

Utjecaj trima na ukupni otpor modela kontejnerskog broda u ograničenoj vodi

Anušić, Barbara

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:167068>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-25**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

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

Dr. sc. Ivana Martić, mag. ing. nav. arch.

Studentica:

Barbara Anušić

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se svojim mentoricama prof. dr. sc. Nastii Degiuli i dr. sc. Ivani Martić kao i asistentu Carlu Giorgiu Grlju, mag. ing. aeroing. na uloženom vremenu, pomoći i podršci koju su mi pružili.

Veliko hvala mojim roditeljima i sestri koji su mi ovo sve omogućili i uvijek me neizmjereno podržavali.

Također se želim zahvaliti svim svojim prijateljima te kolegama i kolegicama s Fakulteta na podršci i spremnosti da mi pomognu kad god je to bilo potrebno.

Barbara Anušić



| | |
|-------------------------------------|--------|
| Sveučilište u Zagrebu | |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | Prilog |
| Klasa: 602 – 04 / 24 – 06 / 01 | |
| Ur.broj: 15 – 24 – | |

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Barbara Anušić** JMBAG: **0035225013**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj trima na ukupni otpor modela kontejnerskog broda u ograničenoj vodi**

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

Opis zadatka:

Optimizacija trima jedna je od kratkoročnih mjera za povećanje energetske učinkovitosti broda predložena od strane Međunarodne pomorske organizacije. Većina dosadašnjih istraživanja usmjerena je prema optimizaciji trima broda u vodi neograničene dubine i širine. U plitkoj i ograničenoj vodi dolazi do promjene u strujanju oko trupa broda te optimalan trim broda u neograničenoj vodi ne odgovara nužno onom u vodi ograničene dubine i širine.

U završnom radu potrebno je, uz pomoć programskog paketa za računalnu dinamiku fluida, numerički simulirati pokus otpora modela broda u kanalu ograničene dubine i širine za različite vrijednosti trima. Pri tome treba koristiti model trodimenzijskog strujanja viskoznoг fluida sa slobodnom površinom.

U radu je potrebno:

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

Rezultate proračuna prikazati odgovarajućim tablicama, dijagramima i slikama.

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

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2023.

Datum predaje rada:

1. rok: 22. i 23. 2. 2024.
2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26. 2. – 1. 3. 2024.
2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadao:

Nashia Degiuli
Prof. dr. sc. Nashia Degiuli

Ivana Martić
Dr. sc. Ivana Martić

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović

Čatipović

SADRŽAJ

| | |
|---|-----|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | III |
| SAŽETAK | X |
| SUMMARY | XI |
| 1. UVOD | 1 |
| 2. OTPOR BRODA | 7 |
| 2.1. Otpor broda..... | 7 |
| 2.2. Podjela otpora..... | 8 |
| 2.3. Otpor broda u ograničenoj i plitkoj vodi..... | 10 |
| 2.4. Pokus otpora broda u plitkoj vodi..... | 13 |
| 2.5. Trim broda..... | 15 |
| 3. RAČUNALNA DINAMIKA FLUIDA | 17 |
| 3.2. Koraci numeričke simulacije..... | 17 |
| 3.3. Matematički model | 18 |
| 3.4. Osnovni zakoni i jednačbe dinamike fluida | 19 |
| 3.5. Reynoldsove osrednjene Navier – Stokesove jednačbe | 20 |
| 3.6. $k - \omega$ SST model turbulencije | 21 |
| 3.7. Zidne funkcije..... | 22 |
| 3.8. Metoda konačnih volumena | 24 |
| 3.9. Metoda udjela fluida u volumenu (VOF metoda) | 24 |
| 3.10. Verifikacija rezultata..... | 25 |
| 3.11. Validacija rezultata numeričkih simulacija | 27 |
| 4. PRIPREMA NUMERIČKIH SIMULACIJA | 28 |
| 4.1. Geometrijske značajke KCS modela broda..... | 28 |
| 4.2. Proračunska domena | 29 |
| 4.3. Rubni uvjeti | 30 |
| 4.4. Diskretizacija proračunske domene | 31 |
| 4.4.1. Generiranje geometrijske mreže | 31 |

| | |
|---|----|
| 4.4.2. Profinjenja oko trupa modela broda | 34 |
| 4.4.3. Granični sloj..... | 36 |
| 4.4.4. Slobodna površina..... | 38 |
| 4.4.5. Kelvinov kut | 38 |
| 4.5. Fizikalni model numeričke simulacije | 38 |
| 4.6. Parametar rješavača | 39 |
| 5. POSTAVKE NUMERIČKE SIMULACIJE ZA RAZLIČITE VRIJEDNOSTI TRIMA . | 41 |
| 5.1. Postavljanje kuta trima na modelu broda | 41 |
| 6. ANALIZA REZULTATA NUMERIČKE SIMULACIJE..... | 44 |
| 6.1. Verifikacija rezultata..... | 44 |
| 6.2. Validacija rezultata | 45 |
| 6.3. Prikaz i usporedba rezultata | 46 |
| 6.3.1.Usporedba rezultata..... | 47 |
| 6.3.2.Prikaz slobodne površine..... | 50 |
| 6.3.3. Slika valova | 51 |
| 6.3.4.Hidrodinamički tlak | 54 |
| 6.3.5.Tangencijalna naprezanja | 55 |
| 6.3.6. Polja brzine | 57 |
| 7. ZAKLJUČAK..... | 60 |

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 1. Shema raščlane otpora na komponente za površinske deplasmanske brodove [31] | 7 |
| Slika 2. Slike valova za različite vrijednosti Fn_h [33] | 11 |
| Slika 3. Schlichtingov dijagram za izračun smanjenja brzine broda u plitkoj vodi [33] | 13 |
| Slika 4. Prikaz smještaja linearno varijabilnih diferencijalnih transformatora (LVDT) [34] .. | 15 |
| Slika 5. Trim broda kod pomaka tereta [35] | 16 |
| Slika 6. Prikaz graničnog sloja pri strujanju fluida uz krutu stijenu [39] | 22 |
| Slika 7. Diskretizirani dio proračunske domene [37] | 24 |
| Slika 8. Prikaz polovine 3D modela broda | 29 |
| Slika 9. Proračunska domena za slučaj ograničene širine i dubine | 29 |
| Slika 10. Rubni uvjeti proračunske domene | 31 |
| Slika 11. Osnovni elementi heksaedarske ćelije [41] | 32 |
| Slika 12. Primjer dobrog i lošeg diskretiziranja graničnog sloja [37] | 32 |
| Slika 13. Proračunska domena diskretizirana grubom mrežom..... | 33 |
| Slika 14. Proračunska domena diskretizirana srednjom mrežom | 34 |
| Slika 15. Proračunska domena diskretizirana finom mrežom | 34 |
| Slika 16. Profinjenja oko krme i pramca | 35 |
| Slika 17. Generirana finija mreža u području pramca | 35 |
| Slika 18. Profinjenje mreže oko trupa modela broda | 35 |
| Slika 19. Prikaz prve ćelije graničnog sloja [41] | 36 |
| Slika 20. Diskretizacija graničnog sloja na dnu proračunske domene | 37 |
| Slika 21. Diskretizacija graničnog sloja na bočnoj granici proračunske domene | 37 |
| Slika 22. Diskretizacija graničnog sloja uz trup modela broda..... | 37 |
| Slika 23. Prikaz profinjenja slobodne površine..... | 38 |
| Slika 24. Odabrani fizikalni model za numeričke simulacije | 39 |
| Slika 25. Prikaz postavki za postavljanje modela broda na kut trima od $0,2^\circ$ | 41 |
| Slika 26. Model broda sa zategom od $0,4^\circ$ | 42 |
| Slika 27. Model broda s pretegom od $0,4^\circ$ | 42 |

| | |
|---|----|
| Slika 28. Prikaz volumetrijskih kontrola na krmi i pramcu nakon postavljanja modela broda na određeni kut trima..... | 42 |
| Slika 29. Volumetrijska profinjenja oko trupa modela broda nakon postavljanja modela broda na određeni kut trima..... | 43 |
| Slika 30. Raspodjela parametra y^+ duž trupa modela broda | 46 |
| Slika 31. Raspodjela parametra y^+ na dnu proračunske domene..... | 47 |
| Slika 32. Raspodjela parametra y^+ na bočnoj granici proračunske domene | 47 |
| Slika 33. Prikaz slobodne površine duž trupa modela broda na ravnoj vodnoj liniji..... | 50 |
| Slika 34. Prikaz slobodne površine duž trupa modela broda za kut trima od $0,2^\circ$ | 50 |
| Slika 35. Prikaz slobodne površine duž trupa modela broda za kut trima od $-0,2^\circ$ | 51 |
| Slika 36. Prikaz slobodne površine duž trupa modela broda za kut trima od $0,4^\circ$ | 51 |
| Slika 37. Prikaz slobodne površine duž trupa modela broda za kut trima od $-0,4^\circ$ | 51 |
| Slika 38. Slika valova za model broda na ravnoj vodnoj liniji | 52 |
| Slika 39. Slika valova za kut trima od $0,2^\circ$ | 52 |
| Slika 40. Slika valova za kut trima od $-0,2^\circ$ | 53 |
| Slika 41. Slika valova za kut trima od $0,4^\circ$ | 53 |
| Slika 42. Slika valova za kut trima od $-0,4^\circ$ | 53 |
| Slika 43. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka duž trupa modela broda na ravnoj vodnoj liniji . | 54 |
| Slika 44. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka duž trupa modela broda za kut trima od $0,2^\circ$ | 54 |
| Slika 45. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka duž trupa modela broda za kut trima od $-0,2^\circ$. | 55 |
| Slika 46. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka duž trupa modela broda za kut trima od $0,4^\circ$ | 55 |
| Slika 47. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka duž trupa modela broda za kut trima od $-0,4^\circ$. | 55 |
| Slika 48. Raspodjela tangencijalnih naprezanja po trupu modela broda na ravnoj vodnoj liniji | 56 |
| Slika 49. Raspodjela tangencijalnih naprezanja po trupu modela broda za kut trima od $0,2^\circ$. | 56 |
| Slika 50. Raspodjela tangencijalnih naprezanja po trupu modela broda za kut trima od $-0,2^\circ$ | 56 |
| Slika 51. Raspodjela tangencijalnih naprezanja po trupu modela broda za kut trima od $0,4^\circ$. | 57 |

| | |
|--|----|
| Slika 52. Raspodjela tangencijalnih naprežanja po trupu modela broda za kut trima od $-0,4^\circ$ | 57 |
| Slika 53. Polje brzina za model broda na ravnoj vodnoj liniji | 58 |
| Slika 54. Polje brzina za kut trima od $0,2^\circ$ | 58 |
| Slika 55. Polje brzina za kut trima od $-0,2^\circ$ | 58 |
| Slika 56. Polje brzina za kut trima od $0,4^\circ$ | 59 |
| Slika 57. Polje brzina za kut trima od $-0,4^\circ$ | 59 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1. Tipovi konvergencije..... | 26 |
| Tablica 2. Osnovne geometrijske značajke modela broda..... | 28 |
| Tablica 3. Postavke diskretizacije fine mreže..... | 33 |
| Tablica 4. Osnovne veličine i broj ćelija za pojedinu mrežu..... | 33 |
| Tablica 5. Odabrani vremenski koraci..... | 40 |
| Tablica 6. Rezultati verifikacije ukupnog otpora, urona i kuta trima modela broda dobiveni primjenom različite gustoće mreže..... | 44 |
| Tablica 7. Rezultati verifikacije ukupnog otpora, urona i kuta trima modela broda dobiveni primjenom različitog vremenskog koraka..... | 45 |
| Tablica 8. Ukupna numerička nesigurnost rezultata..... | 45 |
| Tablica 9. Rezultati modelskih ispitivanja za $Fn=0,469$ [34]..... | 45 |
| Tablica 10. Rezultati numeričke simulacije primjenom fine mreže i finog vremenskog koraka za $Fn=0,469$ | 46 |
| Tablica 11. Relativna devijacija ukupnog otpora, urona i trima modela broda pri $Fn=0,469$.. | 46 |
| Tablica 12. Rezultati numeričkih simulacija za ispitane kutove trima..... | 48 |
| Tablica 13. Rezultati ukupnog otpora iz literature [43]..... | 48 |
| Tablica 14. Otpor tlaka i otpor trenja za ispitane kutove trima..... | 49 |
| Tablica 15. Relativna devijacija otpora tlaka i otpora trenja za različite kutove trima u odnosu na ravnu vodnu liniju..... | 49 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|---------------|-----------------|---|
| A_x | m^2 | maksimalna poprečna površina uronjenog dijela trupa |
| B | m | širina broda |
| c_w | m/s | brzina valova u dubokoj vodi |
| $c_{w,s}$ | m/s | brzina valova u plitkoj vodi |
| C_{AA} | / | koeficijent dodatnog otpora |
| C_A | / | korelacijski dodatak |
| C_B | / | koeficijent punoće |
| C_F | / | koeficijent otpora trenja |
| C_P | / | koeficijent otpora tlaka |
| C_{PV} | / | koeficijent viskoznog otpora tlaka |
| C_R | / | koeficijent preostalog otpora |
| C_T | / | koeficijent ukupnog otpora |
| C_V | / | koeficijent viskoznog otpora |
| C_w | / | koeficijent otpora valova |
| D_{ij} | s^{-1} | tenzor brzine deformacije |
| f_i | m/s^2 | gustoća masene sile |
| \bar{f} | s | vremenski osrednjena vrijednost fizikalne veličine |
| f' | s | pulsirajuća komponenta fizikalne veličine |
| Fn | / | Froudeov broj |
| Fn_h | / | Froudeov broj na temelju dubine |
| g | m/s^2 | ubrzanje zemljine sile teže |
| h | m | dubina vode |
| k | / | faktor forme |
| k | m^2/s^2 | kinetička energija turbulencije |
| L | m | duljina broda |
| L_{PP} | m | duljina između okomica broda |
| L_w | m | duljina valova |
| M_t | Nm | moment trima |
| p | Pa | tlak |
| \bar{p} | Pa | vremenski osrednjeni tlak |
| p' | Pa | pulsirajuća komponenta tlaka |
| p_i | / | red točnosti |

| | | |
|----------------|----------------|--|
| \vec{P}_{PV} | Pa | vektor normalnog naprezanja uslijed viskoznosti |
| \vec{P}_W | Pa | vektor normalnog naprezanja uslijed valova |
| R_F | N | otpor trenja |
| R_i | / | omjer konvergencije |
| Rn | / | Reynoldsov broj |
| R_p | N | otpor tlaka |
| R_{PV} | N | viskozni otpor tlaka |
| R_T | N | ukupni otpor broda |
| R_{T_EKS} | N | ukupni otpor broda dobiven eksperimentalnim putem |
| R_{T_RDF} | N | ukupni otpor broda dobiven numeričkom simulacijom |
| R_v | N | viskozni otpor |
| R_W | N | otpor valova |
| RD | % | relativna devijacija |
| r_i | / | omjer profinjenja |
| S | m ² | oplakana površina |
| \hat{S}_i | / | vrijednost rezultata numeričke simulacije |
| S_L | / | najmanja vrijednost numeričkog rješenja |
| S_U | / | najveća vrijednost numeričkog rješenja |
| t | s | vrijeme |
| t | m | trim broda |
| t_p | m | pramčani trim |
| t_k | m | krmeni trim |
| T | m | gaz broda |
| \bar{u} | m/s | komponenta brzine strujanja paralelno sa stijenkom |
| u^+ | / | bezdimenzijska brzina |
| U_i | / | numerička nesigurnost |
| U_{SN} | / | ukupna numerička nesigurnost |
| U_T | / | nesigurnost vremenskog koraka |
| U_G | / | nesigurnost gustoće mreže |
| U_I | / | nesigurnost broja iteracija |
| U_P | / | nesigurnost ostalih parametara |
| u_τ | m/s | brzina trenja |
| v | m/s | brzina broda |
| KV | m ³ | kontrolni volumen |
| ∇ | m ³ | volumen istisnine |

| | | |
|--------------------------|-----------|---|
| V_i | m^3 | volumen i -tog fluida unutar kontrolnog volumena |
| v_i | m/s | vektor brzine |
| v_{krit} | m/s | kritična brzina |
| v_{ss} | m/s | brzina broda u slučaju ograničene dubine |
| \bar{v}_i | m/s | vremenski osrednjena komponenta brzine |
| v_i' | m/s | pulsirajuća komponenta brzine |
| y^+ | / | bezdimenzijska udaljenost od stijenke |
| α_i | / | volumni udio pojedinog fluida u kontrolnom volumenu |
| Δ | t | masa istisnine |
| ΔC | / | razlika brzina broda |
| Δv_p | / | dodatni pad brzine |
| δ_{ij} | / | Kroneckerov delta simbol |
| $\delta_{RE_i,1}^{*(1)}$ | / | numerička greška |
| ε_i | / | razlika rezultata |
| κ | / | Von Karmanova konstanta |
| λ | / | mjerilo geometrijske sličnosti |
| μ_t | Pas | dinamički koeficijent turbulentne viskoznosti |
| μ | Pas | dinamički koeficijent viskoznosti |
| ν | m^2/s | kinematički koeficijent viskoznosti |
| ρ_s | kg/m^3 | gustoća mora |
| ρ | kg/m^3 | gustoća fluida |
| Σ_{ij} | N/m^2 | devijatorski dio tenzora naprezanja |
| σ_{ij} | N/m^2 | tenzor naprezanja |
| τ | N/m^2 | tangencijalno naprezanje |
| τ_w | N/m^2 | tangencijalno naprezanje na stijenci |
| ω | m^2/s^3 | specifična brzina disipacije turbulentne kinetičke energije |

SAŽETAK

U ovom radu provedene su numeričke simulacije pokusa otpora KCS modela broda primjenom računalne dinamike fluida pomoću programskog paketa STAR – CCM+. U numeričkim simulacijama korišten je model nestacionarnog trodimenzijskog strujanja viskoznog fluida sa slobodnom površinom temeljen na Reynoldsovim osrednjenim Navier – Stokesovim (RANS) jednadžbama te $k-\omega$ SST modelu turbulencije. Primijenjena je metoda udjela fluida u volumenu (VOF) s ciljem određivanja položaja slobodne površine. Numeričke simulacije provedene su za ravnu vodnu liniju te četiri kuta trima za jedan Froudeov broj u vodi ograničene širine i dubine. Proveden je postupak verifikacije primjenom mreža različitih gustoća i vremenskih koraka te je izračunata numerička nesigurnost pri određivanju ukupnog otpora, urona i kuta trima. Dobiveni numerički rezultati uspoređeni su s eksperimentalnim rezultatima dostupnim u literaturi. Provedena je detaljna analiza položaja slobodne površine, slike valova, raspodjele hidrodinamičkog tlaka i tangencijalnih naprezanja, strujanja oko modela broda te polja brzine na simetralnoj ravnini. Dana je usporedba dobivenih vrijednosti ukupnog otpora za ravnu vodnu liniju i sve ispitane kutove trima. Zaključeno je da je podešavanjem kuta trima moguće smanjiti ukupni otpor modela broda u ograničenoj i plitkoj vodi s ciljem postizanja veće energetske učinkovitosti broda u ograničenim plovnim putovima.

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

SUMMARY

In this study, numerical simulations of resistance tests for the KCS ship model are carried out within a commercial software package STAR – CCM+ for computational fluid dynamics. A mathematical model of unsteady three–dimensional viscous flow with a free surface based on Reynolds Averaged Navier – Stokes (RANS) equations and the $k – \omega$ SST turbulence model is applied. The volume of fluid (VOF) method is used to track and locate the free surface. Numerical simulations are performed for an even keel and four trim angles for one Froude number in water of limited width and depth. The verification study is carried out using different grid resolutions and time steps, and the numerical uncertainty for the total resistance, sinkage, and trim angle is calculated. The obtained numerical results are compared with the experimental results available in the literature. A detailed analysis of the free surface elevation, wave patterns, distribution of hydrodynamic pressure and wall shear stress, flow around the ship model, and velocity field on the symmetry plane is carried out. A comparison of the obtained values of total resistance for an even keel and all considered trim angles is given. It has been concluded that it is possible to reduce the total resistance of the ship model in constrained and shallow water by adjusting the trim angle to increase the ship energy efficiency in restricted waterways.

Key words: trim angle, resistance test, confined and shallow water, computational fluid dynamics, Reynolds Averaged Navier–Stokes equations, Volume of Fluid method, $k – \omega$ SST turbulence model

1. UVOD

Uslijed globalnih klimatskih promjena i sve većeg inzistiranja na održivoj plovidbi jedan od glavnih zahtjeva kod projektiranja broda je smanjenje potrošnje goriva odnosno emisije štetnih plinova s ciljem smanjenja troškova plovidbe te ispunjenja zahtjeva nametnutih od strane Međunarodne pomorske organizacije (eng. IMO – *International Maritime Organisation*). To je moguće postići smanjenjem ukupnog otpora broda. Naime, brod je projektiran i optimiran za određenu projektnu brzinu, gaz te zadano stanje opterećenja s ciljem postizanja najmanjeg ukupnog otpora. Međutim, tijekom službe brod se susreće s različitim uvjetima plovidbe što utječe na promjenu gaza i trima broda. Pri plovidbi broda u plitkoj vodi može doći do smanjenja brzine broda do 30 %, a u ograničenom plovnom putu smanjenje brzine može iznositi i do 60 %. Uzrok značajnog smanjenja brzine broda u ograničenom plovnom putu ne leži samo u povećanju ukupnog otpora, već i u promjeni značajki upravljivosti broda. Plovidba u ograničenim plovnim putevima nerijetko uzrokuje nesreće poput nasukavanja broda ili udaranja broda o dno. Prema tome vrlo je važno analizirati promjene u strujanju oko trupa broda u ograničenim plovnim putevima, što je moguće primjenom raznih empirijskih, analitičkih, numeričkih te eksperimentalnih metoda. Jedna od mjera za smanjenje ukupnog otpora te posljedično i emisije štetnih plinova predložena od strane IMO-a je optimizacija trima broda. Optimizacija trima provodi se balastiranjem ili odabirom odgovarajućeg stanja krcanja čime je moguće značajno smanjiti ukupni otpor broda pri odgovarajućem gasu i brzini bez potrebe za mijenjanjem forme trupa broda ili broskog vijka. Istraživanja su pokazala kako za svaki gaz i brzinu postoji optimalan trim broda s najmanjim ukupnim otporom. Promjenom trima broda mijenja se oblik uronjenog dijela trupa (posebno na krmi i pramcu), oplakana površina te duljina vodne linije. Sve ove značajke imaju važan utjecaj na ukupni otpor broda pri određenoj brzini i stanju opterećenja. U području plitke vode također je moguće optimirati trim s ciljem postizanja najmanjeg ukupnog otpora broda. Na temelju početnog trima u dubokoj vodi moguće je utjecati na trim, koji se potencijalno može javiti u plitkoj vodi te dovesti do udaranja pramca ili krme o dno [1].

Uobičajene metode za predviđanje ukupnog otpora broda su eksperimentalna ispitivanja te numeričke metode. Eksperimentalna ispitivanja koja se provode u bazenima za tegljenje modela brodova dugotrajna su i skupa, ali u kombinaciji s numeričkim metodama omogućuju potpuni uvid u hidrodinamičke značajke broda. Numeričke metode pokazale su se puno praktičnijima prilikom projektiranja te optimizacije forme broda. Računalna dinamika fluida

(RDF) numerička je metoda koja u odnosu na eksperimentalna ispitivanja omogućuje detaljniji uvid u strujanje oko trupa broda. Unutar RDF-a više je pristupa rješavanju matematičkog modela pri čemu se najčešće koriste Reynoldsove osrednjene Navier – Stokesove (RANS) jednačbe, koje omogućuju rješenje zadovoljavajuće točnosti uz razumno vrijeme potrebno za provedbu numeričkih simulacija.

U ovom radu istražen je utjecaj trima na ukupni otpor modela broda u ograničenom plovnom putu primjenom RANS jednačbi. Numeričke simulacije pokusa otpora provedene su za model KCS kontejnerskog broda za ravnu vodnu liniju te za četiri vrijednosti kuta trima. Dobiveni numerički rezultati uspoređeni su s rezultatima eksperimentalnih ispitivanja dostupnim u literaturi. S ciljem određivanja numeričke nesigurnosti ukupnog otpora, urona i kuta trima broda proveden je postupak verifikacije za tri gustoće mreže te tri vremenska koraka. Korišten je $k - \omega$ SST model turbulencije te metoda udjela fluida u volumenu (eng. *Volume of Fluid*, VOF) za određivanje položaja slobodne površine.

1.1. Pregled literature

U ovom potpoglavlju dan je pregled istraživanja vezanih uz ispitivanje utjecaja trima na smanjenje ukupnog otpora broda, ukupnog otpora u ograničenoj vodi te utjecaja postavki numeričkih simulacija na dobivene rezultate.

