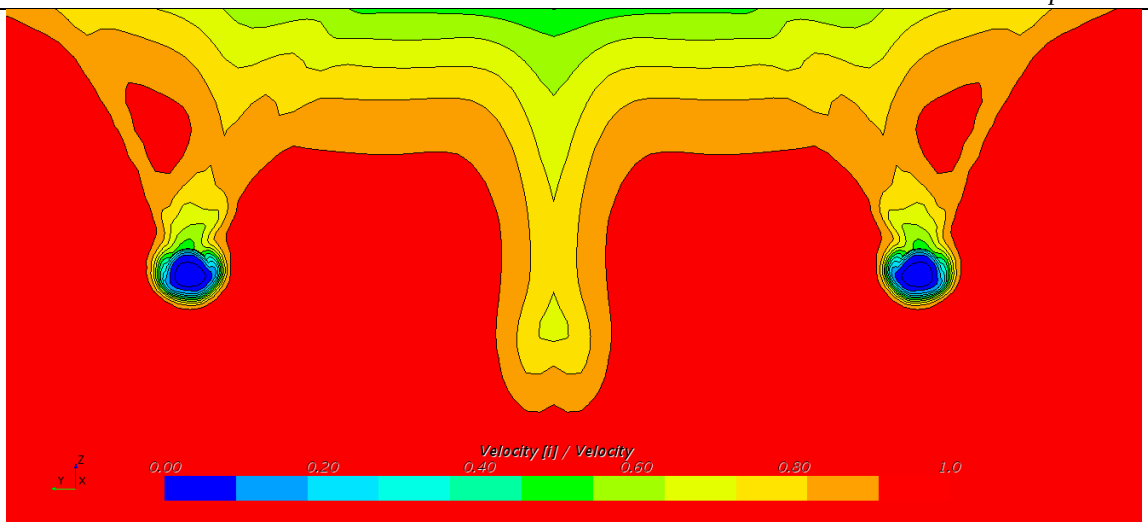
Slika 58. Polje nominalnog sustrujanja u brodskoj vijka (Model 1, RSM)



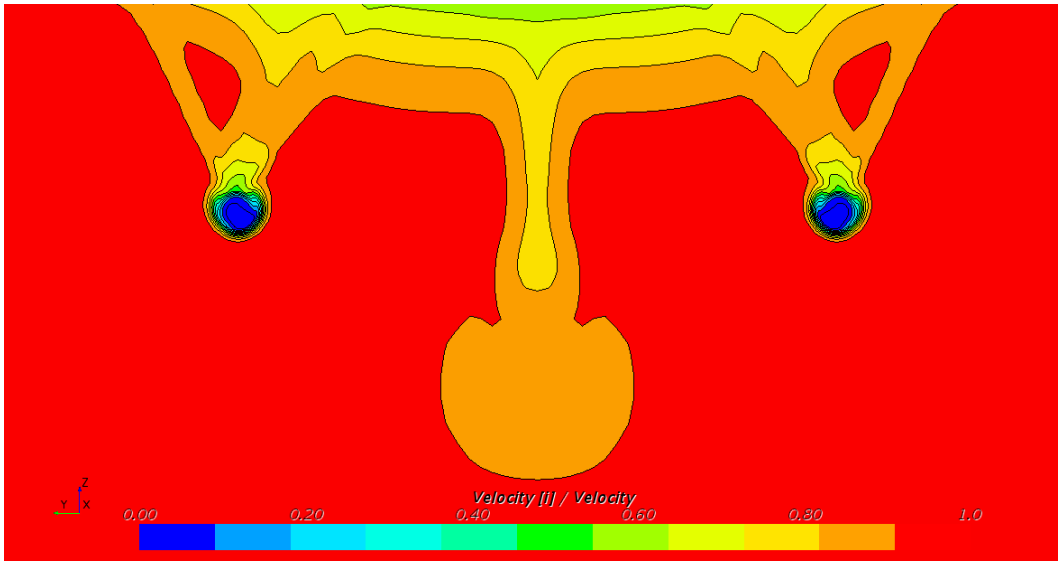
Slika 59. Polje nominalnog sustrujanja u ravnini brodskog vijka (Model 2, *k-ω* SST)



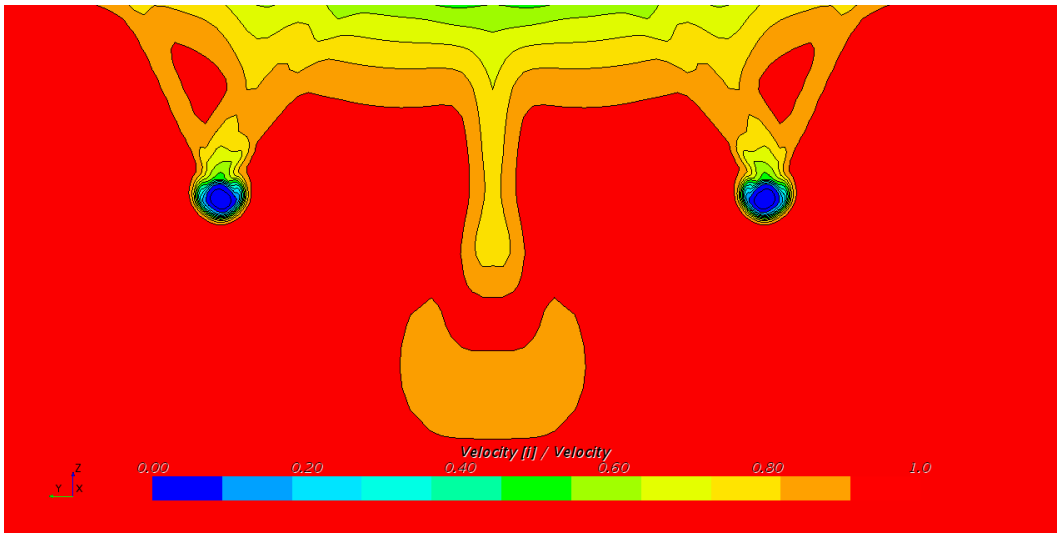
Slika 60. Polje nominalnog sustrujanja u ravnini brodskog vijka (Model 2, *k-ε* realizible)



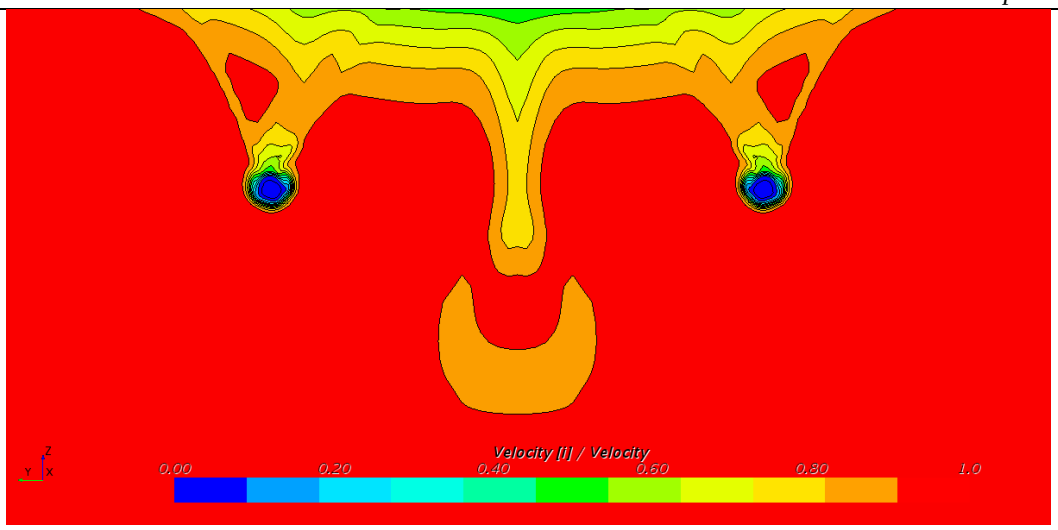
Slika 61. Polje nominalnog sustrujanja u ravnini brodskog vijka (Model 2, RSM)