Grlj et al. [2] proveli su ispitivanje ukupnog otpora modela kontejnerskog broda i broda u naravi koristeći računalnu dinamiku fluida (RDF). Naglasili su važnost određivanja numeričkih postavki kako bi se postigli što točniji rezultati. Pokazali su utjecaj numeričkih značajki na ukupni otpor, sliku valova i gibanje broda. Za provedbu numeričkih simulacija koristili su RANS jednačbe diskretizirane metodom konačnih volumena. Položaj slobodne površine odredili su koristeći VOF metodu. Za provedbu verifikacije koristili su GCI metodu (eng. *Grid Convergence Indeks*). Rezultati su pokazali da numerička shema prvog reda omogućuje bržu konvergenciju rezultata za brod u naravi. Farkas et al. [3] proveli su numeričke simulacije viskozno strujanja fluida oko modela tankera koristeći programski paket STAR-CCM+. Matematički model temeljen je na RANS jednačbama, $k - \varepsilon$ modelu turbulencije i metodi udjela fluida u volumenu. Ispitali su utjecaj različite gustoće mreže na rezultate ukupnog otpora. Dobivene rezultate validirali su na temelju rezultata modelskih ispitivanja provedenih u Brodarskom institutu za širok raspon vrijednosti Froudeovih brojeva. Autori su pokazali da se rezultati numeričkih simulacija za sve tri gustoće mreže zadovoljavajuće slažu s eksperimentalnim rezultatima. Također su ispitali utjecaj mjerila modela primjenom RDF-a.

Farkas et al. [4] ispitivali su značajke otpora i propulzije handymax broda za rasuti teret u stvarnoj veličini. Za potrebe numeričkih simulacija pokusa otpora, slobodne vožnje i vlastitog pogona koristili su RANS jednadžbe i VOF metodu. Ispitivanje su proveli za tri različita stanja opterećenja broda pri dvije brzine. Autori su proveli postupak verifikacije te izračunali numeričku nesigurnost. Pokusi su provedeni u Brodarskom institutu, a dobiveni rezultati su ekstrapolirani koristeći pet različitih metoda ekstrapolacije. Autori su proveli postupak validacije pri čemu su dobivene numeričke rezultate ukupnog otpora te značajke slobodne vožnje i vlastitog pogona usporedili s eksperimentalnim rezultatima. Pokazana je važnost primjene RDF-a s ciljem poboljšanja ekstrapolacijskih metoda. Autori su ukazali na prednosti i nedostatke ekstrapolacijskih metoda te je dana usporedba rezultata dobivenih primjenom četiri modela turbulencije.

Martić et al. [5] proveli su ispitivanje utjecaja plitke vode na ukupni otpor solarnog katamarana SolarCat koristeći programski paket STAR-CCM+ za RDF. Modelirali su nestlačivo viskozno strujanje fluida primjenom RANS jednadžbi te $k-\omega$ SST modela turbulencije. RANS jednadžbe diskretizirali su metodom konačnih volumena, dok su položaj slobodne površine odredili metodom udjela fluida u volumenu. Za uvjete plitke vode koristili su algoritam deformacije mreže. Numeričke simulacije proveli su za tri različita omjera dubine i gaza broda pri dvije brzine. Proveli su postupak verifikacije i izračunali ukupnu numeričku nesigurnost ukupnog otpora i urona katamarana te izvršili detaljnu analizu strujanja fluida oko katamarana. Sherbaz i Duan [6] ispitivali su utjecaj trima na ukupni otpor modela KRISO kontejnerskog broda (KCS) te su ustanovili kako se s malim podešavanjem trima na krmi smanjuje ukupni otpor broda u iznosu od 2,29 %. Islam i Soares [7] ispitivali su smanjenje ukupnog otpora broda variranjem gaza i trima koristeći programski paket otvorenog pristupa OpenFOAM. Zaključili su da je moguće značajno smanjiti ukupni otpor broda, čak do 3,9 % odgovarajućom kombinacijom trima i gaza broda. Sun et al. [8] su koristili kombiniranu eksperimentalno-numeričku metodu za ispitivanje ukupnog otpora 4250 TEU kontejnerskog broda. Izvršili su optimizaciju trima s obzirom na ukupni otpor modela broda te je ustanovljeno da za svaki gaz i za brzinu postoji različit optimalni trim. Shivachev et al. [9] svojim su istraživanjima predvidjeli da će otpor KCS broda biti najmanji u slučaju zatege u rasponu Froudeovih brojeva od 0,18 do 0,26. Le et al. [1] istraživali su utjecaj trima i gaza na ukupni otpor DTMB 5415 broda Američke ratne mornarice. Rezultati istraživanja su pokazali da je moguće postići

smanjenje ukupnog otpora od 1,5 % , dok se za otpor tlaka može postići smanjenje i do 8 %.

Iakovatos et al. [10] ispitivali su ovisnost ukupnog otpora broda o trimu za šest modela brodova koristeći RDF. Naglasili su važnost uronjenosti krmenog zrcala te njegov utjecaj na ukupni otpor broda. Također su prisutnost bulba na pramcu označili kao ključan faktor pri smanjenju ukupnog otpora broda. Degiuli et al. [11] ispitali su utjecaj oblika pramca na ukupni otpor jahte primjenom modelskih ispitivanja i numeričkih simulacija. Proveli su postupak verifikacije i validacije te je dobiveno zadovoljavajuće slaganje rezultata. Autori su usporedili rezultate ukupnog otpora dobivenog primjenom tri različita modela turbulencije. Primjenom RDF-a analizirali su strujanje fluida oko jahte te ustanovili kako pramčani bulb smanjuje valne elevacije te može uzrokovati smanjenje ukupnog otpora do 7 %. Sogihara et al. [12] odredili su optimalan trim za dva vitka trupa s ciljem poboljšanja energetske učinkovitosti. Proveli su pokus vlastitog pogona te odredili utjecaj trima na snagu predanu vijku. Na temelju dobivenih rezultata zaključili su da je komponenta otpora valova, koju je moguće optimirati, odgovorna za spomenute promjene te da je promjena otpora trenja proporcionalna oplakanoj površini broda. Farkas et al. [13] proveli su istraživanje strujanja fluida oko S60 katamarana i S60 jednotrupca. Numeričke simulacije provedene su za šest Froudeovih brojeva u rasponu od 0,33-0,55. Proveli su postupak validacije i pri tom usporedili dobivene numeričke rezultate s dostupnim eksperimentalnim rezultatima. Utjecaj interferencije na ukupan otpor katamarana proučavali su na temelju faktora interferencije, pri čemu je faktor forme jednotrupca različit od faktora forme katamarana. Rezultati su pokazali da je strujanje u poprečnom smjeru povezano s faktorom interferencije. Moustafa et al. [14] proveli su numeričko istraživanje ukupnog otpora broda te su zaključili da ukupni otpor ovisi o trimu i gazu te posljedično i duljini vodne linije. Time su dokazali kako se najmanji ukupni otpor postiže kada je duljina vodne linije najmanja. Duan et al. [15] su na temelju provedenih ispitivanja zaključili kako se otpor trenja broda jako malo mijenja uslijed promjene trima te da se najviše mijenja s promjenom oplakane površine broda. Islam i Soares [16] koristili su RANS jednadžbe za ispitivanje utjecaja trima na ukupni otpor kontejnerskog broda za različita stanja krcanja. Ustanovili su kako optimalni trim ovisi o brzini te gazu broda.

Tuck [17] je analizirao strujanje oko vitkog trupa u plitkoj vodi i predložio formule za predviđanje otpora valova, urona i trima pri podkritičnim i nadkritičnim brzinama. Gourlay [18] je koristio teorijsku metodu temeljenu na linearnoj superpoziciji rješenja strujanja fluida

oko vitkih tijela u plitkoj vodi kako bi predvidio uron i trim dva broda koji se međusobno mimoilaze, bilo gibanjem iz suprotnih smjerova ili dok jedan brod prelazi drugog. Sergent et al. [19] predložili su novi matematički izraz na temelju 2D analitičkog modela kako bi procijenili nestabilan ravnotežni položaj broda tijekom vertikalnih oscilacija, kao funkciju parametara kanala i broda. Alderf [20] je prikazao utjecaj topografije morskog dna na strujanje fluida oko trupa broda koji plovi kritičnom brzinom. Ovaj model omogućuje rezultate dinamičkog odziva broda u vrlo ograničenim kanalima s proizvoljnim oblikom morskog dna. Yazaki et al. [21] proveli su ispitivanje s modelom tankera kako bi razjasnili odnos između ukupnog otpora i trima broda u balastnom stanju. Yanagihara i Kawakami [22] proveli su pokus otpora, slobodne vožnje i vlastitog pogona modela broda za rasuti teret s ciljem istraživanja utjecaja stanja krcanja na propulzijske značajke. Tsugane et al. [23] istražili su mogućnost uštede goriva primjenom modelskih ispitivanja i mjerenja u naravi te su zaključili da u određenim slučajevima pretega može smanjiti potrošnju goriva. Larsen et al. [24] proveli su modelska ispitivanja variranjem trima pri određenom gazu, istražili su utjecaj trima na koeficijent ukupnog otpora i propulzijske značajke te su došli do sličnog zaključka kao i Tsugane et al. Tu et al. [25] predložili su detaljnu metodologiju za određivanje utjecaja trima na ukupni otpor modela broda primjenom eksperimentalne dinamike fluida (eng. *Experimental Fluid Dynamics*, EFD) i RDF-a s ciljem određivanja utjecaja trima na ukupni otpor te pokazali dobro slaganje rezultata.

Lv et al. [26] koristili su panelnu metodu za izračun otpora valova modela broda pri različitim vrijednostima trima te su kao rezultat odredili vrijednost trima pri kojem se postiže najmanji otpor valova. Tuck [27] je razvio teoriju vitkog tijela koristeći usklađene asimptotske razvoje s ciljem rješavanja hidrodinamičkih problema broda u plitkoj vodi konstantne dubine. Predložio je izraze za predviđanje ukupnog otpora, otpora valova i vertikalnih sila pri podkritičnim i nadkritičnim brzinama. Koristio je vertikalne sile kako bi dobio uron i trim broda. Ustanovljeno je da njegovi numerički rezultati odgovaraju eksperimentalnim rezultatima, dok je jedini nedostatak u njegovoj teoriji singularnost funkcija kada je vrijednost brzine broda bliska vrijednosti brzine valova u plitkoj vodi. Na temelju njegovog istraživanja zaključeno je da je uron izraženiji pri podkritičnim brzinama, dok je trim izraženiji pri nadkritičnim brzinama. Yao i Zou [28] proveli su numeričko istraživanje kako bi predvidjeli uron i trim broda koji

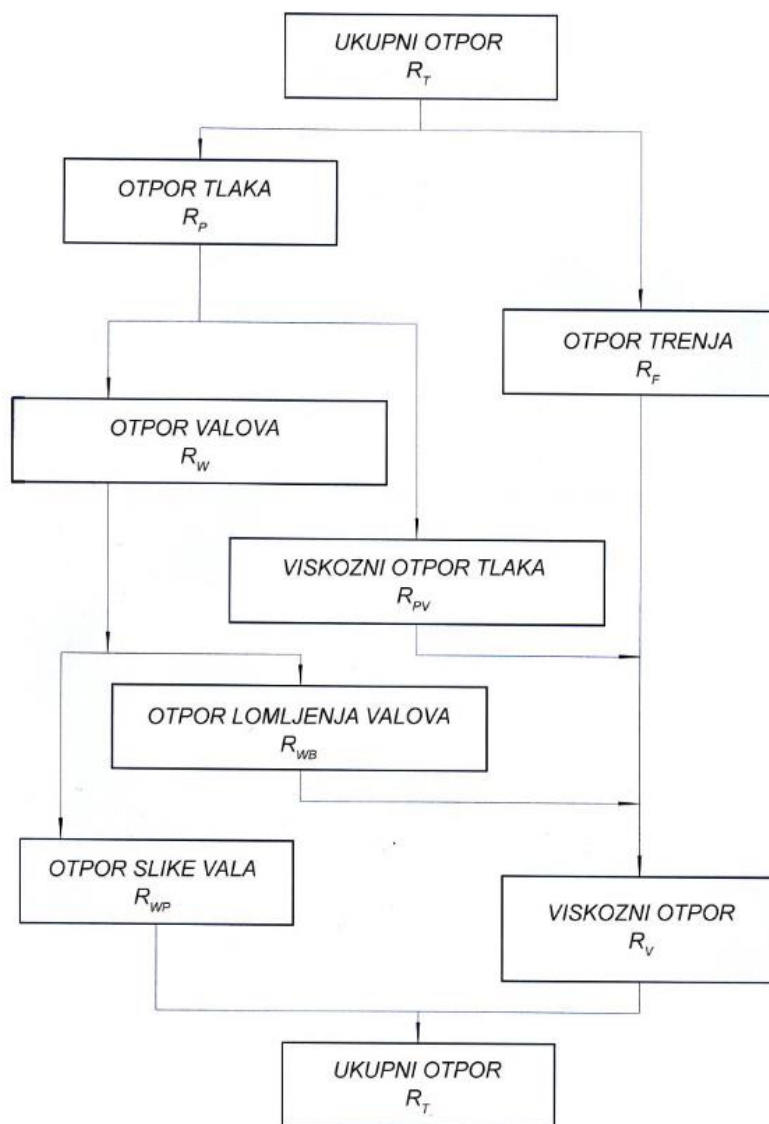
napreduje u plitkom kanalu koristeći 3D panelnu metodu prvog reda. Diskretizirali su površinu trupa, slobodnu površinu i površinu stijenke kanala panelima s raspodijeljenim Rankine - ovim izvorima konstantnog kapaciteta. U svojoj teoriji koristili su nelinearni rubni uvjet na slobodnoj površini. Izračunali su vertikalnu silu i momente nagiba integriranjem hidrodinamičkog tlaka po oplakanoj površini trupa broda te su dobili vrijednosti urona i trima iz uvjeta dinamičke ravnoteže. Proveli su proračun za model broda Serije 60 s koeficijentom punoće 0,6 u ograničenom kanalu. Usporedbom dobivenih numeričkih rezultata, koji obuhvaćaju uron, trim, otpor valova i sliku valova pri podkritičnim i nadkritičnim brzinama, pokazano je zadovoljavajuće slaganje s eksperimentalnim rezultatima. Alidadi i Calisal [29] proveli su numeričko istraživanje s ciljem predviđanja urona i trima Wigley forme trupa broda. Razvili su 2D metodu konačnih elemenata koristeći teoriju vitkog tijela. Za izračun strujanja u području slobodne površine koristili su mješoviti Eulerov-Lagrangeov pristup. Također su proveli postupak validacije uspoređujući profil vala i ukupni otpor broda s eksperimentalnim rezultatima te su pokazali da se numerički rezultati dobro slažu s eksperimentalnim rezultatima pri različitim brzinama broda. Prakash i Chandra [30] proučavali su utjecaj ograničene vode na otpor broda pri različitim brzinama, koristeći RANS rješavač unutar programskog paketa Fluent. Zaključili su da se RDF može uspješno primijeniti u predviđanju ukupnog otpora broda i slike valova u plitkoj vodi.

2. OTPOR BRODA

2.1. Otpor broda

Otpor broda je sila kojom tekućina djeluje u suprotnom smjeru od smjera gibanja broda. Brod tijekom plovidbe uzrokuje poremećaje u medijima kroz koje prolazi, a to su zrak i voda. Ukupni otpor broda moguće je podijeliti na nekoliko komponenti, što olakšava teorijsko i eksperimentalno određivanje otpora [31].

Podjela otpora prikazana je na slici 1.



Slika 1. Shema raščlane otpora na komponente za površinske deplasmane brodove

[31]

Ukupni otpor R_T može se izraziti preko koeficijenta ukupnog otpora C_T koji je ovisan o Reynoldsovom i Froudeovom broju:

$$C_T = f(Rn, Fn) = \frac{R_T}{\frac{1}{2}\rho v^2 S} \quad (1)$$

gdje je:

ρ – gustoća fluida,

v – brzina broda,

S – oplakana površina.

Reynoldsov broj, koji predstavlja omjer inercijskih i viskoznih sila i Froudeov broj, koji predstavlja omjer inercijskih te gravitacijskih sila dani su sljedećim izrazima:

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

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

gdje je:

L – duljina broda,

g – ubrzanje Zemljine sile teže,

ν – kinematički koeficijent viskoznosti.

2.2. Podjela otpora

Na infinitezimalni dio površine uronjenog dijela trupa broda djeluje vektor naprezanja, kojeg je moguće izraziti putem vektora tangencijalnog i normalnog naprezanja. Kada bi raspodjela tangencijalnog i normalnog naprezanja bila poznata u analitičkom obliku ukupni otpor bilo bi moguće odrediti kako slijedi:

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

Ovom podjelom, koja se temelji na spoznaji kako tekućina djeluje na trup broda raspodijeljenim površinskim silama, ukupni otpor podijeljen je na dvije komponente, na otpor trenja što je predstavljeno prvim integralom na desnoj strani jednadžbe (4) te na otpor tlaka što je dano drugim integralom na desnoj strani jednadžbe (4).

Obzirom da viskoznost fluida ima važan utjecaj na strujanje oko trupa broda u područjima graničnog sloja te hidrodinamičkog traga, ukupni otpor broda može se podijeliti na viskozni otpor i na otpor valova:

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

gdje je:

R_V – viskozni otpor (funkcija Reynoldsovog broja),

R_W – otpor valova (funkcija Frodueovog broja).

Viskozni otpor dijeli se na otpor trenja i viskozni otpor tlaka:

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

gdje je:

R_F – otpor trenja,

R_{PV} – viskozni otpor tlaka.

Otpor trenja nastaje djelovanjem tangencijalnih naprezanja po oplakanoj površini broda kao posljedica interakcije tekućine i oplata broda. Viskozni otpor tlaka jest komponenta otpora koja se ne može izravno mjeriti, a određuje se integracijom normalnih naprezanja uslijed viskoznosti te turbulencije. Naziva se još i otpor forme.

Obzirom da su mjerenja pokazala kako je nemoguće unutar viskozne tekućine postići tlak koji bi postojao u idealnoj tekućini bez stvaranja valova na površini, vektor hidrodinamičkog tlaka moguće je izraziti na temelju normalnog naprezanja uslijed viskoznosti i normalnog naprezanja uslijed valova kako slijedi:

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

Na temelju jednadžbe (7) otpor tlaka može se zapisati kao:

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

Konačno, izraz za ukupni otpor glasi:

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

gdje je:

C_F – koeficijent otpora trenja,

C_{PV} – koeficijent viskoznog otpora tlaka,

C_W – koeficijent otpora valova,

C_{AA} – koeficijent dodatnog otpora.

2.3. Otpor broda u ograničenoj i plitkoj vodi

Prilikom plovidbe broda u vodi ograničene dubine, odnosno plitkoj vodi (eng. *shallow water*), dolazi do promjena u strujanju oko trupa broda uslijed sve izraženije interakcije broda i dna. Zbog manjeg prostora između dna broda i dna plovnog puta brzina strujanja vode se povećava te uzrokuje niži tlak ispod i oko trupa što dovodi do dodatnog urona broda te povećanja otpora valova. Valovi koji nastaju gibanjem broda u plitkoj vodi dulji su nego valovi u vodi neograničene dubine za isti iznos brzine [32].

Brzina valova u dubokoj vodi određena je sljedećim izrazom:

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

dok je brzina valova u plitkoj vodi dana sljedećim izrazom:

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

gdje je:

c_w – brzina valova u dubokoj vodi,

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

L_w – duljina vala,

h – dubina vode.

Ako je dubina vode veća ili jednaka polovini duljine vala $h = \frac{L_w}{2}$ vrijedi da je:

$$\operatorname{th} \frac{2\pi L_w}{L_w} = \operatorname{th} \pi = 0.996 \quad (12)$$

Temeljem jednadžbe (12) dubina vode može se smatrati neograničenom u slučaju da je dubina vode veća ili jednaka polovini duljine vala $h = \frac{L_w}{2}$, a brzina valova jednaka je brzini valova u neograničenoj vodi.

Za slučaj jako plitke vode zbog male vrijednosti $\frac{2\pi h}{L_w}$ vrijedi:

$$\operatorname{th} \frac{2\pi h}{L_w} \approx \frac{2\pi h}{L_w} \quad (13)$$

iz čega proizlazi da je brzina valova u plitkoj vodi ovisna samo o dubini vode:

$$c_{w,s} = \sqrt{\frac{gL_w}{2\pi} \frac{2\pi h}{L_w}} = \sqrt{gh} \quad (14)$$

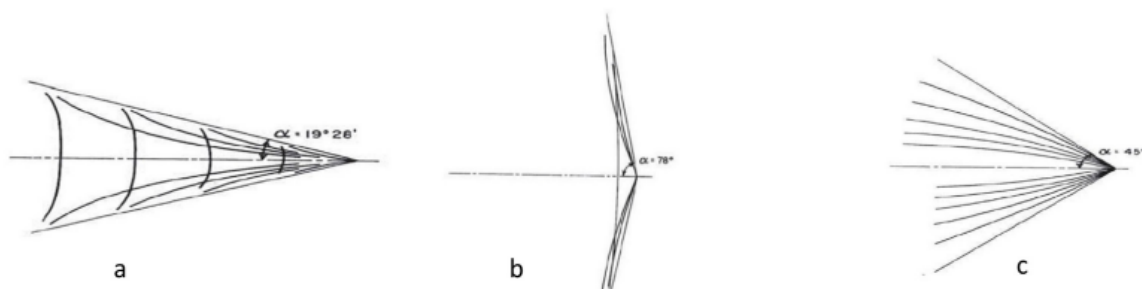
Ako je brzina broda $v < \sqrt{gh}$, radi se o podkritičnoj brzini broda, a ako je $v > \sqrt{gh}$ o nadkritičnoj brzini broda.

Većina deplasmanskih brodova plovi podkritičnim brzinama, a iznimke su razarači, brzi trajekti te slični tipovi brodova koji plove u zoni nadkritičnih brzina.

Slika valova u plitkoj vodi mijenja se ovisno o Froudeovom broju na temelju dubine:

$$Fn_h = \frac{v}{\sqrt{gh}} \quad (15)$$

Na slici 2. dane su slike valova za različite vrijednosti Froudeovih brojeva na temelju dubine za istu brzinu broda.



Slika 2. Slike valova za različite vrijednosti Fn_h [33]

Za slučaj kad je brzina broda $v \leq 0,4\sqrt{gh}$ razilazni valovi zatvaraju Kelvinov kut sa simetralom broda u iznosu od $19^\circ 28'$. Slika valova tada je jednaka onoj u neograničenoj dubini. Na slici 2. a) porastom brzine dolazi i do porasta kuta, pa se valovi sve više udaljavaju od simetrale broda te će pri $\frac{v}{\sqrt{gh}} = 0,99$ zatvarati pravi kut sa simetralom broda. U tom slučaju brod se giba brzinom jednako brzini valova, odnosno kritičnom brzinom zbog čega svi sustavi valova tvore jedan poprečni val. Daljnjim rastom brzine broda kut se ponovno počinje smanjivati što je

vidljivo na slici 2. b) te se pri $v = 1,4\sqrt{gh}$ slika valova sastoji samo od razilaznih valova, slika 2. c) [33].

Iako modelska ispitivanja u bazenima s mogućnošću ispitivanja u ograničenoj vodi te provođenje numeričkih simulacija omogućuju pouzdano određivanje ukupnog otpora u plitkoj vodi, za približno određivanje pada brzine i povećanja otpora u plitkoj vodi mogu se primijeniti i analitičke metode kao što je Schlichtingova metoda [33].

Schlichtingova metoda je približna metoda proračuna otpora i pada brzine u plitkoj vodi temeljena na jednakosti preostalog otpora u neograničenoj i plitkoj vodi te je primjenjiva i za uvjete ograničene širine plovnog puta. Analiziran je utjecaj plitke vode pri nadkritičnim brzinama na temelju rezultata modelskih ispitivanja i teorijskih razmatranja. U ovoj metodi izjednačen je otpor valova u dubokoj i plitkoj vodi uz pretpostavku da su duljina i otpor valova za plitku vodu pri manjoj brzini jednaki kao i za duboku vodu pri većoj brzini. Time je omogućeno određivanje smanjenja brzine broda u plitkoj vodi [33].

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

$$v = \sqrt{\frac{gL_w}{2\pi}} = c_w \quad (16)$$

a brzina broda v_{ss} u slučaju ograničene dubine jednaka je brzini poprečnog vala $c_{w,s}$:

$$v_{ss} = \sqrt{\frac{gL_w}{2\pi} \frac{2\pi h}{L_w}} = c_{w,s} \quad (17)$$

Iz omjera ovih dviju brzina dobije se izraz koji povezuje brzine poprečnog vala u slučaju ograničene i neograničene dubine:

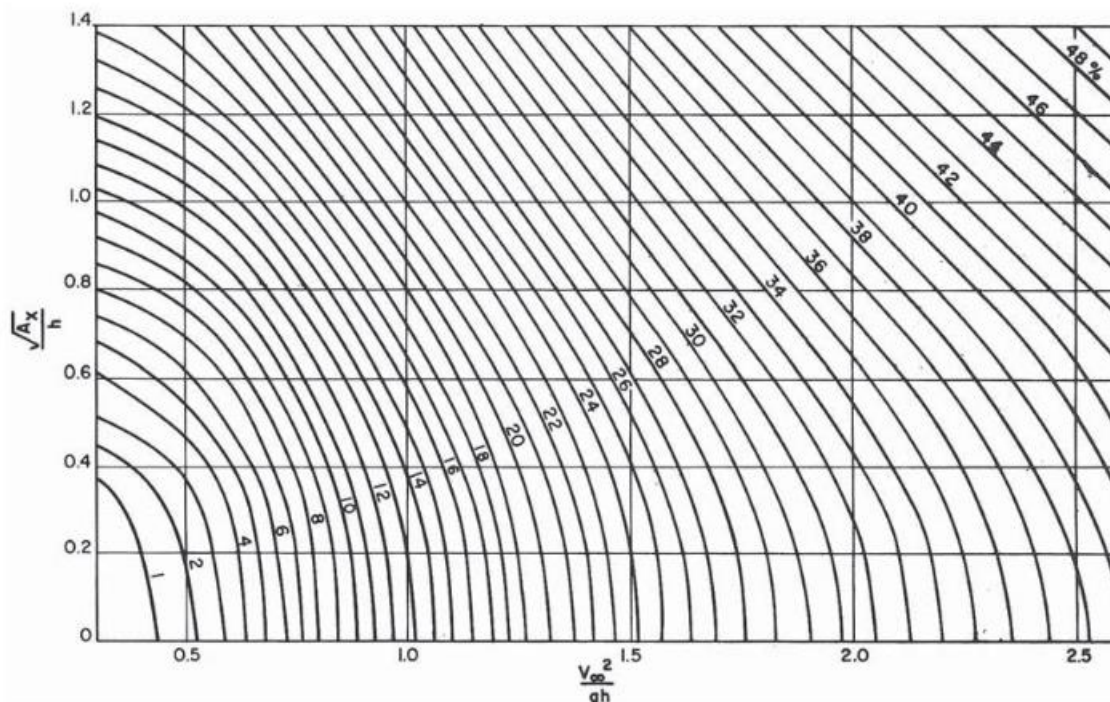
$$c_{w,s} = c_w \sqrt{\text{th} \frac{gh}{c_w^2}} \quad (18)$$

Brzina broda u plitkoj vodi jednaka je:

$$v_{ss} = v - \Delta C \quad (19)$$

gdje je ΔC pad brzine broda u području plitke vode.

Na slici 3. dan je Schlichtingov [33] dijagram koji omogućuje određivanje pada brzine broda u plitkoj vodi.



Slika 3. Schlichtingov dijagram za izračun smanjenja brzine broda u plitkoj vodi [33]

Schlichtingova istraživanja pokazala su kako dodatni pad brzine Δv_p najviše ovisi o omjeru

$\frac{\sqrt{A_x}}{h}$, gdje je A_x maksimalna poprečna površina uronjenog dijela trupa broda.

2.4. Pokus otpora broda u plitkoj vodi

Pokus otpora broda provodi se s ciljem određivanja ukupnog otpora za određeni raspon Fn . Pokus otpora modela broda provodi se u bazenima za ispitivanje modela brodova s ciljem određivanja krivulje ovisnosti ukupnog otpora o brzini broda. Za provedbu ovog pokusa potrebno je uzeti u obzir preporuke ITTC-a (eng. *International Towing Tank Conference*). Pokus se provodi na način da se model tegli kolicima kroz bazen pri čemu se mjeri brzina te ukupni otpor. Fizički model broda mora biti napravljen u skladu s dimenzijama bazena i instrumentima koji se koriste pri ispitivanju. Površina modela broda mora biti tehnički glatka. Na kraju ispitivanja kroz izmjerene se točke provlači glatka krivulja. Dobiveni rezultati za model broda ekstrapoliraju se na brod u naravi. Ekstrapolacija podataka moguća je primjenom više različitih metoda koje se razlikuju u načinu podjele otpora. To su primjerice Froudeova metoda, metoda ITTC 1957, metoda ITTC 1978, Prohaskina metoda, Hughesova metoda i Telferova metoda [31].

Pri ispitivanju modela broda nije moguće zadovoljiti u potpunosti dinamičku sličnost (jednakost F_n i R_n), ali je pritom svakako potrebno zadovoljiti:

- geometrijsku sličnost
→ ostvaruje se konstantnim odnosom glavnih dimenzija broda u naravi i modela broda, a to su duljina, širina i gaz:

$$\lambda = \frac{L_S}{L_M} = \frac{B_S}{B_M} = \frac{T_S}{T_M} \quad (20)$$

gdje je:

λ – mjerilo geometrijske sličnosti.

- kinematičku sličnost
→ brzina i ubrzanje u odgovarajućim prostorno-vremenskim točkama za model broda i brod u naravi moraju biti u konstantnom odnosu, kolinearni te istog smjera.
- djelomično zadovoljiti dinamičku sličnost preko Froudeovih brojeva

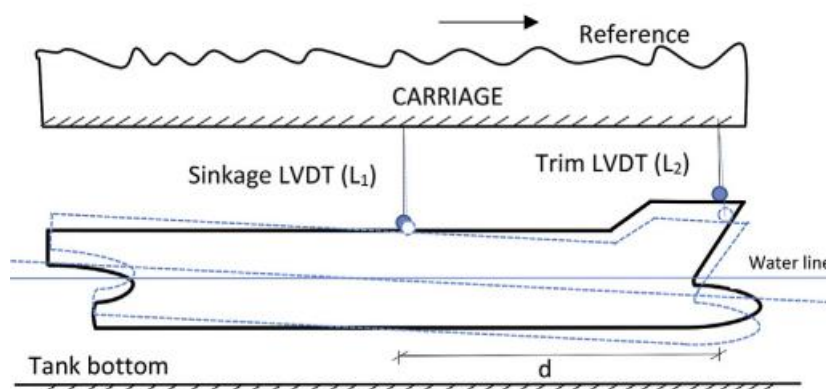
Za zadovoljavanje dinamičke sličnosti potreban je konstantan odnos svih sila koje djeluju na brod za vrijeme plovidbe, a to su gravitacijske, viskozne i inercijske sile. Obzirom da za mjerila modela različita od 1 to nije moguće zadovoljiti, zadovoljava se djelomična dinamička sličnost preko jednakosti Froudeovih brojeva, a Reynoldsov broj drži se iznad kritične vrijednosti ($R_n > 10^5$).

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

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

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

U ovom završnom radu numeričke simulacije provedene su u skladu s eksperimentalnim ispitivanjima. Uvjeti pokusa u bazenu postavljeni su da budu što sličniji uvjetima Novog Sueskog kanala, koji nema samo ograničenu dubinu, već i širinu [36]. Za provedbu pokusa korištena su dva linearno varijabilna diferencijalna transformatora (eng. LVDT – *Linear Variable Differential Transformer*), prikazana na slici 4., pomoću kojih se mjerio trim i uron



Slika 4. Prikaz smještaja linearno varijabilnih diferencijalnih transformatora (LVDT)
 [34]

2.5. Trim broda

Trim predstavlja razliku gazova na pramcu i krmi, odnosno uzdužni nagib broda prema pramcu ili krmi oko poprečne osi koja prolazi kroz težište plovne vodne linije. Trim broda moguće je izraziti putem pramčanog i krmenog trima kako slijedi:

$$t = t_p + t_k \quad (21)$$

gdje je:

t_p – pramčani trim,

t_k – krmeni trim.

Kad je brod na ravnoj kobilici gaz na pramcu jednak je gazu na krmi. U slučaju kada je gaz na krmi veći od gaza na pramcu brod se nalazi u zatezi, a kada je gaz na pramcu veći od gaza na krmi brod je u pretezi.

Ukoliko se težina na brodu pomiče u smjeru pramca ili krme, promjena trima računa se zbrajanjem apsolutne promjene gazova na krmi i pramcu. Ako se težina pomakne s krme prema pramcu, kao što je prikazano na slici 5., krma izranja, a pramac uranja. Brod plovi na novoj vodnoj liniji te su promijenjeni gazovi na krmi i pramcu. Zbog pomaka težine i uzdužnog nagiba mijenja se položaj težišta broda, a zbog promjene oblika podvodnog dijela broda dolazi do promjene položaja težišta istisnine.

3. RAČUNALNA DINAMIKA FLUIDA

3.1. Osnove računalne dinamike fluida

Mehanika fluida je znanost koja se temelji na teorijskom i eksperimentalnom pristupu. Teorijski pristup temeljen je na analitičkom rješavanju matematičkih modela strujanja fluida. Određivanjem analitičkih rješenja moguće je vršiti analizu utjecaja pojedinih parametara u matematičkom modelu. Međutim, velika većina problema vezanih uz strujanje fluida opisana je nelinearnim parcijalnim diferencijalnim jednadžbama koje nemaju opće analitičko rješenje. To se osobito odnosi na turbulentno strujanje koje se zbog stohastičke prirode ne može opisati analitički. Analitičko rješenje moguće je postići za određene slučajeve laminarnog strujanja. Taj nedostatak teorijskog pristupa razlog je zbog kojeg se problemi mehanike fluida rješavaju i eksperimentalnim pristupom. Eksperimentalnim pristupom za određenu pojavu može se dobiti ograničen uvid u fizikalnu pojavu te na temelju jednog mjerenja nije moguće donositi zaključke o utjecaju pojedinih parametara, ali ponavljanjem eksperimenta uz različite vrijednosti utjecajnih parametara moguće je dobiti potpuniju sliku o određenoj pojavi. Sve većim napretkom računala omogućeno je numeričko rješavanje matematičkih modela koji opisuju strujanje fluida čime je definirana treća grana mehanike fluida, računalna dinamika fluida. Računalna dinamika fluida iako temeljena na teorijskom pristupu, ima sličnosti i s eksperimentalnim pristupom. To se konkretno ogleda u nemogućnosti zaključivanja o utjecaju pojedinih parametara iz jednog numeričkog rješenja zadanog problema [37].

3.2. Koraci numeričke simulacije

U prvom dijelu provođenja numeričke simulacije potrebno je definirati problem te odabrati odgovarajući matematički model. Svaki komercijalni programski paket za RDF već ima ugrađen matematički model. U drugom dijelu potrebno je numerički riješiti postavljeni matematički model. Numeričko rješavanje provodi se kroz tri koraka. U prvom koraku diskretizira se područje proračuna gdje se kao rezultat dobiva geometrijska mreža. U drugom koraku potrebno je na definiranoj geometrijskoj mreži diskretizirati parcijalne diferencijalne jednadžbe matematičkog modela uzimajući u obzir početne i rubne uvjete. Diskretizaciju je moguće provesti primjenom različitih metoda od kojih je najpoznatija metoda konačnih volumena. Rezultat diskretizacije je sustav nelinearnih ili linearnih diferencijalnih jednadžbi koje se rješavaju iterativnim postupcima. Unutar trećeg koraka dobiva se numeričko rješenje te se provodi njegova analiza.

Numerička simulacija sastoji se od tri programa:

- predprocesora,
- procesora,
- postprocesora.

Predprocesor je računalni program zaslužan za generiranje geometrijske mreže prilikom čega treba voditi računa o rubnim uvjetima. Samo generiranje geometrijske mreže oduzima velik dio ukupnog vremena za provedbu simulacije te se intenzivno radi na razvoju automatskih generatora mreže. Procesor je program zaslužan za numeričko rješavanje matematičkog problema uzimajući u obzir početne te rubne uvjete. Postprocesor je program unutar kojeg se provodi analiza i vizualizacija rezultata proračuna kao i izračun pojedinih integralnih veličina [37].

3.3. Matematički model

Matematički model predstavlja matematički zapis fizikalnog modela koji sadržava niz pretpostavki. Najbitnija pretpostavka korištena kod opisa strujanja fluida jest ta da je fluid kontinuum. Kontinuum je definiran kao zamišljena tvar koja bi u potpunosti ispunjavala prostor i ne bi mijenjala fizikalna svojstva ni u slučaju infinitezimalno malog volumena. Ostale bitnije pretpostavke su homogenost i izotropnost. Homogenost označava ista fizikalna svojstva u svim točkama fluida, a izotropnost u svim smjerovima. Fizikalno modeliranje nekog problema nastoji se provesti uz što jednostavniji matematički model. Tada se u određenim slučajevima problem od trodimenzijskog (3D) može svesti na ravninski problem (2D) zbog zanemarenja promjene fizikalnih veličina u nekom od smjerova. Strujanje u stvarnosti uglavnom je vremenski promjenjivo, odnosno nestacionarno. Uvođenjem pretpostavke stacionarnog strujanja problem bi se značajno pojednostavio. Strujanje fluida u prirodi najčešće je turbulentno te ga je nemoguće opisati analitički. Laminarno strujanje pojavljuje se samo pri niskim vrijednostima Reynoldsovog broja, a kod problema optjecanja tijela mogu se pojaviti oba slučaja strujanja. Modeliranje turbulencije veliko je područje samo za sebe, a danas su razvijeni razni pristupi kojima se može pristupiti rješavanju problema i jednadžbi za turbulenciju. Pri modeliranju nastoji se postići što jednostavniji matematički model te fizikalni model koji će što vjerodostojnije opisati pojave u stvarnosti [37].

3.4. Osnovni zakoni i jednačbe dinamike fluida

Osnovni zakoni dinamike fluida kojima se opisuje strujanje fluida su:

- zakon očuvanja mase,
- zakon očuvanja količine gibanja,
- zakon očuvanja momenta količine gibanja,
- zakon očuvanja energije.

Spomenuti zakoni se definiraju za materijalni volumen koji se sastoji uvijek od jednih te istih čestica fluida, a primjenjuju se za kontrolni volumen koji ne mijenja položaj, oblik i veličinu. Za opis strujanja nestlačivog viskoznog fluida koriste se Navier - Stokesove jednačbe temeljene na jednačbi kontinuiteta i jednačbi količine gibanja te dopunske jednačbe koje odgovaraju zakonima posebnih ponašanja fluida [38].

Jednačba kontinuiteta za nestlačivi fluid glasi:

$$\nabla \cdot \vec{v} = \text{div } \vec{v} = \frac{\partial v_j}{\partial x_i} = 0 \quad (23)$$

gdje v_j predstavlja vektor brzine.

Jednačba količine gibanja ili Eulerova jednačba zapisuje se kako slijedi:

$$\rho \frac{Dv_i}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) = \rho f_i + \frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j} \quad (24)$$

gdje je:

ρ – gustoća fluida,

v_i – vektor brzine,

f_i – gustoća masene sile,

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

σ_{ji} – tenzor naprezanja.

Potrebno je uvesti dopunske jednačbe obzirom da je broj nepoznanica veći od broja jednačbi koje su na raspolaganju, a one glase:

$$\sigma_{ji} = -p\delta_{ij} + \Sigma_{ij} \quad (25)$$

$$p = -\frac{1}{3} \sigma_{kk} \quad (26)$$

$$\Sigma_{ji} = 2\mu D_{ji} + \left(\mu_v - \frac{2}{3}\mu \right) D_{kk} \delta_{ji} \quad (27)$$

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

gdje je:

p – tlak,

δ_{ij} – Kroneckerov delta simbol,

Σ_{ij} – devijatorski dio tenzora naprezanja,

D_{ij} – tenzor brzine deformacije,

μ – dinamički koeficijent viskoznosti.

Kombinacijom navedenih jednadžbi dobivaju se Navier - Stokesove jednadžbe:

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

Uvođenjem supstitucije $\nu = \frac{\mu}{\rho}$, gdje je ν kinematički koeficijent viskoznosti, jednadžba (29)

prelazi u:

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \nabla^2 v_i \quad (30)$$

3.5. Reynoldsove osrednjene Navier – Stokesove jednadžbe

Reynoldsove ili Reynoldsove osrednjene Navier - Stokesove jednadžbe (RANS) predstavljaju skup vremenski osrednjene jednadžbe kontinuiteta i količine gibanja pomoću kojih se opisuje viskozno strujanje fluida unutar računalne dinamike fluida. Vremenski osrednjeno turbulentno strujanje je matematički model unutar kojeg su strujnice pravilne krivulje. Samo strujanje slično je laminarnom, međutim profil brzine vremenski osrednjenog turbulentnog strujanja značajno se razlikuje od profila brzine laminarnog strujanja. Kod stvarnog turbulentnog strujanja strujnice pulsacijskog gibanja presijecaju strujnice urednog vremenski osrednjenog strujanja prilikom čega se iz sloja u sloj fluida prenose karakteristične veličine kao što su količina gibanja, toplina, masa i druge.

Tlak i brzina kao nepoznanice u jednadžbama kontinuiteta i količine gibanja, mogu se prikazati kao zbroj osrednjenog i pulsirajućeg dijela kako slijedi:

$$v_i = \bar{v}_i + v_i' \quad (31)$$

$$p = \bar{p} + p' \quad (32)$$

gdje je:

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

v'_i – pulsirajuća komponenta brzine,

\bar{p} – vremenski osrednjena komponenta tlaka,

p' – pulsirajuća komponenta tlaka.

Nakon uvrštavanja i osrednjavanja, jednačba kontinuiteta glasi:

$$\frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (33)$$

Daljnijim uvrštavanjem jednačbi (31) i (32) u (30) dobivaju se Reynoldsove osrednjene Navier – Stokesove jednačbe:

$$\rho \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \rho \bar{v}_j \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{v'_i v'_j} \right) \quad (34)$$

u kojima su nepoznate komponente osrednjenog polja brzine \bar{v}_i i osrednjenog polja tlaka \bar{p} .

Član $\rho \overline{v'_i v'_j}$ naziva se turbulentno ili Reynoldsovo naprezanje koje predstavlja turbulentnu difuziju količine gibanja.

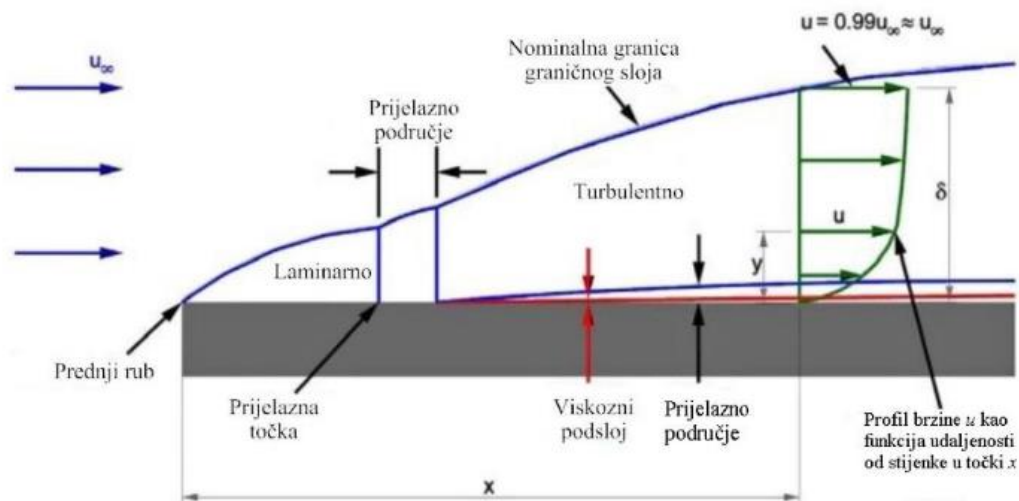
Kako bi se uskladio broj jednačbi s brojem nepoznanica, kojih ima više od Reynoldsovih osrednjenih Navier – Stokesovih jednačbi, uveden je model turbulencije kojim se rješava navedeni problem. U ovom radu korišten je $k - \omega$ SST model turbulencije.

3.6. $k - \omega$ SST model turbulencije

$k - \omega$ SST model turbulencije sadrži dvije transportne jednačbe od kojih jedna predstavlja turbulentnu kinetičku energiju k , dok se druga odnosi na specifičnu brzinu disipacije turbulentne kinetičke energije ω . $k - \omega$ SST model turbulencije kombinacija je dva modela turbulencije, $k - \varepsilon$ i $k - \omega$ modela turbulencije. Upravo iz tog razloga moguće je primijeniti ovaj model turbulencije za niske i visoke vrijednosti Reynoldsovih brojeva. Time se uspješno zaobilaze problemi prevelike osjetljivosti modela na karakteristike turbulentnog strujanja koji se javljaju kod $k - \omega$ modela turbulencije. Još jedna bitna prednost ovog modela je veća točnost kod proračuna unutar graničnog sloja na mjestima povećanog gradijenta tlaka [37].

3.7. Zidne funkcije

Tri su područja na koja se dijeli strujanje oko brodskog trupa, a to su granični sloj, hidrodinamički trag te područje potencijalnog strujanja. Granični sloj područje je strujanja koje se formira uz krutu, nepropusnu stijenku broda unutar kojeg je značajno izraženo djelovanje viskoznih sila. Debljina graničnog sloja raste od pramca prema krmi. Hidrodinamički trag područje je strujanja iza trupa broda te sadrži vrtloge koji nastaju uslijed odvajanja graničnog sloja od trupa broda. Područje potencijalnog strujanja nalazi se izvan graničnog sloja i hidrodinamičkog traga te se zbog malih gradijenata brzine utjecaj viskoznosti zanemaruje te fluid smatra idealnim. Razlikuju se tri vrste strujanja u graničnom sloju. To su laminarno, prijelazno i turbulentno strujanje. Laminarno strujanje karakteristično je za niže vrijednosti Reynoldsovih brojeva te je slojevito i uredno. Sam prijelaz iz laminarnog u turbulentno strujanje složen je postupak te se događa postupno pri višim gradijentima brzine. Turbulentno područje dijeli se na unutarnji i vanjski sloj. Unutarnji sloj sastoji se od viskoznog podsloja (eng. *viscous sublayer*), koji se dijeli na linerani podsloj (eng. *linear sublayer*) i na prijelazno područje (eng. *buffer layer*) te logaritamskog područja (eng. *log-law region*). Slika 6. prikazuje nastanak graničnog sloja tijekom strujanja fluida uz krutu stijenku.



Slika 6. Prikaz graničnog sloja pri strujanju fluida uz krutu stijenku [39]

Zidne funkcije (eng. *wall functions*) premošćuju područja s malim vrijednostima Reynoldsovog broja kao što su područja u neposrednoj blizini stijenke gdje je brzina jako mala. Zidne funkcije rješavaju taj problem definiranjem unutarnjih rubnih uvjeta.

U neposrednoj blizini stijenke, fluid struji paralelno sa stijenkom dok je komponenta brzine okomita na stijenku zanemarivo mala. Ukupno tangencijalno naprezanje je konstantno te

jednako naprezanju na stijenci $\tau = \tau_w$. Na temelju navedenog jednadžba količine gibanja u smjeru strujanja glasi:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right] = \frac{\partial \tau}{\partial y} = 0 \quad (35)$$

gdje je:

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

y – udaljenost od stijenske,

τ – ukupno tangencijalno naprezanje,

μ_t – dinamički koeficijent turbulentne viskoznosti.

Profil brzine u području viskoznog podsloja je linearan obzirom da su turbulentne pulsacije prigušene, a molekularna viskoznost dominira zbog čega se turbulentna viskoznost može zanemariti, te glasi:

$$\bar{u} = \frac{\tau}{\mu} y \quad (36)$$

odnosno u bezdimenzijskom obliku:

$$u^+ = y^+ \quad (37)$$

Izraz za bezdimenzijsku udaljenost od stijenske je kako slijedi:

$$y^+ = u^+ = \frac{\rho u_\tau}{\mu} y \quad (38)$$

gdje je u_τ brzina trenja prema izrazu (39), a y polovina visine prve ćelije u graničnom sloju prema jednadžbi (40):

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (39)$$

$$y = \frac{y^+ L}{Rn \sqrt{\frac{C_F}{2}}} \quad (40)$$

gdje je C_F koeficijent otpora trenja definiran izrazom (41):

$$C_F = \frac{0,075}{(\log Rn - 2)^2} \quad (41)$$

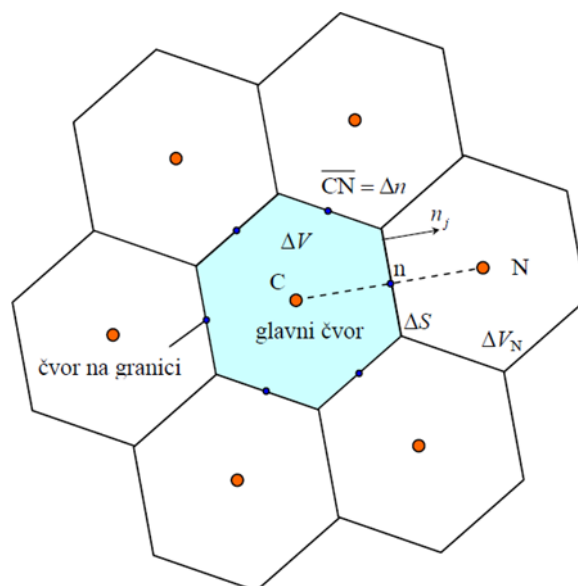
3.8. Metoda konačnih volumena

Metoda konačnih volumena (eng. *Finite Volume Method*) integralna je metoda koja diskretizira proračunsku domenu te RANS jednadžbe. Diskretiziraju se parcijalne diferencijalne jednadžbe nakon čega se dobiva sustav algebarskih jednadžbi. Metoda se temelji na integriranju konzervativnog oblika transportnih jednadžbi po konačnim volumenima na koja je podijeljena proračunska domena. Integral transportne jednadžbe definiran je kao:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Delta V} \rho \varphi dV = - \int_{\Sigma \Delta S} \left(\rho v_j \varphi - \Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) n_j dS + \int_{\Delta V} S_\varphi dV \quad (42)$$

Član s lijeve strane jednadžbe (42) predstavlja brzinu promjene sadržaja razmatranog fizikalnog svojstva φ u volumenu ΔV . Prvi član s desne strane jednadžbe predstavlja difuzijski i konvekcijski protok φ kroz granice dok drugi član predstavlja izvor fizikalnog svojstva [37].