Slika 62. Polje nominalnog sustrujanja u ravnini brodskog vijka (Model 3, *k-ω* SST)



Slika 63. Polje nominalnog sustrujanja u ravnini brodskog vijka (Model 3, *k-ε* realizible)



Slika 64. Polje nominalnog sustrujanja u ravnini brodskog vijka (Model 3, RSM)

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu provedene su numeričke simulacije pokusa otpora, kojima je ispitan utjecaj pramčanog bulba na ukupni otpor modela jahte. Dan je kratki uvod koji uključuje pregled literature dosadašnjih istraživanja povezanih s određivanjem otpora numeričkim simulacijama i smanjenjem otpora broda promjenom pramčanog dijela forme broda. Ukratko je objašnjena podjela ukupnog otpora broda te je opisana svaka komponenta otpora. Dan je matematički model numeričkih simulacija, koji se temelji na RANS jednadžbama. Numeričke simulacije provedene su za tri različite forme modela jahte pri brzini od 2,542 m/s, koja odgovara projektnoj brzini broda od 17 čvorova. Predstavljen je način definiranja proračunske domene i rubnih uvjeta, generiranja geometrijske mreže i odabira fizikalnog modela. Za potrebe verifikacije generirane su tri geometrijske mreže različite gustoće i korištena su tri različita vremenska koraka. Postupkom verifikacije najveća ukupna numerička nesigurnost dobivena je za Model 2 i iznosi 1,6 %, dok za druga dva modela ukupna nesigurnost ne prelazi 1 %. U radu su primijenjena tri modela turbulencije, k-ω SST, k-ε realizible i RSM, kako bi se ispitao utjecaj modela turbulencije na rezultate numeričke simulacije. Rezultati numeričkih simulacija pokusa otpora uspoređeni su s rezultatima pokusa otpora provedenih u bazenu *Schiffbautechnische Versuchsanstalt* u Beču. Validacija rezultata pokazala je vrlo dobro slaganje numeričkih i eksperimentalnih rezultata bez obzira na primijenjeni model turbulencije. Dobivena maksimalna relativna devijacija između numeričkih i eksperimentalnih rezultata iznosi 2,08 %. Eksperimentom je dobiveno smanjenje otpora od 7,65 % za Model 2 u odnosu na Model 1, dok je za Model 3 dobiveno smanjenje otpora od 3,65 % u odnosu na Model 1. Numeričkim simulacijama dobiveno je smanjenje otpora od oko 7 % za Model 2 u odnosu na Model 1 za sva tri modela turbulencije, dok je za Model 3 dobiveno smanjenje od oko 5 %, također za sva tri modela turbulencije. Usporedbom raspodjele hidrodinamičkog tlaka po trupu modela, pokazano je da je hidrodinamički tlak na Modelu 2 manji u odnosu na Model 1 i Model 3, što uzrokuje smanjenja ukupnog otpora broda. Na prikazu slike valova je vidljiv utjecaj pramčanog bulba na elevaciju vala te je prikazana povezanost između valnih elevacija i hidrodinamičkog tlaka. Konačno, dan je prikaz strujnica oko trupa modela i polje nominalnog sustrujanja u ravnini brodskog vijka. Vidljiv je jasan utjecaj promjene forme u pramčanom dijelu jahte na strujanje oko cijelog trupa. Također, pokazano je da odabir modela turbulencije utječe na rezultat polja nominalnog sustrujanja.

LITERATURA

[1] Degiuli, N.: Otpor i propulzija broda, interna skripta, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2018.

[2] Ahmed, Y., Soares, C.G.: Simulation of free surface flow around a VLCC hull using viscous and potential flow methods, Ocean Engineering, 2009., 36, 691-696.

[3] Choi, J.E., Min, K.S., Kim, J.H., Lee, S.B, Seo, H.W.: Resistance and propulsion characteristics of various commercial ships based on CFD results, Ocean Engineering, 2010., 37, 549-566.

[4] Banks, J., Phillips, A., Turnock, S. R.: Free surface CFD prediction of components of ship resistance for KCS, 13th Numerical Towing Tank Symposium, Duisburg, 2010.