Slikom 7. prikazan je diskretizirani dio proračunske domene.



Slika 7. Diskretizirani dio proračunske domene [37]

3.9. Metoda udjela fluida u volumenu (VOF metoda)

Metoda udjela fluida u volumenu (eng. *Volume of fluid*) koristi se za određivanje položaja slobodne površine između zraka i vode. Omogućuje simuliranje strujanja više fluida koji se ne miješaju te se temelji na činjenici da sve faze na zajedničkoj granici imaju definirano isto polje brzine, tlaka i temperature [39].

Volumni udio fluida unutar kontrolnog volumena glasi:

$$\alpha_i = \frac{V_i}{V} \quad (43)$$

gdje je:

α_i – volumni udio i – tog fluida u kontrolnom volumenu,

V – kontrolni volumen,

V_i – volumen i – tog fluida unutar kontrolnog volumena.

Gustoća ρ i dinamički koeficijent viskoznosti μ računaju se kako slijedi:

$$\rho = \sum_i \rho_i \alpha_i \quad (44)$$

$$\mu = \sum_i \mu_i \alpha_i \quad (45)$$

gdje je:

ρ_i – gustoća i – te faze unutar kontrolnog volumena,

μ_i – dinamički koeficijent i – te faze u kontrolnom volumenu.

3.10. Verifikacija rezultata

Verifikacija je postupak kojim se procjenjuje numerička nesigurnost rezultata te provjerava konvergencije rezultata koji su dobiveni iterativnim metodama. Za provedbu samog postupka verifikacije potrebno je provesti numeričke simulacije za najmanje tri mreže različite gustoće (eng. *grid density*) te najmanje tri različita vremenska koraka (eng. *time step*). Broj ćelija je faktor koji čini razliku između grube, srednje i fine mreže te ovisi o vrijednosti osnovne veličine ćelije [40].

Proračun razlike numeričkih rezultata dobivenih primjenom grube, srednje i fine mreže provodi se prema sljedećim izrazima [40]:

$$\varepsilon_{i,21} = \hat{S}_{i,2} - \hat{S}_{i,1} \quad (46)$$

$$\varepsilon_{i,32} = \hat{S}_{i,3} - \hat{S}_{i,2} \quad (47)$$

gdje je:

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

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

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

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

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

U tablici 1. su dana tri tipa konvergencije zajedno s izrazima za određivanje numeričke nesigurnosti mreže i vremenskog koraka za svaki pojedini tip. S_U predstavlja najveću, a S_L najmanju vrijednost numeričkog rezultata [40].

Tablica 1. Tipovi konvergencije

| Tip konvergencije | Omjer konvergencije | Numerička nesigurnost |
|-------------------|---------------------|------------------------------|
| Oscilatorna | $-1 < R_i < 0$ | $U_i = \frac{S_U - S_L}{2}$ |
| Monotona | $1 < R_i < 0$ | $U_i = 1.25 \delta_{RE}^* $ |
| Divergencija | $ R_i > 1$ | $U_i = S_U - S_L $ |

Zahtijevana su minimalno tri rješenja kako bi se mogao odrediti omjer konvergencije temeljen na razlici rješenja dobivenih primjenom različitih gustoća mreže i vremenskog koraka. Izraz za omjer konvergencije glasi:

$$R_i = \frac{\varepsilon_{i,21}}{\varepsilon_{i,32}} \quad (48)$$

gdje je R_i omjer konvergencije.

Za slučaj monotone konvergencije koristi se generalizirana Richardsonova ekstrapolacija za procjenu numeričke nesigurnosti čiji izrazi za izračun pogreške δ_{RE}^* i reda točnosti p_i glase:

$$\delta_{RE}^* = \frac{\varepsilon_{i,21}}{r_i^{p_i} - 1} \quad (49)$$

$$p_i = \frac{\ln\left(\frac{\varepsilon_{i,32}}{\varepsilon_{i,21}}\right)}{\ln(r_i)} \quad (50)$$

pri čemu je r_i omjer profinjenja koji iznosi $\sqrt{2}$ za gustoću mreže te 2 za vremenski korak.

Ukupna numerička nesigurnost definirana je na temelju broja iteracija δ_I , gustoće mreže δ_G , vremenskog koraka δ_T i ostalih parametara δ_P te se računa kako slijedi:

$$U_{SN}^2 = U_I^2 + U_G^2 + U_T^2 + U_P^2 \quad (51)$$

gdje je:

U_I – numerička nesigurnost broja iteracija,

U_G – numerička nesigurnost gustoće mreže,

U_T – numerička nesigurnost vremenskog koraka,

U_p – numerička nesigurnost ostalih parametara.

Postupak verifikacije u sklopu ovog rada proveden je za ukupni otpor, kut trima te uron broda koristeći različite gustoće mreže i vremenske korake. Numerička nesigurnost broja iteracija te ostalih parametara je zanemarena čime je ukupna numerička nesigurnost definirana kako slijedi:

$$U_{SN}^2 = U_G^2 + U_T^2 \quad (52)$$

3.11. Validacija rezultata numeričkih simulacija

Validacija je postupak kojim se određuje odstupanje dobivenih numeričkih rezultata od dostupnih eksperimentalnih rezultata. Validacijom se postiže procjena točnosti numeričkih simulacija te uvid u sposobnost matematičkog modela da opisuje stvarne pojave.

Usporedba rezultata ukupnog otpora dobivenog numeričkom simulacijom s eksperimentalnim rezultatima dana je na temelju relativne devijacije određene sljedećim izrazom:

$$RD = \frac{R_{T_RDF} - R_{T_EKS}}{R_{T_EKS}} \cdot 100\% \quad (53)$$

gdje je:

R_{T_RDF} – ukupan otpor dobiven numeričkom simulacijom,

R_{T_EKS} – ukupan otpor određen preko eksperimenta.

Relativne devijacije urona i kuta trima određene su analogno relativnoj devijaciji ukupnog otpora prikazanoj jednadžbom (53).

4. PRIPREMA NUMERIČKIH SIMULACIJA

4.1. Geometrijske značajke KCS modela broda

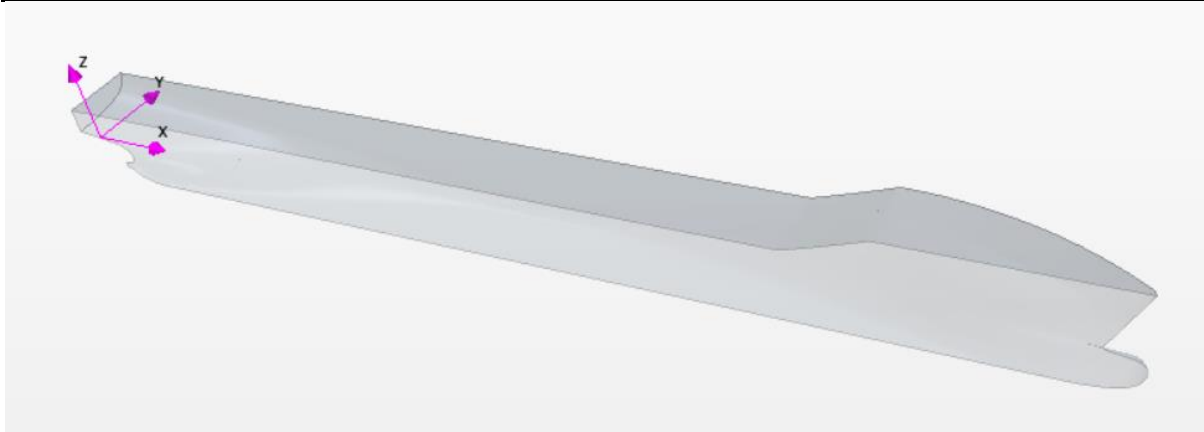
U tablici 2. dane su glavne značajke KCS modela broda za koji su provedene numeričke simulacije s ciljem određivanja ukupnog otpora, urona i kuta trima.

Tablica 2. Osnovne geometrijske značajke modela broda

| Značajka | Oznaka | Vrijednost |
|--|-----------|------------|
| Duljina između okomica, m | L_{PP} | 3,067 |
| Širina na vodnoj liniji, m | B_{WL} | 0,429 |
| Visina broda, m | D | 0,25 |
| Projektni gaz, m | T | 0,144 |
| Koeficijent punoće forme | C_B | 0,651 |
| Mjerilo geometrijske sličnosti | λ | 75 |
| Masa istisnine, t | Δ | 0,0612 |
| x koordinata težišta volumena istisnine, m | x_B | 1,487 |
| y koordinata težišta volumena istisnine, m | y_B | 0 |
| z koordinata težišta volumena istisnine, m | z_B | -0,065 |

Numeričke simulacije provedene su za $Fn_h = 0,469$ što odgovara brzini modela od 0,832 m/s, odnosno brzini od 14 čv broda u naravi.

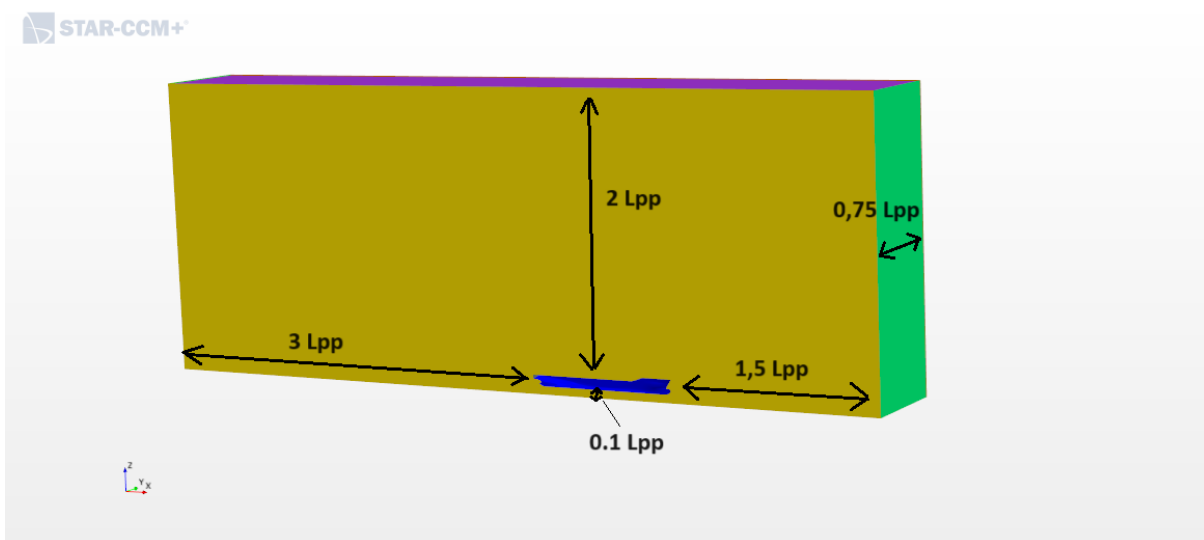
Na slici 8. prikazan je 3D model broda s definiranim koordinatnim sustavom u proračunskoj domeni. Ishodište koordinatnog sustava postavljeno je na presjecištu konstrukcijske vodne linije i krmene okomice. Pozitivan smjer osi x je od krme prema pramcu, osi y prema lijevom boku te z osi vertikalno prema gore.



Slika 8. Prikaz polovine 3D modela broda

4.2. Proračunska domena

Kako bi se provele numeričke simulacije potrebno je kreirati i definirati proračunsku domenu (eng. *virtual towing tank*) koja predstavlja područje strujanja fluida oko modela broda. Proračunska se domena kreira u obliku kvadra, prema preporukama ITTC-a (eng. *International Towing Tank Conference*), a granice domene moraju biti smještene dovoljno daleko kako bi se izbjegao njihov utjecaj na konačno rješenje [42]. Na slici 9 je prikazana proračunska domena za slučaj ograničene dubine i širine.



Slika 9. Proračunska domena za slučaj ograničene širine i dubine

Model je simetričan te su numeričke simulacije provedene za polovinu broda, a granice proračunske domene ograničene širine i dubine su postavljene kako slijedi:

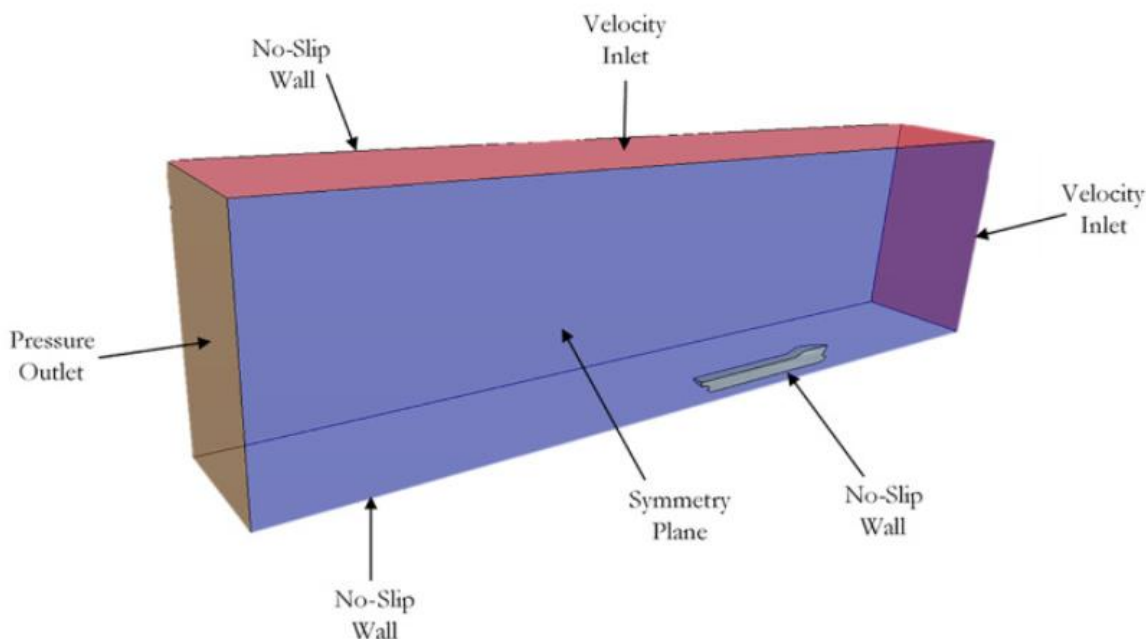
- $1,5 L_{pp}$ ispred modela broda,
- $3 L_{pp}$ iza modela broda,

- $2 L_{pp}$ iznad modela broda,
- $0,1 L_{pp}$ ispod modela broda,
- $0,75 L_{pp}$ od simetralne ravnine broda,

gdje L_{pp} predstavlja duljinu modela broda između okomica.

4.3. Rubni uvjeti

Kako bi se opisalo strujanje fluida primjenom računalne dinamike fluida potrebno je zadati početne i rubne uvjete, koji se zadaju na granicama proračunske domene. Granice proračunske domene imaju zanemariv utjecaj na dobivene rezultate ukoliko su dovoljno udaljene od trupa modela broda. Međutim u numeričkim simulacijama u ograničenoj vodi, donja i bočna granica nalaze se relativno blizu trupa modela broda te je njihov utjecaj na rezultate značajan. U ovom radu na ulaznoj i gornjoj granici postavljen je Dirichletov rubni uvjet koji definira brzinu strujanja fluida (eng. *velocity inlet*). Na izlaznoj granici definiran je Von Neumannov rubni uvjet (eng. *pressure outlet*), koji definira gradijent tlaka i čiji je iznos jednak nuli. Simetralna ravnina proračunske domene odgovara simetralnoj ravnini broda i na njoj je postavljen rubni uvjet simetrije. Kroz trup broda nema protoka fluida zbog čega se postavlja rubni uvjet zida (eng. *wall*) kojim se opisuje strujanje u blizini krute stijenke. Rubni uvjet zida definiran je na dnu i bočnoj granici kako bi se simulirali uvjeti analogni onima tijekom eksperimentalnog ispitivanja. Dopušteni stupnjevi slobode gibanja broda u numeričkim simulacijama provedenim s ciljem verifikacije i validacije rezultata su rotacijsko gibanje oko osi y , odnosno posrtanje (eng. *pitch*) te translacijsko gibanje u smjeru osi z , odnosno poniranje (eng. *heave*) [43]. Na slici 10. prikazani su rubni uvjeti proračunske domene.



Slika 10. Rubni uvjeti proračunske domene

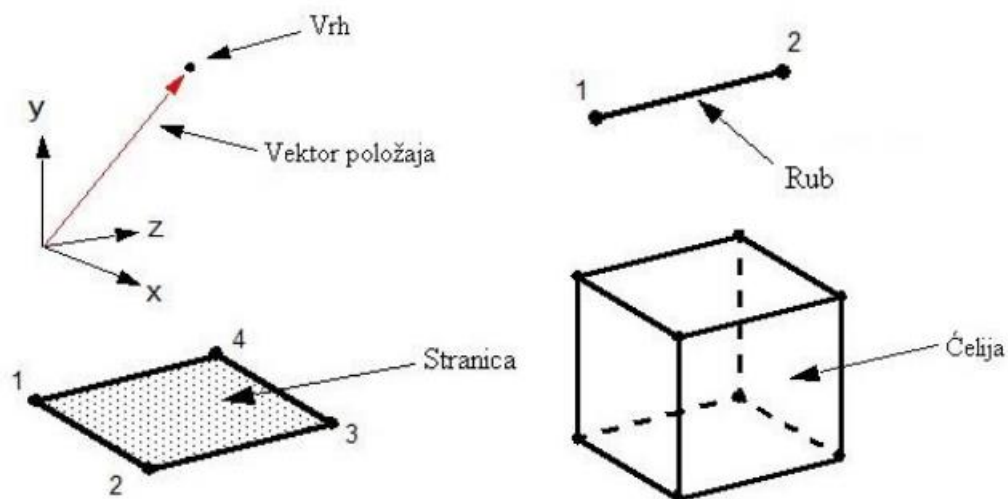
4.4. Diskretizacija proračunske domene

4.4.1. Generiranje geometrijske mreže

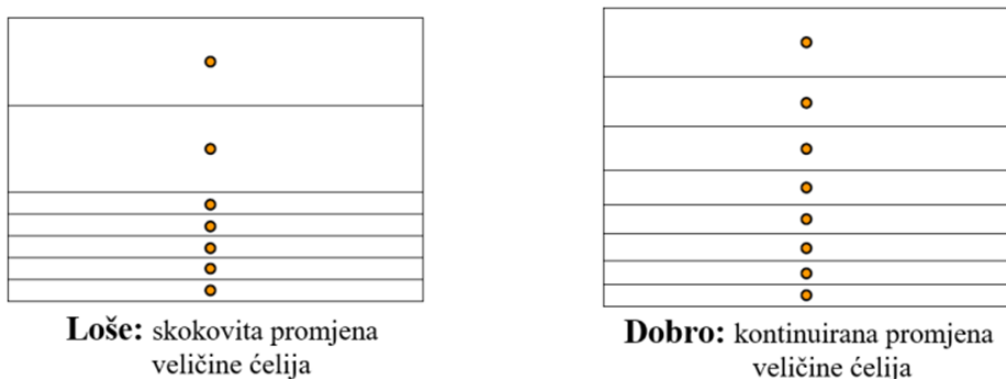
Diskretizacija proračunske domene provodi se na temelju metode konačnih volumena te se domena najčešće sastoji od heksaedarskih ćelija. Ćelije su osnovni elementi geometrijske mreže koji sadrže vrhove (eng. *vertex*), rubove (eng. *feature curves*) i stranice (eng. *face*) što je prikazano slikom 11. Vrh je definiran kao točka u prostoru koja može biti opisana usmjerenim vektorom. Rub predstavlja pravac ili krivulju koja spaja dva vrha. Stranicu čini više vrhova koji zajedno definiraju površinu u prostoru, a broj vrhova je proizvoljan. Rubovi stranica se ne smiju preklapati, a ćelija može sadržavati proizvoljan broj stranica sve dok se mogu oblikovati zatvoreni volumeni.

Alat za automatsku diskretizaciju mreže (eng. *automated mesh*) korišten je unutar programskog paketa STAR – CCM+. Unutar navedenog alata primijenjena su još 4 alata:

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



Slika 11. Osnovni elementi heksaedarske ćelije [41]



Slika 12. Primjer dobrog i lošeg diskretiziranja graničnog sloja [37]

Prva dva navedena alata koriste se za korekciju površinske mreže, treći alat za kreiranje nestrukturirane heksaedarske mreže koja je izrezana oko površine tijela, a četvrti alat kreira prizmatične ćelije kako bi se opisalo strujanje u području graničnog sloja koji se formira uz trup broda. Kod diskretizacije graničnog sloja bitno je ostvariti kontinuirani prijelaz između posljednje ćelije graničnog sloja i prve ćelije okolne mreže [43]. Na slici 12. dan je primjer dobrog i lošeg prijelaza između navedenih ćelija.

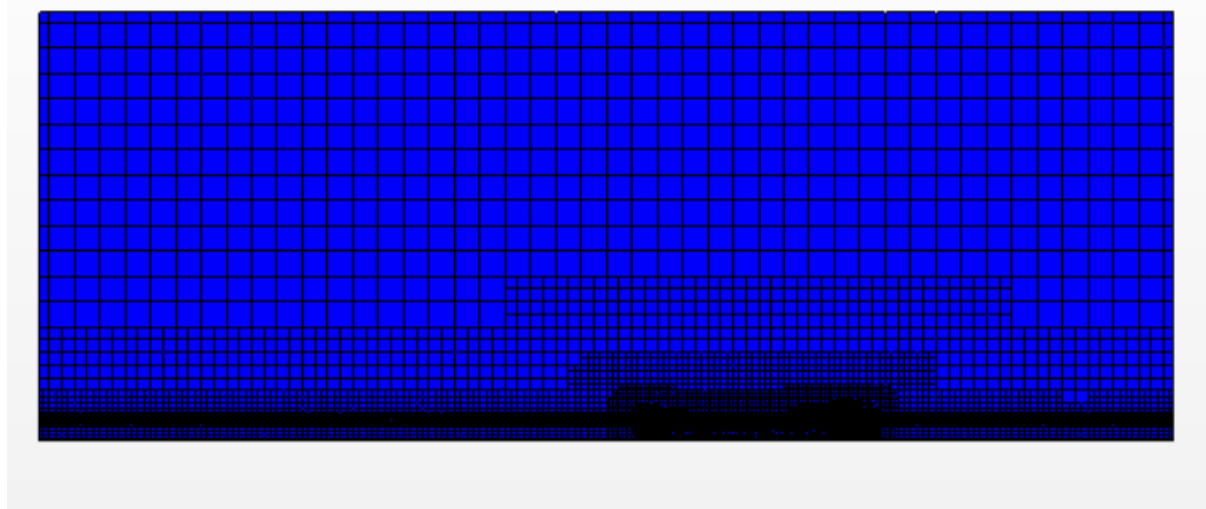
Tablica 3. Postavke diskretizacije fine mreže

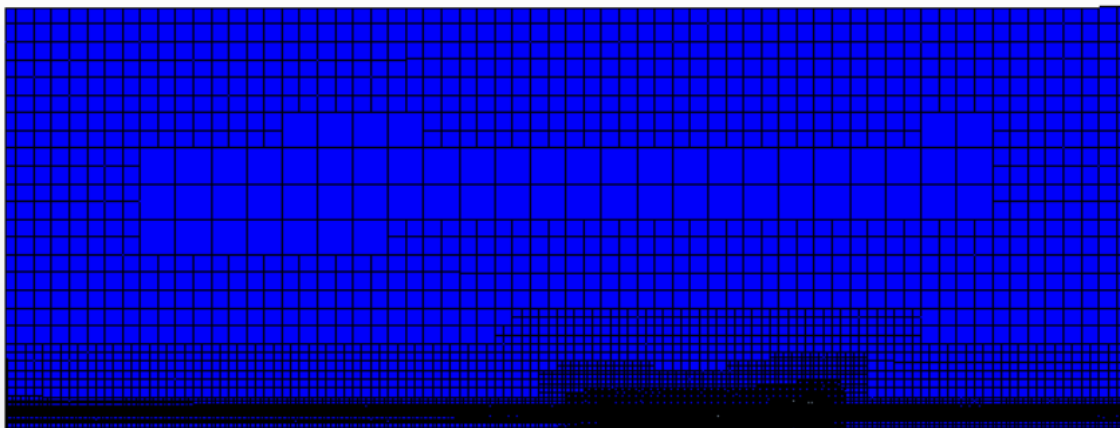
| Postavka | Opcija | Vrijednost |
|-------------------------------|------------------------------|------------|
| Osnovna veličina | Vrijednost | 0,0475 m |
| Ciljana veličina površine | Postotak osnovne veličine | 100 % |
| Minimalna veličina površine | Postotak osnovne veličine | 6,25 % |
| Zakrivljenost površine | Broj točaka u krugu | 36 |
| Automatski popravak površine | Minimalna neposredna blizina | 0,001 |
| Broj slojeva prizama | Broj | 14 |
| Ukupna debljina sloja prizama | Apsolutna vrijednost | 0,021907 m |
| Faktor rastezanja | Koeficijent | 1,6 |
| Stopa rasta | Zadana stopa rasta | Sporo |
| Stopa rasta | Stopa rasta granice | Sporo |
| Maksimalna veličina površine | Postotak osnovne veličine | 1600 % |

U tablici 3. dane su vrijednosti postavki korištenih za diskretizaciju fine mreže. S ciljem verifikacije dobivenih numeričkih rezultata korištene su tri mreže različite gustoće, fina (eng. *fine mesh*), srednja (eng. *medium mesh*) i gruba (eng. *coarse mesh*) mreža. Sve mreže imaju iste postavke za diskretizaciju prikazane u tablici 3., a razlikuju se u vrijednosti osnovne veličine ćelije (eng. *base size*) koja je varirana s faktorom profinjenja $\sqrt{2}$ [43]. Vrijednosti veličine osnovnih ćelija za sve tri mreže kao i ukupni broj ćelija dani su u tablici 4., a prikaz proračunske domene za sve tri mreže dan je na slikama 13.-15.

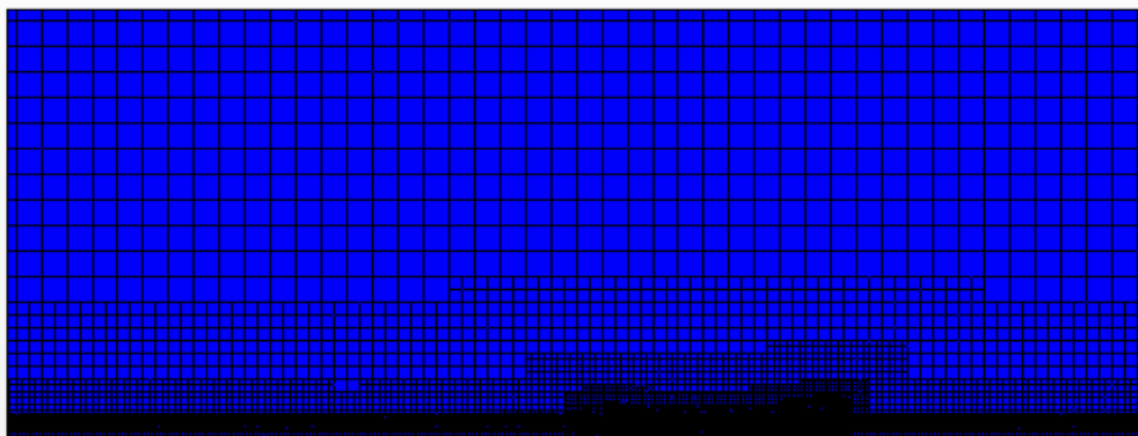
Tablica 4. Osnovne veličine i broj ćelija za pojedinu mrežu

| Mreža | Osnovna ćelija mreže | Ukupan broj ćelija |
|---------------|----------------------|--------------------|
| Fina mreža | 0,0475 m | 1 886 708 |
| Srednja mreža | 0,06718 m | 1 022 040 |
| Gruba mreža | 0,095 m | 511 403 |

**Slika 13. Proračunska domena diskretizirana grubom mrežom**



Slika 14. Proračunska domena diskretizirana srednjom mrežom

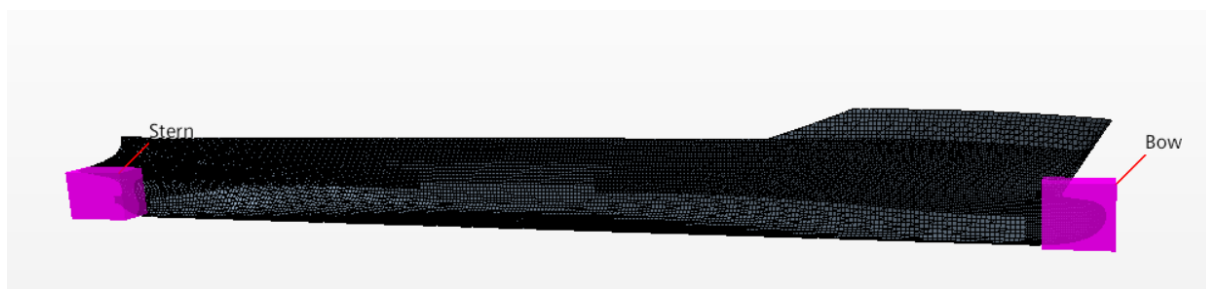


Slika 15. Proračunska domena diskretizirana finom mrežom

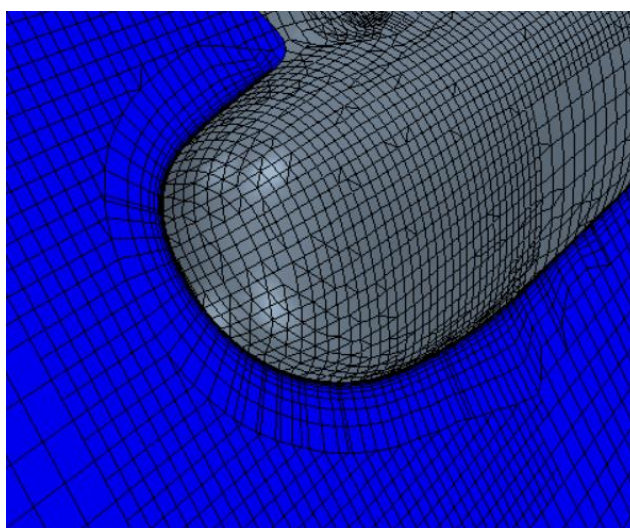
4.4.2. Profinjenja oko trupa modela broda

S ciljem dobivanja što točnijih rezultata numeričkih simulacija primjenjuju se dodatne volumetrijske kontrole. One zapravo predstavljaju dodatna profinjenja pojedinih područja proračunske domene, gdje dolazi do naglih promjena u strujanju ili gdje je strujanje potrebno detaljnije opisati. U okviru ovog rada definirane su volumetrijske kontrole u području pramca i krme broda, gdje se zakrivljenost forme broda naglo mijenja, oko trupa broda u području očekivane slobodne površine koja predstavlja granicu između dva fluida te u svrhu opisivanja Kelvinovog kuta.

Na slici 16. prikazana su profinjenja u obliku kvadra u području krme i pramca. Veličina ćelija unutar ova dva područja odgovara 12,5 % osnovne veličine ćelije. Prikaz finije mreže u području pramca dan je na slici 17.

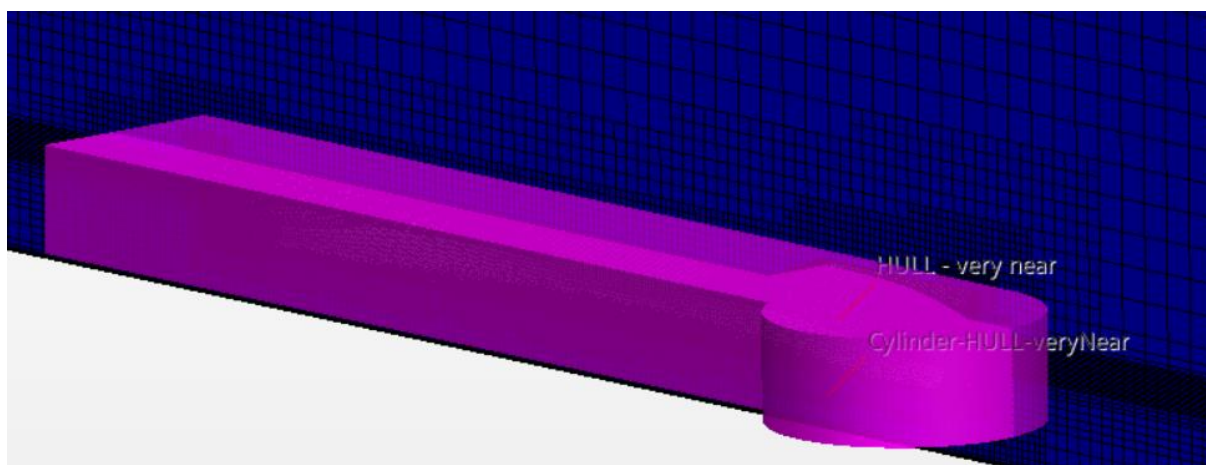


Slika 16. Profinjenja oko krme i pramca



Slika 17. Generirana finija mreža u području pramca

Kako bi se što bolje opisalo strujanje oko trupa modela broda, potrebno je dodatno profiniti mrežu oko trupa modela broda što je prikazano slikom 18.



Slika 18. Profinjenje mreže oko trupa modela broda

4.4.3. Granični sloj

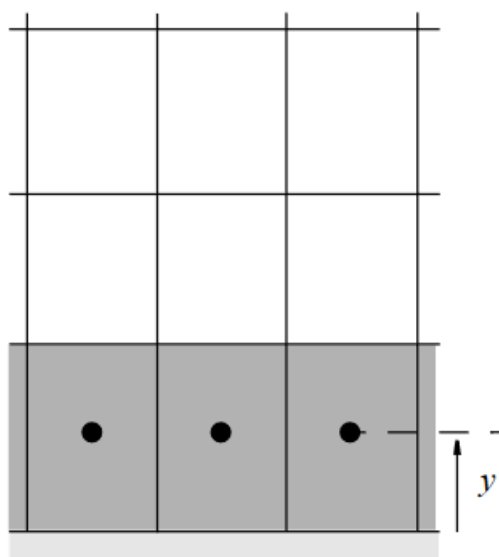
U numeričkim simulacijama provedenim u okviru ovog rada ograničena je i dubina i širina proračunske domene zbog čega se granični sloj, osim uz trup modela broda, formira na dnu i na bočnoj granici domene te je ta dva područja također potrebno profiniti prizmatičnim ćelijama. Postavke diskretizacije graničnog sloja su kako slijedi:

- ukupna debljina sloja prizama (eng. *Prism Layer Total Thickness*),
- broj slojeva prizama (eng. *Number of Prism Layers*),
- faktor rastezanja (eng. *Prism Layer Stretching*).

Za određivanje veličine prve ćelije uz stijenku potrebno je zadovoljiti vrijednost parametra y^+ , a svaka sljedeća ćelija se povećava na temelju faktora rastezanja. Veličina prve ćelije uz stijenku funkcija je Reynoldsovog broja, duljine modela broda te vrijednosti bezdimenzijskog parametra y^+ . Kada je vrijednost y^+ veća od 30 strujanje je opisano logaritamskim profilom brzine, a kada je manja od 1 profil brzine je linearan. Izraz za određivanje y^+ glasi:

$$y^+ = 0,172 \left(\frac{y}{L} \right) Re^{0,9} \quad (54)$$

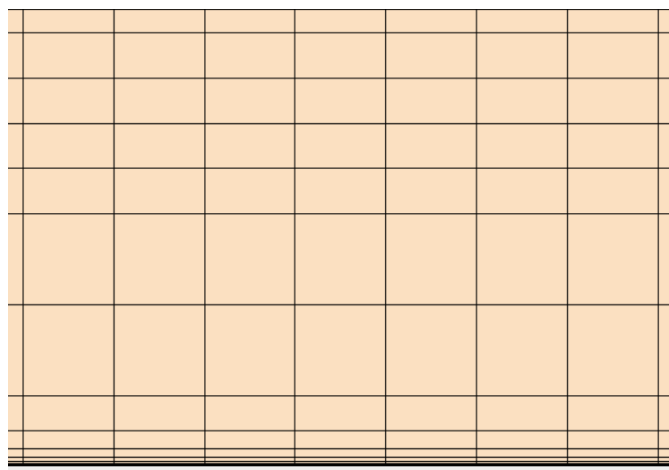
gdje je y polovina visine prve ćelije uz stijenku što je prikazano slikom 19.



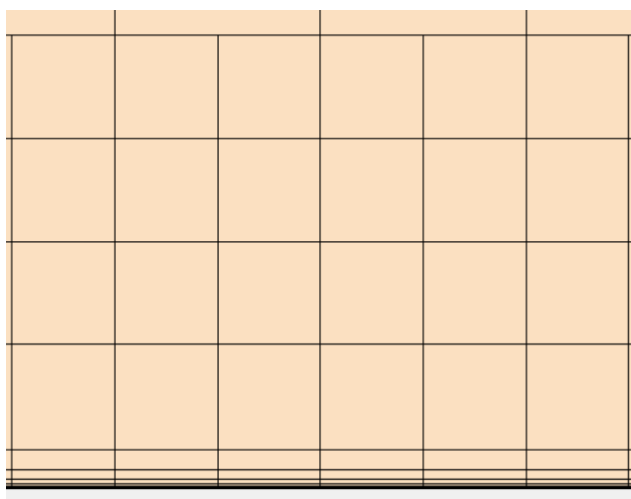
(a) Wall function model

Slika 19. Prikaz prve ćelije graničnog sloja [41]

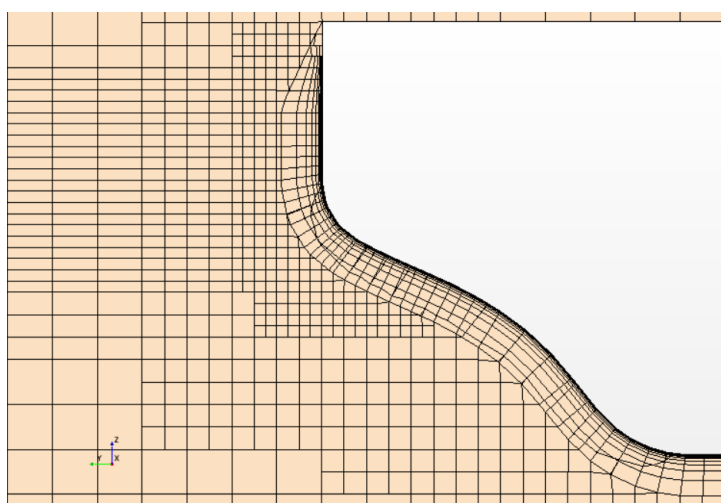
Na slikama 20.-22. prikazana je diskretizacija graničnog sloja u području dna, bočne granice i uz trup modela broda.



Slika 20. Diskretizacija graničnog sloja na dnu proračunske domene



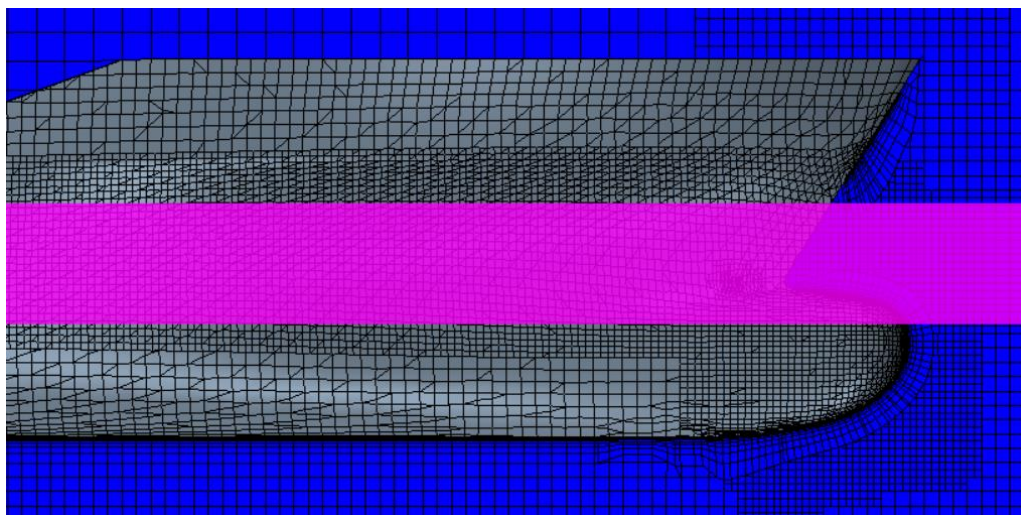
Slika 21. Diskretizacija graničnog sloja na bočnoj granici proračunske domene



Slika 22. Diskretizacija graničnog sloja uz trup modela broda

4.4.4. Slobodna površina

Za opis strujanja na slobodnoj površini potrebno je definirati profinjenja u području očekivane slobodne površine. Iz tog su razloga generirana tri kvadra različite razine profinjenja, a unutar kojih se visina ćelija mijenja u smjeru osi z , pri čemu treba voditi računa o preporuci ITTC-a prema kojoj je potrebno generirati barem 20 ćelija po visini vala.



Slika 23. Prikaz profinjenja slobodne površine

4.4.5. Kelvinov kut

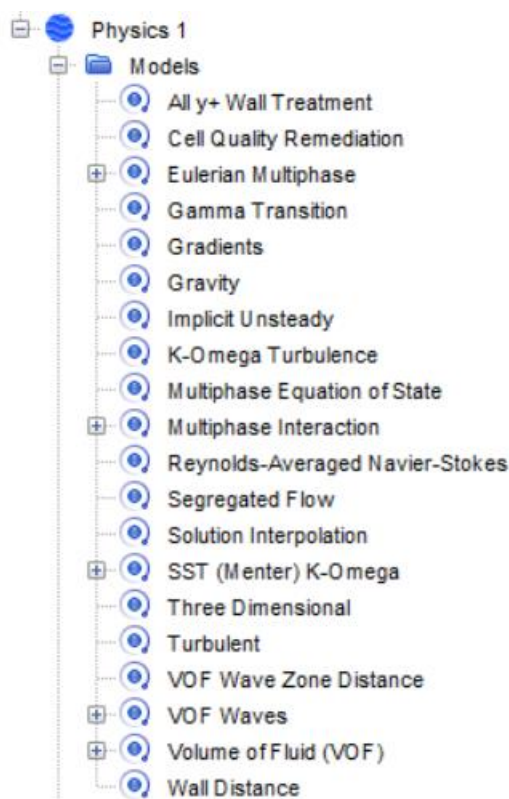
U dubokoj vodi sustav poprečnih i razilaznih valova stvara sliku valova omeđenu pravcima koji sa simetralnom linijom broda zatvaraju kut od $19^{\circ}28'$ poznat pod nazivom Kelvinov kut. U plitkoj vodi slika valova se značajno mijenja ovisno o Fn_h .

4.5. Fizikalni model numeričke simulacije

Uz diskretizaciju proračunske domene potrebno je definirati i fizikalni model unutar numeričkih simulacija. Eulerov višefazni model (eng. *Eulerian Multiphase*) omogućava određivanje slobodne površine čiji se položaj mijenja u vremenu. Na temelju ovog modela definirane su dvije faze, zrak i voda te je za svaku fazu definirana odgovarajuća vrijednost gustoće i dinamičkog koeficijenta viskoznosti. U ovom radu numeričke simulacije provedene su za jednu vrijednost Froudeovog broja, odnosno jednu brzinu čiju je vrijednost potrebno unijeti u postavke VOF valova (eng. *Flat VOF Waves*). Kako bi se u numeričkim simulacijama u neograničenoj vodi izbjegla mogućnost pojave refleksije valova o granice proračunske domene, potrebno je definirati prigušenje VOF valova (eng. *Damping Wave Reflections*). Prigušenje VOF valova definirano je u numeričkim simulacijama u

neograničenoj vodi uz ulaznu, izlaznu i bočnu granicu, gdje je duljina prigušenja VOF valova (eng. *VOF Wave Damping Length*) jednaka duljini modela broda prema preporukama ITTC-a [38]. Ukoliko je modelu broda omogućeno gibanje potrebno je definirati model dinamičke interakcije fluida i tijela (eng. *DFBI- Dynamic Fluid Body Interaction*), unutar kojeg su u ovom radu definirana dva stupnja slobode gibanja, a to su posrtanje i poniranje. Unutar DFBI modela potrebno je definirati masu broda, momente tromosti mase te težište.

U uvjetima ograničene dubine primijenjen je algoritam deformacije mreže (eng. *mesh morphing*), koji preraspodjeljuje vrhove mreže konačnih volumena na temelju pomicanja krute granice s ciljem prilagodbe potencijalno izraženijim gibanjima. Na slici 24. prikazan je odabrani fizikalni model za numeričke simulacije u uvjetima ograničene dubine.



Slika 24. Odabrani fizikalni model za numeričke simulacije

4.6. Parametar rješavača

Prije pokretanja numeričke simulacije, potrebno je još postaviti parametre rješavača (eng. *solver parameters*). Odabran je implicitni rješavač (eng. *Implicit Unsteady*) unutar kojeg se unosi vrijednost vremenskog koraka [43].

Vremenski korak određuje se pomoću sljedećeg izraza:

$$\Delta t = \frac{T}{c} \quad (55)$$

gdje je c koeficijent koji ima različite vrijednosti za različite mreže, a period T određen preko duljine modela broda između okomica i brzine modela broda kako slijedi:

$$T = \frac{L_{PP}}{v} \quad (56)$$

Za finu mrežu vrijednost koeficijenta c je 200, za srednju mrežu 100 i za grubu mrežu 50. Sukladno tome u tablici 5. prikazane su vrijednosti finog, srednjeg te grubog vremenskog koraka.

Tablica 5. Odabrani vremenski koraci

| Vremenski korak | Vrijednost |
|-----------------|------------|
| Fini | 0,0183 s |
| Srednji | 0,0367 s |
| Grubi | 0,0734 s |

U svrhu postizanja što bolje konvergencije rezultata po vremenskom koraku te smanjenja potencijalne nestabilnosti rješenja između koraka iteracije definirani su podrelaksacijski faktori. Vrijednost podrelaksacijskog faktora za tlak je 0,4, za brzinu 0,7 te za volumni udio 0,8. Maksimalan broj unutarnjih iteracija je 5. Ukupno fizikalno vrijeme iznosi 100 s, a definirano je kao $20T$.

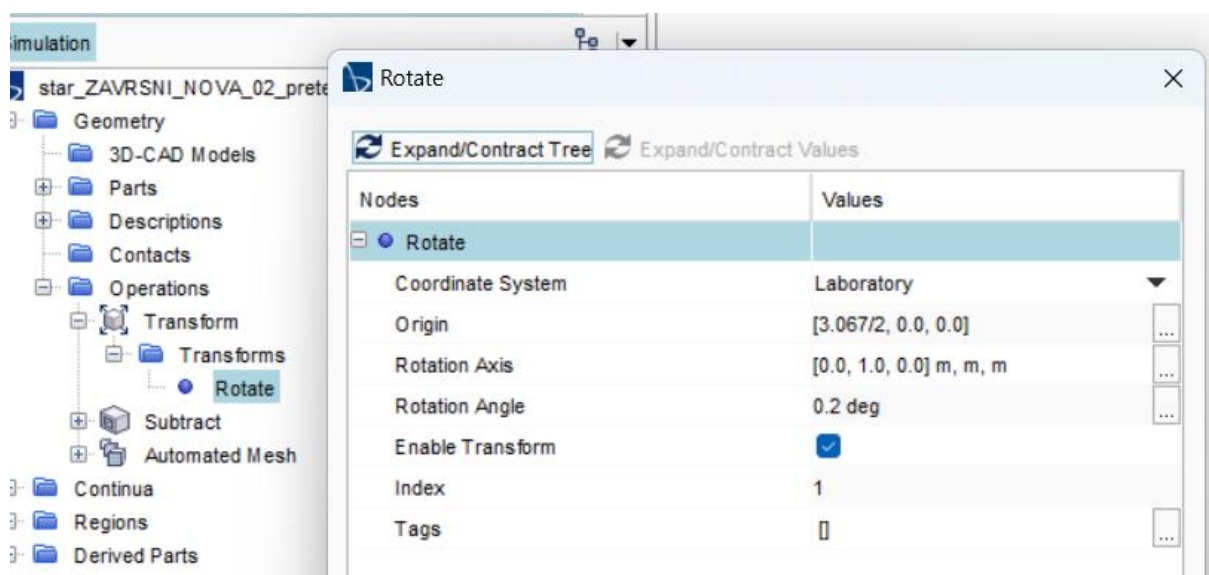
5. POSTAVKE NUMERIČKE SIMULACIJE ZA RAZLIČITE VRIJEDNOSTI TRIMA

U ovom poglavlju dan je opis postavki numeričkih simulacija za različite vrijednosti kuta trima. Numeričke simulacije pokusa otpora modela broda pri četiri kuta trima provedene su primjenom mreže najveće gustoće i najmanjeg vremenskog koraka.

Korištena je ista proračunska domena kao i u numeričkim simulacijama pokusa otpora modela broda na ravnoj vodnoj liniji, primijenjeni su isti rubni uvjeti, isti fizikalni model te je geometrijska mreža diskretizirana na isti način. Promjena koja je napravljena unutar postavki jest onemogućavanje DFBI-a.