[5] Kim, W.J, Van, D.H, Kim, D.H: Measurement of flows around modern commercial ship models, Experiments in Fluids, 2001., 31, 567-578.

[6] Farkas, A., Degiuli, N., Martić I.: Numerical simulation of viscous flow around a tanker model, Brodogradnja, 2017., 68 (2), 109-125.

[7] Chrismianto, D., Kiryanto, Arswendo Adietya, B.: Analysis of effect of bulbous bow shape to ship resistance in catamaran boat, Matec Web of Conferences, 2018., 159.

[8] Kracht, A. M.: SNAME Transactions 1978., 86, 197-217.

[9] Liu, Z., Liu, W., Chen, Q., Luo, F., Zhai, S.: , Ocean Engineering, 2020., 206, 107246.

[10] Niklas, K:, Pruszko, H.: Full scale CFD seakeeping simulations for case study ship redesigned from V-shaped bulbous bow to X-bow hull form, Applied Ocean Research, 2019., 89, 188-201.

[11] Lee, C., Yu, J., Choi, J., Lee, I.: Effect of bow hull forms on the resistance performance in calm water and waves for 66k DWT bulk carrier, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2019., 11, 723-735.

[12] Yu, J., Young, L.: Hull form design for the fore-body of medium sized passenger ship with gooseneck bulb, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2017., 9, 577-587.

[13] Radan, D.: Uvod u hidrodinamiku broda, Sveučilište u Dubrovniku, 2004.

[14] ITTC-Recommended Procedures, 7.5-02-05-01, 2002.

[15] Degiuli, N.: Eksperimentalno određivanje otpora valova serije Wigleyevih trimarana, Doktorat, 2001.

[16] Džijan, I., Virag, Z.: Računalna dinamika fluida, skripta-predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2014.

[17] Werner, A., Degiuli, N.: Mehanika fluida IIB, interna skripta, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2018.

[18] Ferziger, J.H., Perić, M.: Computational methods for fluid dynamics, 2002.

[19] Farkas, A., Degiuli, N., Martić, I.: Assessment of hydrodynamic characteristics of a full-scale ship at different draughts. Ocean Engineering, 2018., 156, 135-152.

[20] ITTC-Recommended Procedures and Guidelines, Uncertainty Analysis in CFD Verification and Validation, 2008., Procedure 7.5-03-01-01.

[21] Vlašić, D.: Numerička simulacija pokusa vlastitog pogona, Diplomski rad, 2017.

[22] Zeman, I.: Numeričko određivanje koeficijenta otpora trenja ravne ploče, Završni rad, 2019.

[23] Demirel Y.K., Khorasanchi M., Turan O., Incecik A., Schultz, M.P.: A CFD model for the frictional resistance prediction of antifouling coatings, Ocean Engineering, 2014., 89. 21-31.

[24] Izvješće modelskih ispitivanja u bazenu, *Schiffbautechnische Versuchsanstalt*, Beč, 2011.

[25] ITTC-Recommended Procedures and Guidelines, 7.5-03-02-03, 2011.

[26] STAR-CCM+ User Guide

[27] STAR-CCM+. Tutorials/Tutorial Guide/Marine Resistance Prediction: KCS Hull with a Rudder

[28] Farkas, A: Numerička simulacija viskoznog strujanja oko trupa broda, Diplomski rad, 2016.

[29] Voxakis, P.: Ship Hull Resistance Calculations Using CFD Methods, Diplomski rad, Massachussets Institute of Technology, Cambridge, 2012.

[30] ITTC – Recommended Procedures: Fresh Water and Seawater Properties, 7.5-02-01-03, 2011.

[31] Perić, M.: Set-Up Recommendations for Simulation of Flow Around Ship, interna komunikacija, 2016.

[32] ITTC (2011) The specialist committee on scaling of wake field-Final report and recommendations to the 26th ITTC. In: Proceedings of 26th ITTC-Volume II, Rio de Janeiro

[33] Farkas, A., Degiuli N., Martić, I., Dejhalla, R.: Numerical and experimental assessment of nominal wake for a bulk carrier, Journal of Marine Science and Technology, 2018. 4, 1092-1104.