5.1. Postavljanje kuta trima na modelu broda

U svrhu postizanja odgovarajućeg kuta trima, korištena je naredba *transform* unutar koje je odabrana opcija rotiranja modela broda i odgovarajućih volumetrijskih kontrola (eng. *Rotate*) što je prikazano na slici 25.

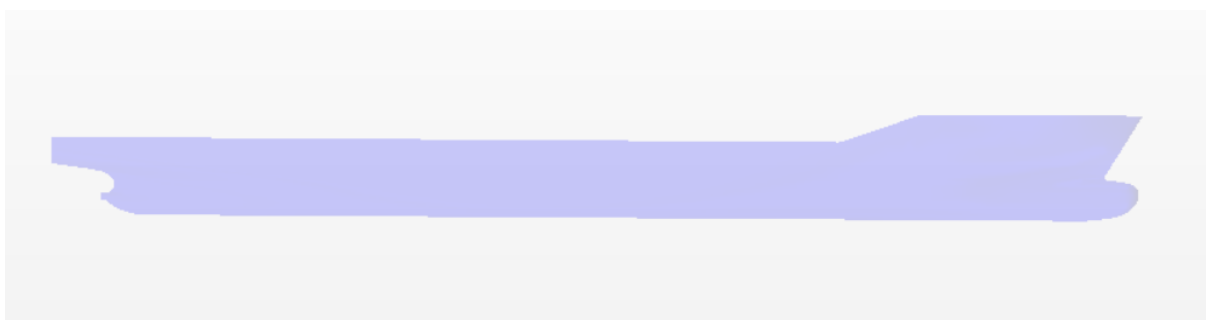


Slika 25. Prikaz postavki za postavljanje modela broda na kut trima od $0,2^\circ$

Na slikama 26. i 27. dan je model broda u zatezi i pretezi pri kutu trima od $0,4^\circ$.



Slika 26. Model broda sa zategom od $0,4^\circ$



Slika 27. Model broda s pretegom od $0,4^\circ$

Na slikama 28. i 29. prikazana su profinjenja u području pramca i krme te oko modela broda nakon podešavanja željenog kuta trima.



Slika 28. Prikaz volumetrijskih kontrola na krmi i pramcu nakon postavljanja modela broda na određeni kut trima



Slika 29. Volumetrijska profinjenja oko trupa modela broda nakon postavljanja modela broda na određeni kut trima

Ukupno su provedene četiri simulacije za vrijednosti kuta trima modela broda od $0,2^\circ$, $-0,2^\circ$, $0,4^\circ$ i $-0,4^\circ$. Kao što je već spomenuto, za razliku od numeričkih simulacija strujanja oko modela broda na ravnoj vodnoj liniji provedenih s ciljem verifikacije i validacije rezultata, u numeričkim simulacijama pokusa otpora modela broda za različite kutove trima modelu broda je onemogućeno gibanje.

6. ANALIZA REZULTATA NUMERICKE SIMULACIJE

U ovom poglavlju dan je pregled rezultata provedenih numeričkih simulacija pokusa otpora KCS modela broda. Dani su rezultati ukupnog otpora, urona i kuta trima dobiveni primjenom tri mreže različite gustoće s najmanjim vremenskim korakom te tri različita vremenska koraka s finom mrežom. Na temelju dobivenih rezultata proveden je postupak verifikacije te je izračunata numerička nesigurnost ukupnog otpora, urona i kuta trima. Numerički rezultati dobiveni primjenom fine mreže i najmanjeg vremenskog koraka uspoređeni su s eksperimentalnim rezultatima dostupnim u literaturi [34]. Također je dan prikaz položaja slobodne površine, slika valova, hidrodinamičkog tlaka duž trupa modela broda, tangencijalnih naprezanja te polja brzine. Na kraju je dana usporedba rezultata ukupnog otpora modela broda na ravnoj kobilici i pri različitim vrijednostima kuta trima.

6.1. Verifikacija rezultata

Postupak verifikacije proveden je za slučaj modela broda u vodi ograničene širine i dubine primjenom tri gustoće mreže i tri vremenska koraka. U tablici 6. prikazani su rezultati numeričkih simulacija dobiveni primjenom različite gustoće mreže, a u tablici 7. rezultati dobiveni primjenom različitog vremenskog koraka. U numeričkim simulacijama provedenim primjenom različite gustoće mreže dobivena je divergencija za ukupni otpor, monotona konvergencija za uron i oscilatorna konvergencija za kut trima. Primjenom različitog vremenskog koraka dobivena je divergencija za ukupni otpor i kut trima te monotona konvergencija za uron. Ukupne numeričke nesigurnosti rezultata prikazane su u tablici 8.

Tablica 6. Rezultati verifikacije ukupnog otpora, urona i kuta trima modela broda dobiveni primjenom različite gustoće mreže

| | $\hat{S}_{i,1}$, N | $\hat{S}_{i,2}$, N | $\hat{S}_{i,3}$, N | $\varepsilon_{i,21}$, N | $\varepsilon_{i,32}$, N | R_i | U_i | U_G , % |
|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|--------------------------|-------|---------|-----------|
| Ukupni otpor, N | 2,873 | 2,85 | 2,869 | -0,022 | 0,018 | -1,22 | 0,022 | 0,757 |
| Uron, m | -0,00496 | -0,00515 | -0,00558 | -0,0002 | -0,0004 | 0,459 | 0,00084 | -16,89 |
| Kut trima, ° | 0,0688 | 0,0678 | 0,0715 | -0,001 | 0,0037 | -0,27 | 0,0018 | 2,687 |

**Tablica 7. Rezultati verifikacije ukupnog otpora, urona i kuta trima modela broda
dobiveni primjenom različitog vremenskog koraka**

| | $\hat{S}_{i,1}$, N | $\hat{S}_{i,2}$, N | $\hat{S}_{i,3}$, N | $\varepsilon_{i,21}$, N | $\varepsilon_{i,32}$, N | R_i | U_i | U_T , % |
|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|--------------------------|--------|---------|-----------|
| Ukupni otpor, N | 2,872 | 2,791 | 2,861 | -0,08 | 0,07 | -1,16 | 0,08 | 2,84 |
| Uron, m | -0,00496 | -0,00501 | -0,00517 | -0,00005 | 0,00016 | 0,369 | 0,00025 | -4,97 |
| Kut trima, ° | 0,069 | 0,0629 | 0,0632 | -0,0059 | 0,00041 | -14,61 | 0,006 | 8,64 |

Tablica 8. Ukupna numerička nesigurnost rezultata

| | U_G , % | U_T , % | U_{SN} , % |
|-----------------|-----------|-----------|--------------|
| Ukupni otpor, N | 0,757 | 2,84 | 2,93 |
| Uron, m | -16,89 | -4,97 | 17,61 |
| Kut trima, ° | 2,69 | 8,64 | 9,05 |

Iz tablice 8. vidljivo je da je ostvarena prihvatljiva numerička nesigurnost za ukupni otpor, dok su numeričke nesigurnosti za kut trima i uron nešto veće.

6.2. Validacija rezultata

Rezultati simulacije provedene primjenom fine mreže i najfinijeg vremenskog koraka za $Fn = 0,469$ uspoređeni su s dostupnim eksperimentalnim rezultatima [34] s ciljem validacije ukupnog otpora, urona i trima. Eksperimentalni rezultati dani su u tablici 9., a rezultati provedene numeričke simulacije u tablici 10.

Tablica 9. Rezultati modelskih ispitivanja za $Fn=0,469$ [34]

| Ukupni otpor, N | Uron, m | Kut trima, ° |
|-----------------|---------|--------------|
| 3,005 | -0,0056 | 0,0687 |

Tablica 10. Rezultati numeričke simulacije primjenom fine mreže i finog vremenskog koraka za $Fn=0,469$

| Ukupni otpor, N | Uron, m | Kut trima, ° |
|-----------------|----------|--------------|
| 2,873 | -0,00496 | 0,0688 |

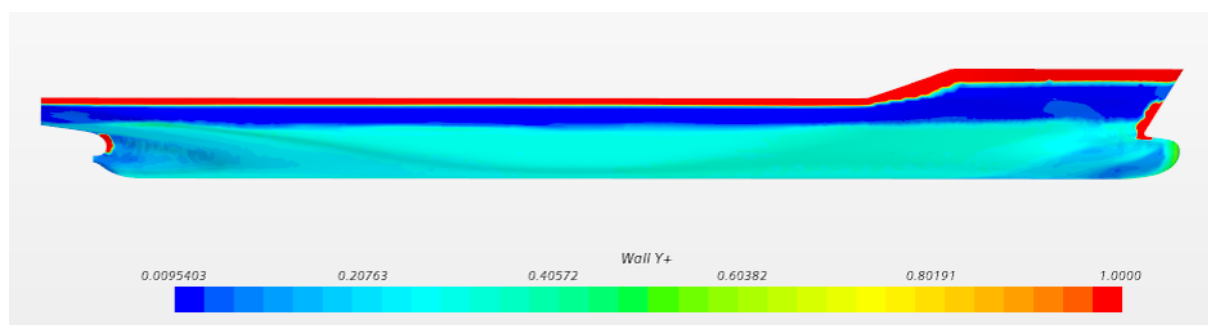
U tablici 11. dane su vrijednosti relativne devijacije ukupnog otpora, urona i kuta trima modela broda izračunate prema jednadžbi (46). Za ukupni otpor relativna devijacija iznosi -4,39%, a za trim 0,22%. Za uron je dobivena nešto veća relativna devijacija od -11,43%.

Tablica 11. Relativna devijacija ukupnog otpora, urona i trima modela broda pri $Fn=0,469$

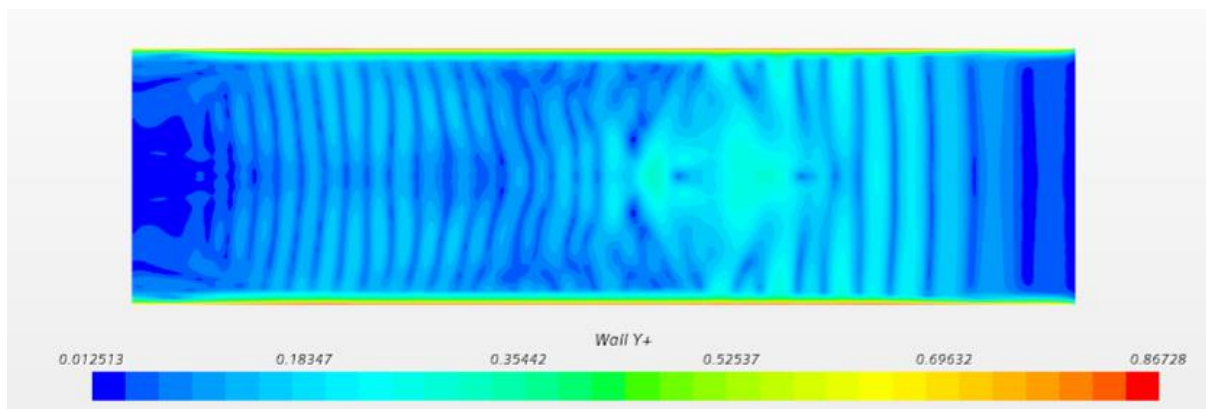
| | Ukupni otpor, N | Uron, m | Kut trima, ° |
|----------|-----------------|---------|--------------|
| $RD, \%$ | -4,39 | -11,43 | 0,22 |

6.3. Prikaz i usporedba rezultata

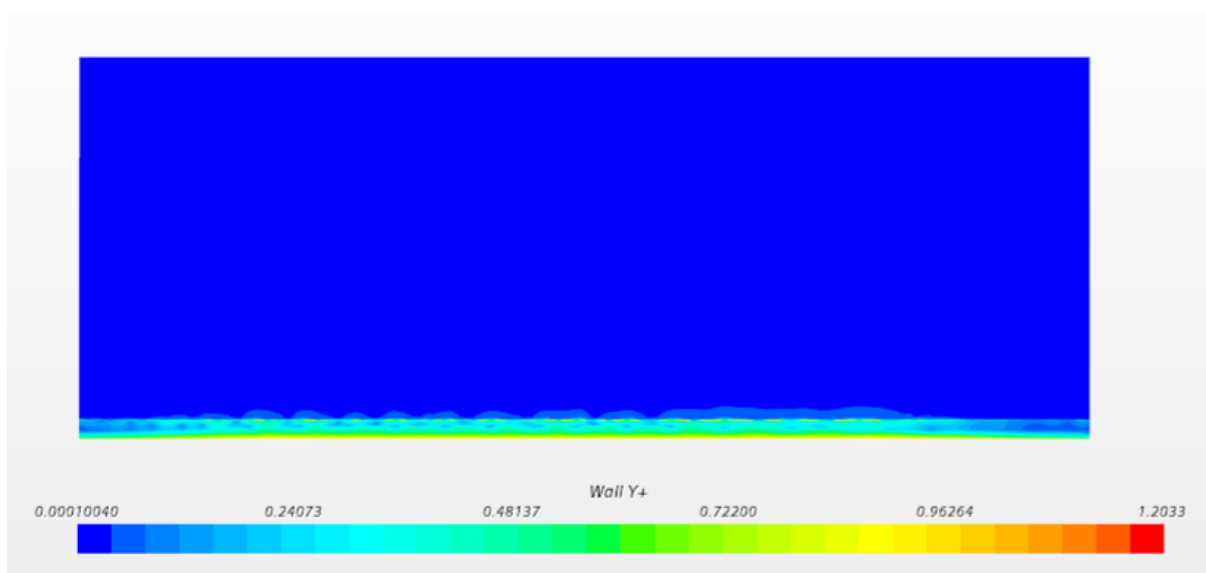
U nastavku je dana usporedba rezultata dobivenih za model broda na ravnoj vodnoj liniji te za različite vrijednosti kuta trima. Prikazane su promjene u slikama valova, položaju slobodne površine duž trupa modela broda, polju strujanja ispod trupa modela broda, raspodjeli hidrodinamičkog tlaka duž trupa modela broda, kao i tangencijalnih naprezanja za različite kutove trima. Prilikom provođenja numeričkih simulacija bilo je potrebno zadovoljiti bezdimenzijski parametar y^+ , koji je za model broda manji od 1. Na slikama 30.-32. dan je prikaz raspodjele y^+ po trupu modela broda, na dnu te na bočnoj granici proračunske domene. Iz slike je vidljivo da se vrijednost parametra y^+ nalazi između 0 i 1.



Slika 30. Raspodjela parametra y^+ duž trupa modela broda



Slika 31. Raspodjela parametra y^+ na dnu proračunske domene



Slika 32. Raspodjela parametra y^+ na bočnoj granici proračunske domene

6.3.1. Usporedba rezultata

U ovom radu su na temelju rezultata numeričkih simulacija analizirane vrijednosti ukupnog otpora za kutove trima 0° , $0,2^\circ$, $-0,2^\circ$, $0,4^\circ$ i $-0,4^\circ$. S obzirom da su za isti model broda i konfiguraciju plovnog puta u literaturi dane numerički dobivene vrijednosti ukupnog otpora za kutove trima od $0,3^\circ$, $-0,3^\circ$, $0,5^\circ$ i $-0,5^\circ$ cilj je bio analizirati ukupni otpor pri kutovima trima između navedenih vrijednosti. Rezultati numeričkih simulacija dani su u tablici 12. Negativne vrijednosti kuta trima odnose se na brod u zatezi, a pozitivne na brod u pretezi.

Tablica 12. Rezultati numeričkih simulacija za ispitane kutove trima

| Kut trima, ° | Ukupni otpor, N |
|--------------|-----------------|
| 0° | 2,87 |
| 0,2° | 2,64 |
| -0,2° | 2,88 |
| 0,4° | 2,65 |
| -0,4° | 2,7 |

Na temelju dobivenih rezultata vidljivo je kako je ukupni otpor za vrijednosti trima od 0,2° i 0,4° manji za čak oko 8 % u odnosu na ravnu vodnu liniju. Također je moguće uočiti kako je jedino pri kutu trima od -0,2° ukupni otpor nešto veći u odnosu na ravnu vodnu liniju. Može se zaključiti kako je odabirom optimalnog kuta trima moguće postići smanjenje ukupnog otpora modela broda.

U tablici 13. dani su rezultati numeričkih simulacija dostupnih u literaturi [43] za druge vrijednosti kuta trima 0,3°, -0,3°, 0,5° i -0,5°, a s ciljem analize trenda ukupnog otpora u ograničenoj vodi u ovisnosti o kutu trima.

Tablica 13. Rezultati ukupnog otpora iz literature [43]

| Kut trima, ° | Ukupni otpor, N |
|--------------|-----------------|
| 0° | 3,005 |
| 0,3° | 2,86 |
| -0,3° | 2,91 |
| 0,5° | 2,89 |
| -0,5° | 3,02 |

Usporedbom numeričkih rezultata dostupnih u literaturi, prikazanih u tablici 13., moguće je zaključiti kako je za gotovo sve kutove trima ostvareno određeno smanjenje ukupnog otpora, osim za kut trima od -0,5°, gdje je vrijednost ukupnog otpora veća za 0,5% u odnosu na ravnu vodnu liniju. Usporedbom dobivenih numeričkih rezultata i rezultata dostupnih u literaturi vidljivo je kako je najveće smanjenje ukupnog otpora dobiveno za kutove trima od 0,2°, -0,4° i 0,4°. Moguće je zaključiti kako ne postoji pravilo koji trim odabrati u cilju smanjenja ukupnog otpora, obzirom da to značajno ovisi o formi broda, ograničenosti plovnog puta te Froudeovom broju.

U tablici 14. dani su iznosi otpora tlaka i otpora trenja za svaki ispitani kut trima. Vidljiv je značajniji utjecaj kuta trima na promjenu otpora tlaka u odnosu na otpor trenja. Smanjenje ukupnog otpora broda s promjenom kuta trima uzrokovano je najviše smanjenjem otpora tlaka.

Tablica 14. Otpor tlaka i otpor trenja za ispitane kutove trima

| Kut trima, ° | Otpor tlaka, N | Otpor trenja, N |
|--------------|----------------|-----------------|
| 0° | 0,59 | 2,28 |
| 0,2° | 0,42 | 2,22 |
| -0,2° | 0,68 | 2,2 |
| 0,4° | 0,44 | 2,21 |
| -0,4° | 0,51 | 2,19 |

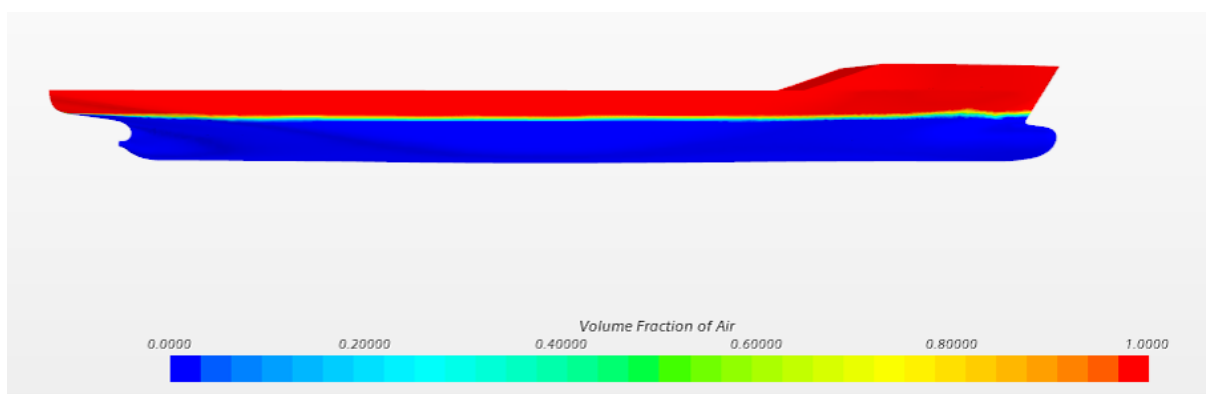
Tablica 15. Relativna devijacija otpora tlaka i otpora trenja za različite kutove trima u odnosu na ravnu vodnu liniju

| Kut trima, ° | -0,2 | 0,2 | 0,4 | -0,4 |
|------------------------------|-------|--------|--------|--------|
| <i>RD</i> za otpor tlaka, % | 9,68 | -32,26 | -29,03 | -17,74 |
| <i>RD</i> za otpor trenja, % | -7,72 | -6,88 | -7,3 | -8,14 |

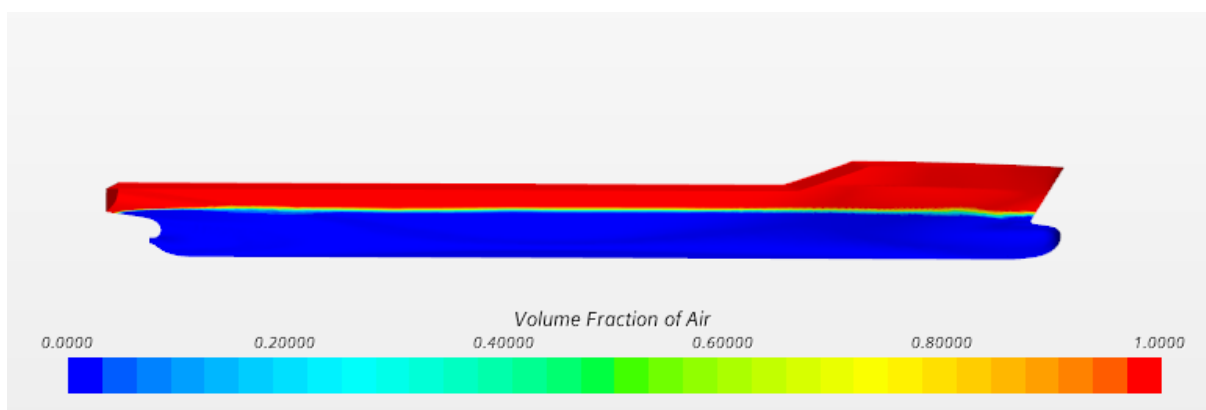
U tablici 15. dane su relativne devijacije dobivenih vrijednosti otpora tlaka i trenja pri različitim kutovima trima u odnosu na ravnu vodnu liniju. Vidljivo je kako je pri kutovima trima od 0,2° i 0,4° dobiveno najveće smanjenje otpora tlaka u odnosu na ravnu vodnu linije što je rezultiralo i najvećim smanjenjem ukupnog otpora broda pri tim kutovima trima. Također je vidljivo smanjenje otpora trenja pri svim ispitanim kutovima trima. Iznimka je kut trima od -0,2°, kod kojeg je ukupni otpor broda nešto veći nego na ravnoj vodnoj liniji uslijed povećanja otpora tlaka. Moguće je zaključiti kako kut trima ima najveći utjecaj na otpor tlaka, dok je njegov utjecaj na otpor trenja znatno manji.

6.3.2. Prikaz slobodne površine

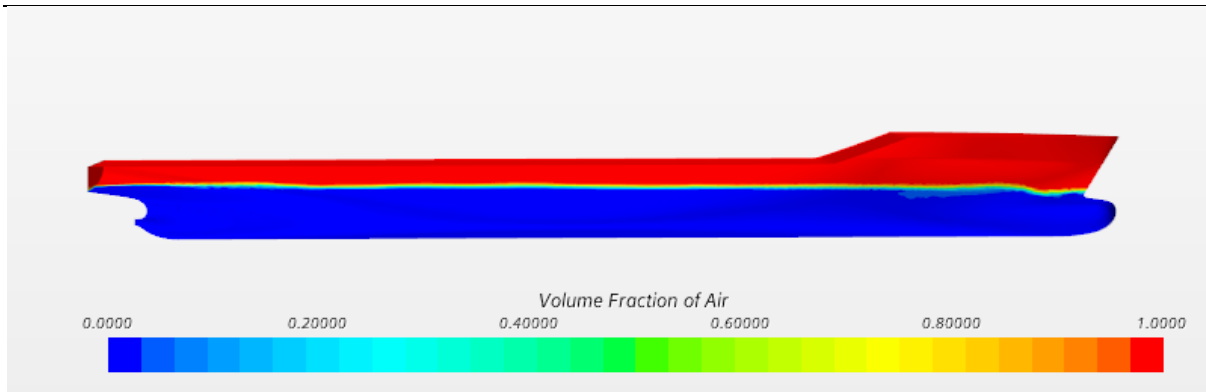
Na slikama 33.-37. dan je prikaz slobodne površine na trupu modela broda za različite vrijednosti kuta trima. Slobodna površina određena je na temelju volumnog udjela zraka u ćeliji. Kada je vrijednost volumnog udjela zraka u ćeliji jednaka 0, volumen je ispunjen vodom, što je na slikama prikazano plavom bojom. Za slučaj kada je vrijednost volumnog udjela zraka u ćeliji jednaka 1, volumen je ispunjen zrakom što je prikazano crvenom bojom. Kod kutova trima od $-0,2^\circ$ i $-0,4^\circ$ u području pramčanog ramena generira se sustav valova koji započinje s valnim dolom kao posljedica pada tlaka u tom području.



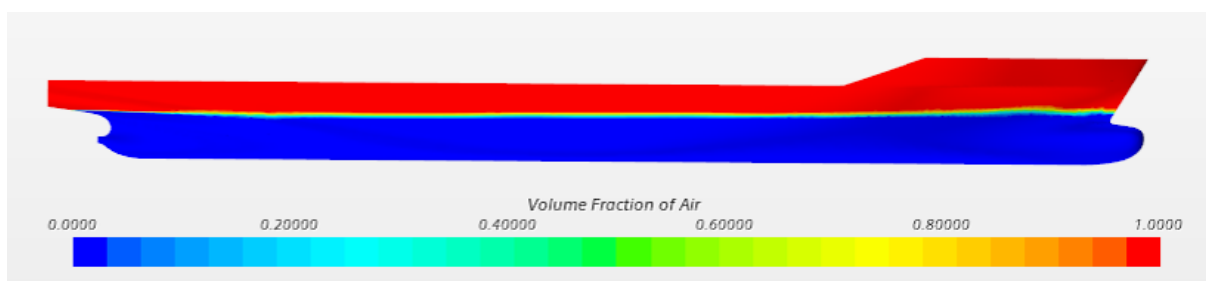
Slika 33. Prikaz slobodne površine duž trupa modela broda na ravnoj vodnoj liniji



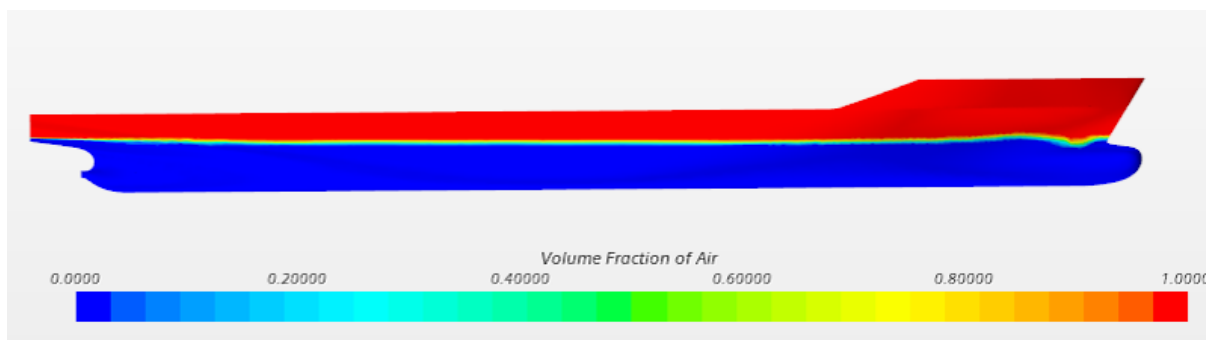
Slika 34. Prikaz slobodne površine duž trupa modela broda za kut trima od $0,2^\circ$



Slika 35. Prikaz slobodne površine duž trupa modela broda za kut trima od $-0,2^\circ$



Slika 36. Prikaz slobodne površine duž trupa modela broda za kut trima od $0,4^\circ$

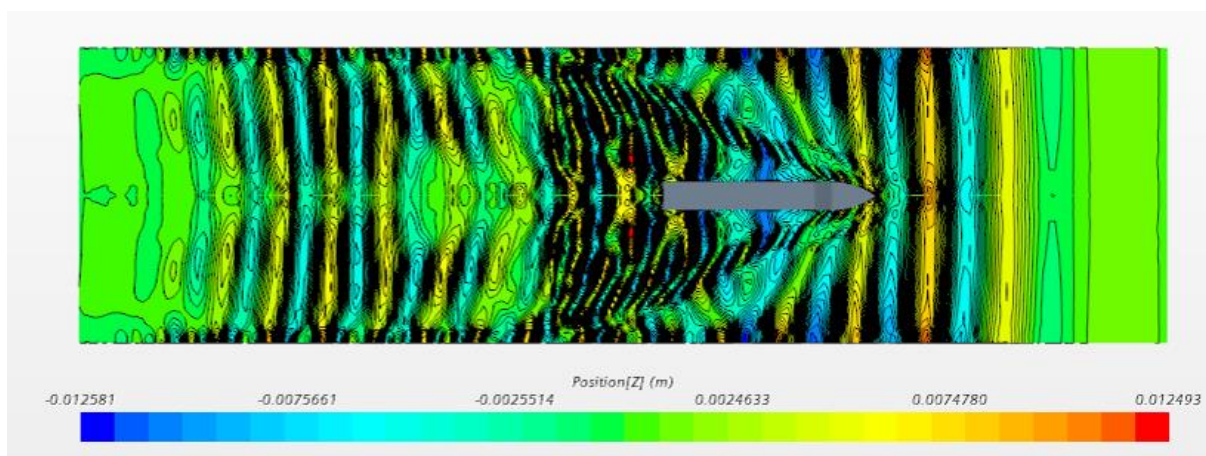


Slika 37. Prikaz slobodne površine duž trupa modela broda za kut trima od $-0,4^\circ$

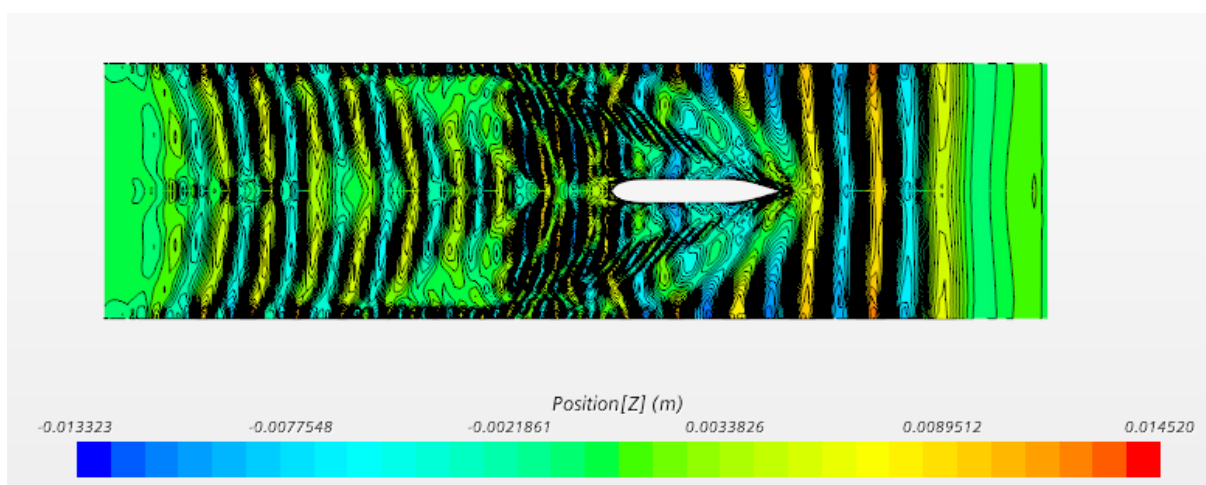
6.3.3. Slika valova

Slikama 38.-42. prikazane su slike valova oko modela broda pri različitim vrijednostima kuta trima. Sustav valova broda sastoji se od poprečnih i razilaznih valova kao što je vidljivo na slikama. Također je vidljiv značajan utjecaj bočne stijenke na sliku valova kao i pojava refleksije valova. Ograničena širina plovnog puta uzrokuje pojavu refleksije valova i interferencije valova uzvodno. Pri takvim uvjetima valovi se nekoliko puta reflektiraju i interferiraju stvarajući pritom složenu sliku valova što je u skladu s rezultatima dostupnim u

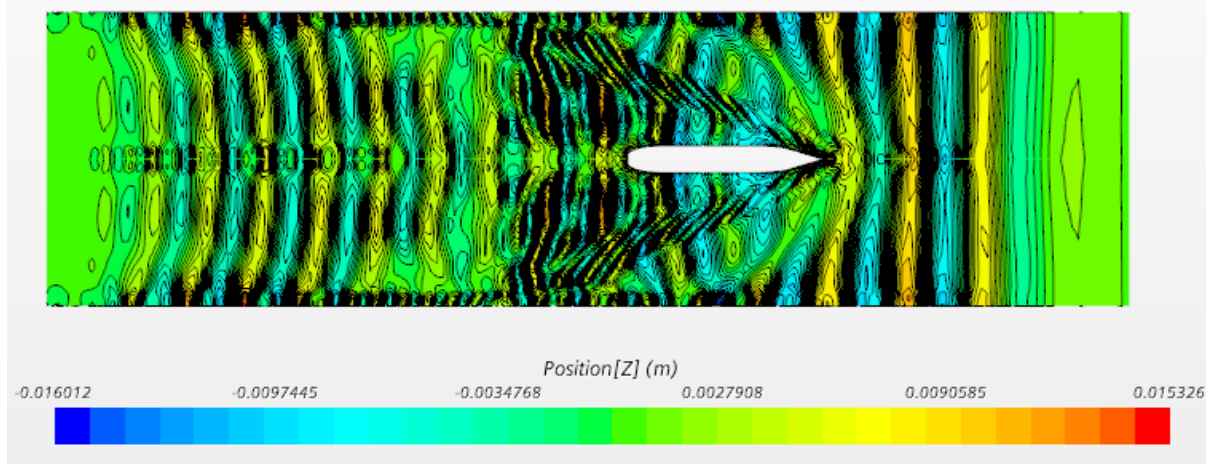
literaturi [44]. Valni sustav broda koji nastaje na pramcu odbija se od bočnu stijenku, smanjuje mu se brzina, povećava valna visina te mijenja smjer. Valovi reflektirani o bočnu stijenku interferiraju s brodskim valnim sustavom stvarajući sliku valova nizvodno, ali uzrokuju i pojavu valova uzvodno. To je posebno izraženo pri najvećem i najmanjem ispitanom kutu trima. Obzirom da brodovi u kanalima plove pri nižim brzinama, valovi se do vrijednosti Froudeovih brojeva na temelju dubine manjim od 0,1, odnosno u podkritičnom polju brzina, smatraju zanemarivima. Froudeov broj na temelju dubine u ovom radu iznosi 0,469 te su generirani valovi značajni. Slike valova dobivene numeričkim simulacijama u okviru ovog rada pokazuju zadovoljavajuće slaganje s rezultatima sličnih studija [45], gdje je također moguće uočiti valove koji nastaju uzvodno od modela broda. Kod broda u zatezi pri većem kutu trima vidljivo je značajno smanjenje duljine poprečnih valova. Na slikama je vidljivo da se najveće valne visine postižu za kut trima od $-0,2^\circ$, a najmanje za model broda na ravnoj vodnoj liniji.



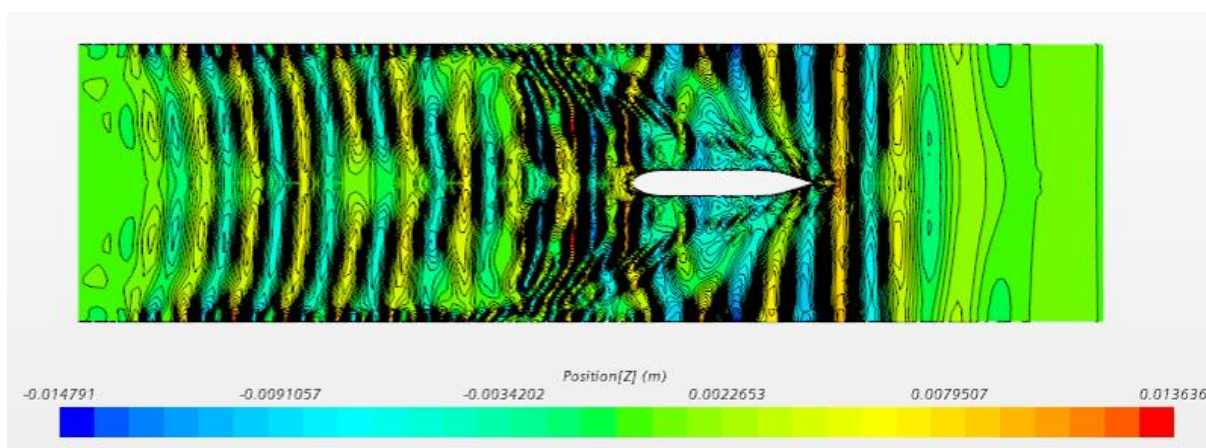
Slika 38. Slika valova za model broda na ravnoj vodnoj liniji



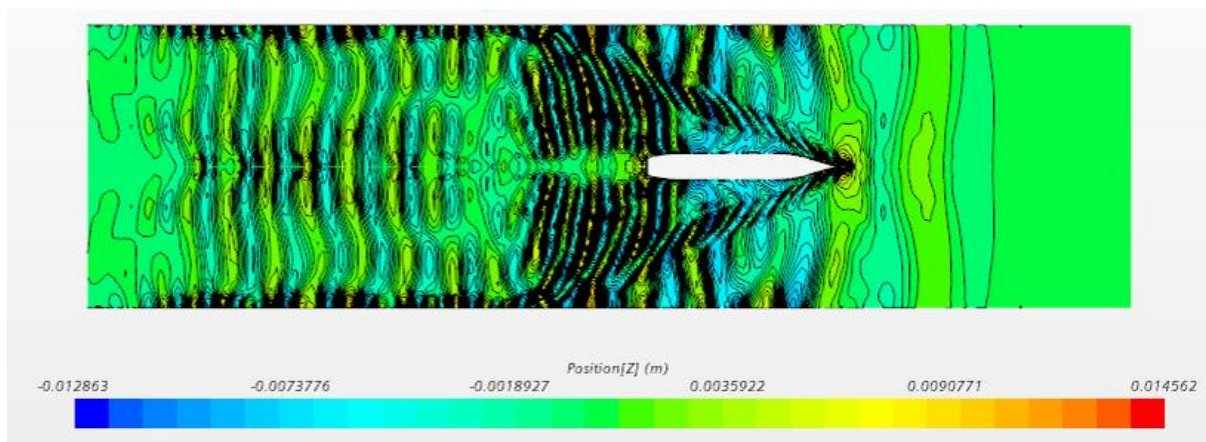
Slika 39. Slika valova za kut trima od $0,2^\circ$



Slika 40. Slika valova za kut trima od $-0,2^\circ$



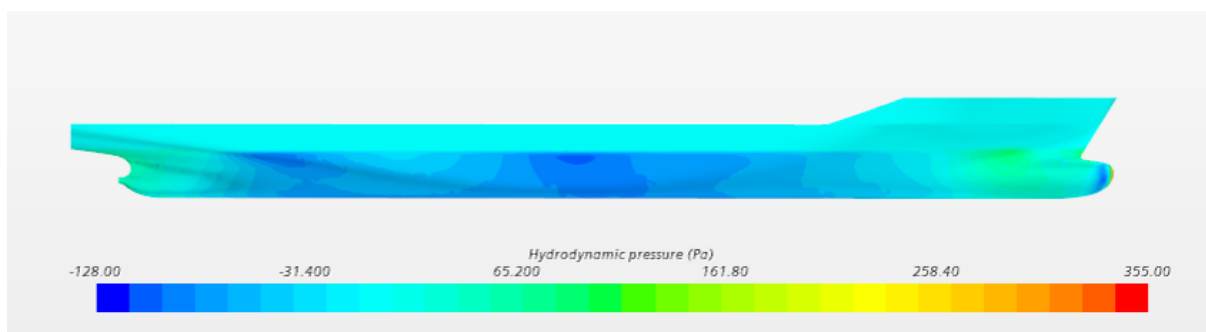
Slika 41. Slika valova za kut trima od $0,4^\circ$



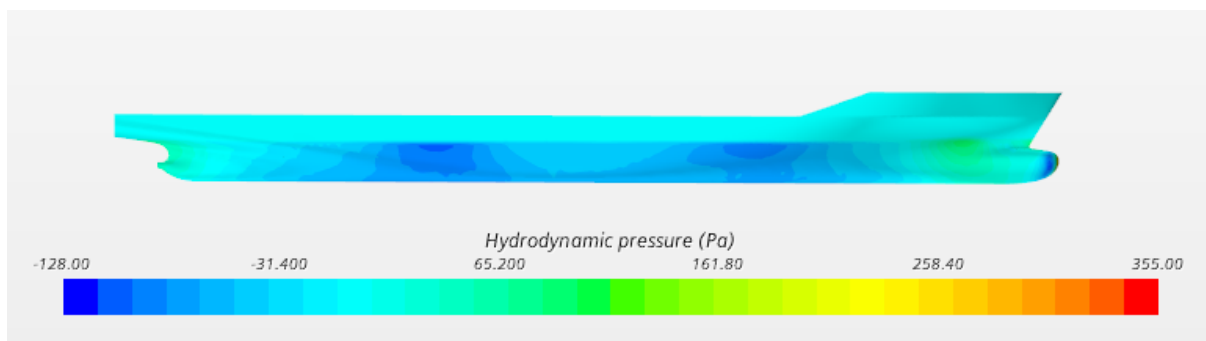
Slika 42. Slika valova za kut trima od $-0,4^\circ$

6.3.4. Hidrodinamički tlak

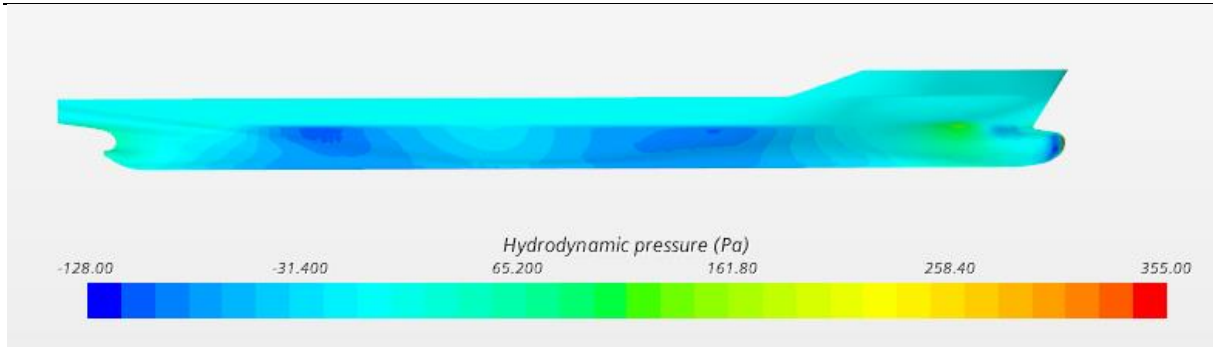
Na slikama 43.-47. dan je prikaz raspodjele hidrodinamičkog tlaka duž trupa modela broda za ispitane vrijednosti kutova trima. Promjena tlaka u neposrednoj blizini slobodne površine izaziva deformaciju slobodne površine koja se očituje u nastanku valova. Na slikama je vidljivo kako je na vrhu bulba dobiven pretlak, a na području pramčanog ramena zbog pada tlaka stvara se sustav valova koji započinje valnim dolom. Pomičući se od pramca prema krmi tlak duž trupa broda pada. Što je dubina manja to će pad tlaka ispod trupa broda biti veći. Pad tlaka uzrokovat će porast tangencijalnih naprezanja, kao i povećanje brzine strujanja vode oko trupa modela broda što će utjecati na porast ukupnog otpora broda. Na temelju prikazanih slika raspodjele hidrodinamičkog tlaka po trupu broda moguće je uočiti razliku u padu tlaka duž trupa broda za različite vrijednosti kuta trima. Za slučaj broda na ravnoj vodnoj liniji i broda u zatezi vidljivo je kako su područja pada tlaka pomaknuta više prema krmi u odnosu na brod u pretezi. Također je moguće uočiti kako je za slučaj najvećeg kuta trima pretege i zatege pad tlaka manje izražen u odnosu na ostale kutove trima.



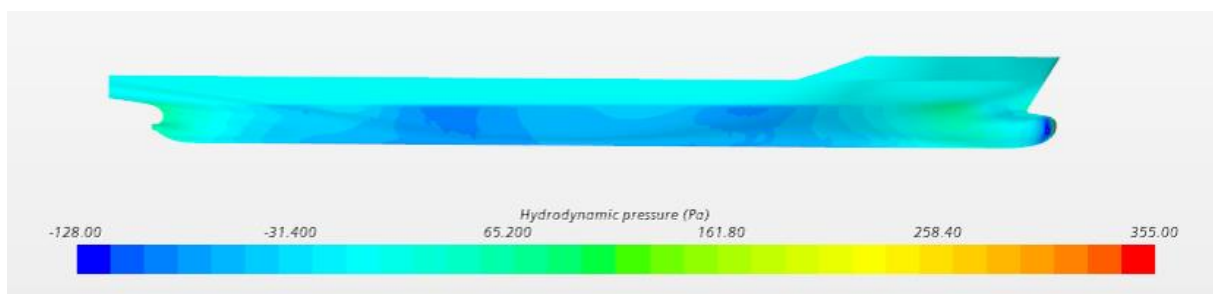
Slika 43. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka duž trupa modela broda na ravnoj vodnoj liniji



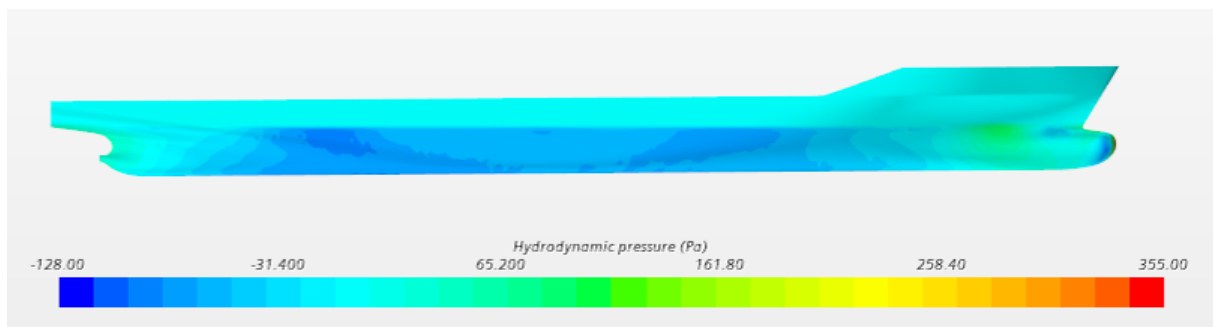
Slika 44. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka duž trupa modela broda za kut trima od 0,2°



Slika 45. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka duž trupa modela broda za kut trima od $-0,2^\circ$



Slika 46. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka duž trupa modela broda za kut trima od $0,4^\circ$



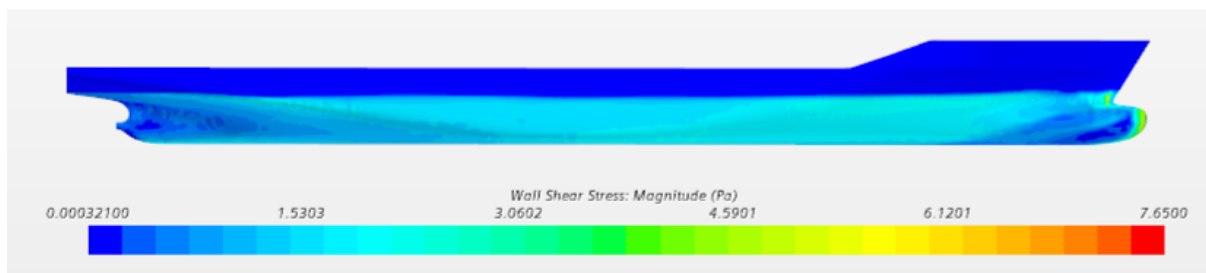
Slika 47. Raspodjela hidrodinamičkog tlaka duž trupa modela broda za kut trima od $-0,4^\circ$

6.3.5. Tangencijalna naprezanja

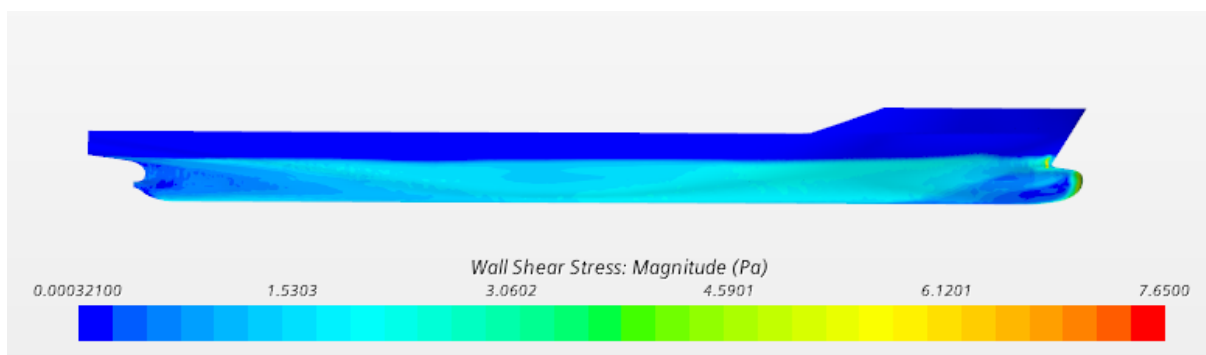
Kao što je već spomenuto, pad tlaka duž trupa modela broda općenito uzrokuje promjenu brzine strujanja oko trupa modela broda te tangencijalnih naprezanja. Uzrok povećanja tangencijalnih naprezanja je povećanje vrijednosti brzine strujanja vode između dna modela broda i dna plovnog puta koje je izraženije što je razmak između dna broda i dna plovnog puta manji. Porast

tangencijalnih napreznja uzrokuje povećanje otpora trenja što u konačnici uzrokuje povećanje ukupnog otpora broda.

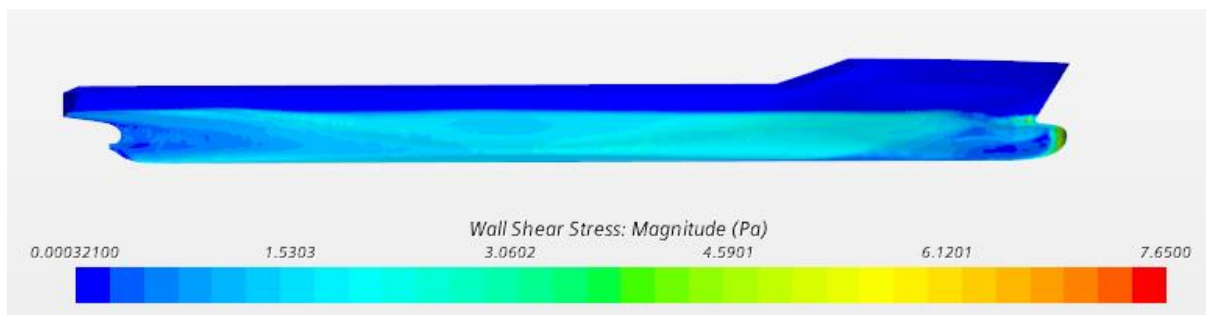
Na slikama 48.-52. dan je prikaz tangencijalnih napreznja duž trupa modela broda za različite vrijednosti kuta trima. Vidljivo je kako nema značajne promjene u raspodjeli tangencijalnih napreznja duž trupa modela broda za sve ispitane kutove trima. To je bilo i očekivano obzirom da su istraživanja [16] pokazala kako je utjecaj trima na tangencijalna napreznja i otpor trenja često zanemariv.



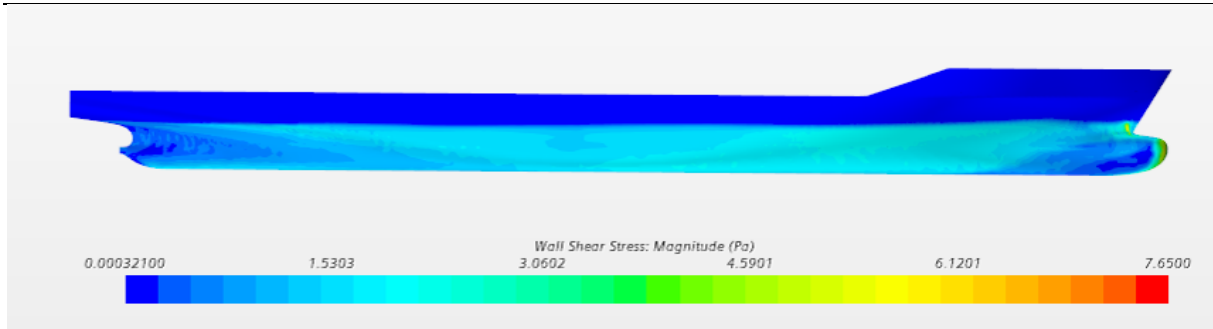
Slika 48. Raspodjela tangencijalnih napreznja po trupu modela broda na ravnoj vodnoj liniji



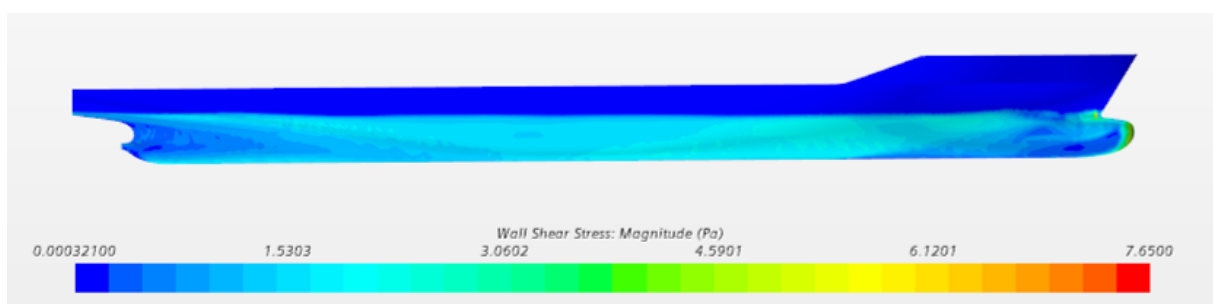
Slika 49. Raspodjela tangencijalnih napreznja po trupu modela broda za kut trima od $0,2^\circ$



Slika 50. Raspodjela tangencijalnih napreznja po trupu modela broda za kut trima od $-0,2^\circ$



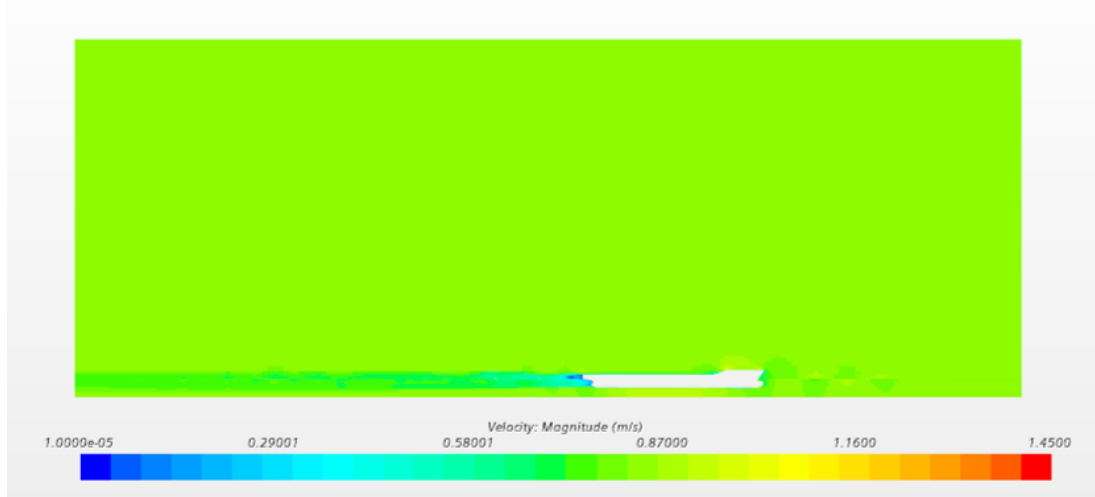
Slika 51. Raspodjela tangencijalnih naprezanja po trupu modela broda za kut trima od $0,4^\circ$



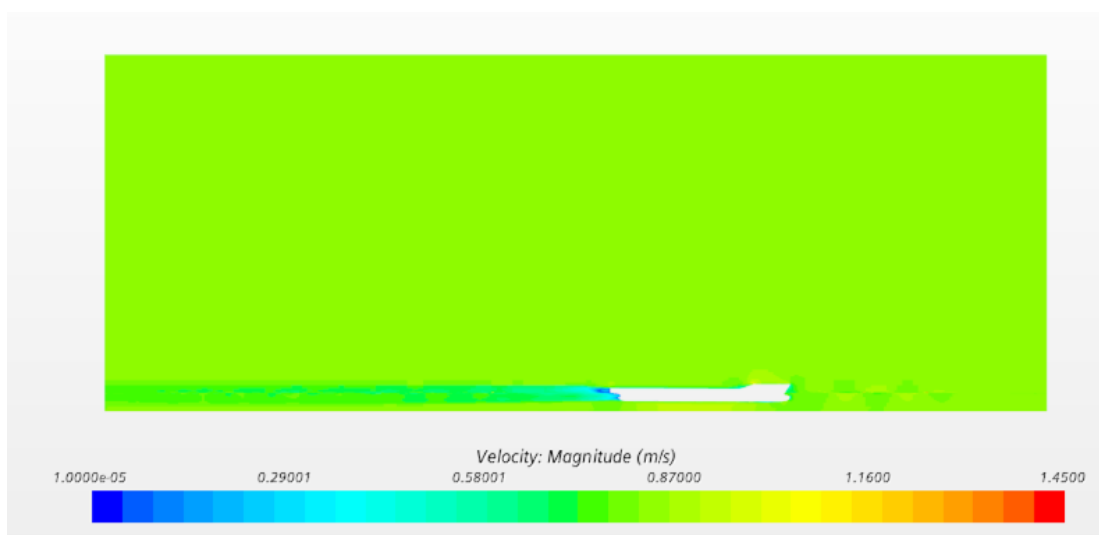
Slika 52. Raspodjela tangencijalnih naprezanja po trupu modela broda za kut trima od $-0,4^\circ$

6.3.6. Polja brzine

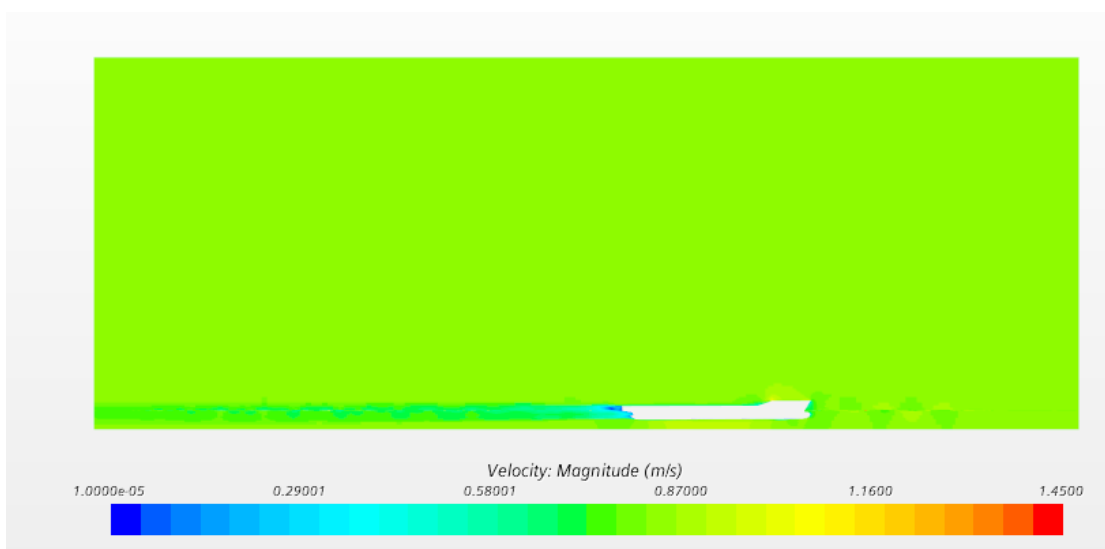
Prikazi polja brzina za ispitane vrijednosti kuta trima dani su na slikama 53.-57. Poznato je kako će brzina strujanja između trupa modela broda i dna plovnog puta biti veća što je dubina plovnog puta manja. Dobiveni rezultati pokazuju kako nema značajne razlike u polju brzina za ispitane kutove trima što je i očekivano obzirom da model broda za koji su provedene numeričke simulacije nema značajan uron koji bi mogao uzrokovati veće promjene brzine strujanja oko trupa modela broda.



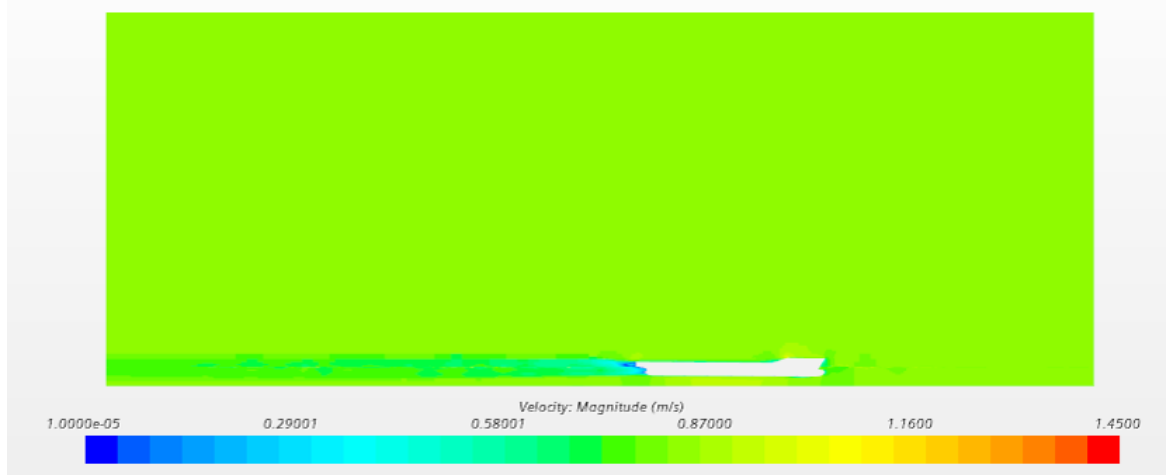
Slika 53. Polje brzina za model broda na ravnoj vodnoj liniji



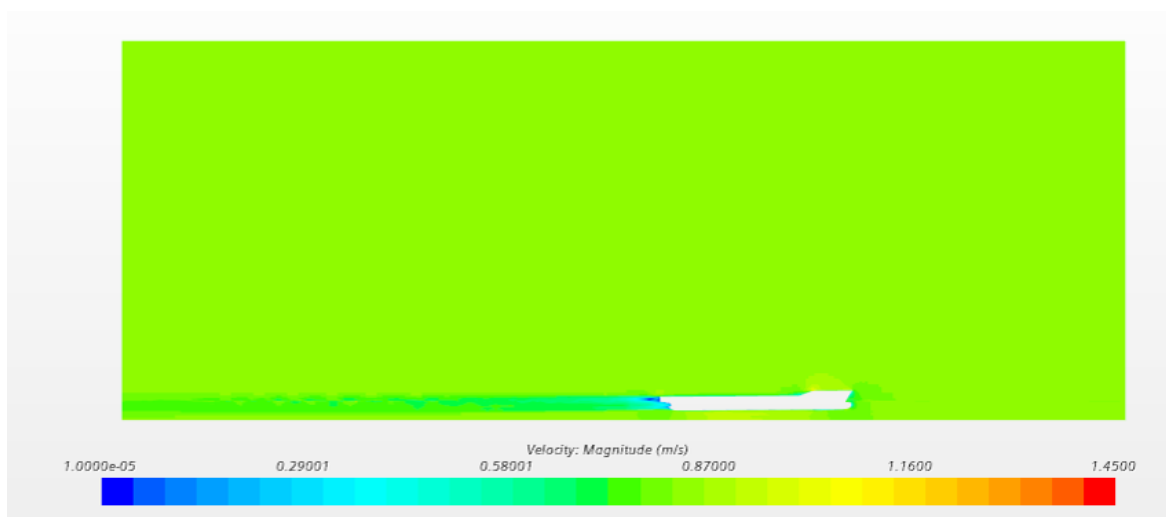
Slika 54. Polje brzina za kut trima od 0,2°



Slika 55. Polje brzina za kut trima od -0,2°



Slika 56. Polje brzina za kut trima od $0,4^\circ$



Slika 57. Polje brzina za kut trima od $-0,4^\circ$

7. ZAKLJUČAK

U ovom radu provedene su numeričke simulacije pokusa otpora modela KCS kontejnerskog broda za ravnu vodnu liniju te četiri vrijednosti kuta trima $0,2^\circ$, $-0,2^\circ$, $0,4^\circ$ i $-0,4^\circ$ s ciljem određivanja utjecaja kuta trima na ukupni otpor broda u ograničenoj i plitkoj vodi. U pregledu literature dan je osvrt na rezultate sličnih studija unutar kojih je istražen utjecaj trima na smanjenje ukupnog otpora broda u ograničenoj vodi. Obzirom da ne postoji jasna ovisnost ukupnog otpora o kutu trima, kako u neograničenoj tako i ograničenoj vodi pri određenoj brzini neki kut trima može povoljno ili nepovoljno utjecati na ukupni otpor broda. Dakle, utjecaj trima na ukupni otpor broda ovisi o nizu čimbenika, kao što su dubina vode, brzina broda, gaz broda, stanje krcanja i slično. Cilj ovog rada bio je odrediti utjecaj kuta trima na ukupni otpor broda za jedan Froudeov broj na temelju dubine pri različitim vrijednostima kuta trima. Korištene su RANS jednadžbe, VOF metoda s ciljem određivanja položaja slobodne površine te $k-\omega$ SST model turbulencije. Proveden je postupak verifikacije i validacije za model broda na ravnoj vodnoj liniji. Postupkom validacije izračunate su relativne devijacije za ukupni otpor, uron i kut trima broda. Dobiveno je odstupanje od $-4,39\%$ za ukupni otpor, za kut trima $0,22\%$ te nešto veće odstupanje za uron od $-11,43\%$. Numerička nesigurnost za ukupni otpor iznosi $2,93\%$, dok su za kut trima i uron dobivene nešto veće numeričke nesigurnosti.

Provedena je analiza raspodjele hidrodinamičkog tlaka i tangencijalnih naprezanja duž trupa modela broda te polja brzine na simetralnoj ravnini. Na temelju dobivenih rezultata moguće je uočiti kako su područja pada tlaka za slučaj broda na ravnoj vodnoj liniji i broda u zatezi pomaknuta više prema krmu u odnosu na brod u pretezi. Također je moguće uočiti kako je za slučaj najvećeg kuta trima pretege i zatege pad tlaka manje izražen u odnosu na ostale slučajeve. Dobiveni rezultati pokazuju kako nema značajnijih razlika u promjeni raspodjele tangencijalnih naprezanja po trupu modela broda te polja brzina između trupa modela broda i dna za sve ispitane kutove trima, kao što je i bilo očekivano, obzirom da je modelu broda tijekom numeričkih simulacija gibanje bilo onemogućeno.

Analizom slika valova za različite kutove trima vidljiva je značajna refleksija valova o bočnu stijenku. Uočeno je smanjenje duljine poprečnih valova iza modela broda te manji broj valova generiranih uzvodno za veći kut trima modela broda u zatezi.

Usporedbom rezultata ukupnog otpora modela broda za ispitane vrijednosti kuta trima ustanovljeno je kako je moguće u ograničenoj i plitkoj vodi postići smanjenje ukupnog otpora

za odgovarajući kut trima. Također je ustanovljeno da se otpor tlaka pri različitim kutovima trima značajnije mijenja u usporedbi s otporom trenja u odnosu na ravnu vodnu liniju.

Dobiveni numerički rezultati uspoređeni su s numeričkim rezultatima dostupnim u literaturi. Obzirom da nije dobivena značajnija promjena u raspodjeli tangencijalnih naprezanja i u polju brzina može se zaključiti da je smanjenje ukupnog otpora broda uzrokovano prvenstveno promjenom otpora tlaka, što je vidljivo i na temelju dobivenih rezultata otpora tlaka i otpora trenja.

Ovim radom pokazano je kako se računalna dinamika fluida može uspješno primijeniti za opisivanje strujanja oko trupa modela broda prilikom plovidbe u ograničenoj i plitkoj vodi. Računalna dinamika fluida omogućava analizu utjecaja kuta trima na smanjenje ukupnog otpora broda s ciljem povećanja energetske učinkovitosti broda u ograničenoj i plitkoj vodi. Provedeno istraživanje je moguće proširiti u više smjerova. Jedan od njih je ispitivanje utjecaja kuta trima na ukupni otpor broda pri različitim brzinama i gazovima. Moguće je provesti ispitivanje za neki drugi tip broda s ciljem određivanja utjecaja trima na ukupni otpor različitih tipova brodova. Također bi bilo korisno provesti numeričke simulacije s modelom broda kojem su omogućeni stupnjevi slobode gibanja kako bi se ispitaio utjecaj dodatnog zagažaja. Od velikog značaja bilo bi ispitati značajke propulzije pri različitim kutovima trima u ograničenoj i plitkoj vodi.

LITERATURA

- [1] Le, T.H., Vu, M.T., Bich, V.N., Phuong, N.K., Ha, N.T.H., Chuan, T.Q., Tu, T.N. (2021). *Numerical investigation on the effect of trim on ship resistance by RANSE method*. Applied Ocean Research, 111, 102642.
- [2] Grlj, C. G., Degiuli, N., & Martić, I. (2023). *The Impact of Numerical Parameters on the Resistance Characteristics of a Container Ship at the Model and Full Scale*. Journal of Marine Science and Engineering, 11(9), 1672.
- [3] Farkas, A., Degiuli, N., & Martić, I. (2017). *Numerical simulation of viscous flow around a tanker model*. Brodogradnja, 68(2), 109-125.
- [4] Farkas, A., Degiuli, N., & Martić, I. (2018). *Assessment of hydrodynamic characteristics of a full-scale ship at different draughts*. Ocean Engineering, 156, 135-152.
- [5] Martić, I., Degiuli, N., Borčić, K., & Grlj, C. G. (2023). *Numerical Assessment of the Resistance of a Solar Catamaran in Shallow Water*. Journal of Marine Science and Engineering, 11(9), 1706.
- [6] Sherbaz, S., Duan, W. (2014). *Ship trim optimization: assessment of influence of trim on resistance of MOERI container ship*. The Scientific World Journal, 2014/603695.
- [7] Islam, H., Soares, G. (2019). *Effect of trim on container ship resistance at different ship speeds and draughts*. Ocean Engineering, 183, 106–115.
- [8] Sun, J., Tu, H., Chen, Y., Xie, D., Zhou, J. (2016). *A study on trim optimization for a container ship based on effects due to resistance*. Journal of Ship Research, 60, 30–47.
- [9] Shivachev, E., Khorasanchi, M., Day, A.H. (2017). *Trim influence on KRISO container ship (KCS); an experimental and numerical study*. In: Proceedings of the ASME 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, pp. 1–7.
- [10] Iakovatos, M.N., Liarokapis, D.E., Tzabiras, G.D. (2013). *Experimental investigation of the trim influence on the resistance characteristics of five ship models*. Developments in Maritime Transportation and Exploitation of Sea Resources, CRC Press, Taylor and Francis, pp. 1–1118.
- [11] Degiuli, N., Farkas, A., Martić, I., Zeman, I., Ruggiero, V., & Vasiljević, V. (2021). *Numerical and experimental assessment of the total resistance of a yacht*. Brodogradnja, 72(3), 61-80.
- [12] Sogihara, N., Tsujimoto, M., Fukasawa, R., Ohba, H. (2018). *Investigation on trim optimization to enhance the propulsive performance of fine ships*. Journal of the Japan Society Naval Architects and Ocean Engineers, 27, 15–22.

- [13] Farkas, A., Degiuli, N., & Martić, I. (2017). *Numerical investigation into the interaction of resistance components for a series 60 catamaran*. *Ocean engineering*, 146, 151-169.
- [14] Moustafa, M.M., Yehia, W., Hussein, A.W. (2015). *Energy efficient operation of bulk carriers by trim optimization*. In: *Proceedings of the 18th International Conference on Ships and Shipping Research*, pp. 484–493.
- [15] Duan, W., Zhang, H., Huang, L., Liu, J., Shao, W., Cao, G., Shi, Z. (2019). *Numerical simulation of trim optimization on resistance performance based on CFD method*. In: *Proceedings of the International Conference on Ocean, Offshore, and Arctic Engineering (OMAE)*, 2, pp. 1–9.
- [16] Islam, H., Soares, G. (2019). *Effect of trim on container ship resistance at different ship speeds and drafts*. *Ocean Engineering*, 183, 106–115.
- [17] Tuck, E.O. (1966). *Shallow-water flows past slender bodies*, *Journal of Fluid Mechanics*, 26 (1), 81–95.
- [18] Gourlay, T. (2008c). *Sinkage and trim of two ships passing each other on parallel courses*. *Ocean Engineering*, 36 (14), 1119–1127.
- [19] Sergent, P., Lefrançois, E., Mohamad, N. (2014). *Virtual bottom for ships sailing in restricted waterways (unsteady squat)*. *Ocean Engineering*, 110, 205–214, Part A.
- [20] Alderf, N., Lefrançois, E., Sergent, P., Debaillon, P. (2011). *Dynamic ship response integration for numerical prediction of squat in highly restricted waterways*. *International Journal for Numerical. Methods in Fluids*, 65 (7), 743–763.
- [21] Yazaki, A., Ohashi, S. and Sugawara, K. (1972). *On the relations between the resistance and trim at the ballast condition of the huge full tanker models*, *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 131, pp. 1-8.
- [22] Yanagihara, T. and Kawakami, Y. (1985). *On the Effect of Ship's Loading Condition upon the Propulsive Performance – Investigation into two bulk carrier ships having different particular dimensions*. *Ship Research Institute Report*, Vol. 22, No. 2, pp. 125-138.
- [23] Tsugane, M. and Kobayashi, H. (1987). *A Study of Optimum Trim for Energy Saving*. *Journal of Japan Institute of Navigation*, Vol. 77, pp. 163-173.
- [24] Larsen, N.L., Simonsen, C.D., Nielsen, C.K. and Holm, C.R. (2012). *Understanding the physics of trim*. 9th annual Green Ship Technology Conference, pp.1-10.
- [25] Tu, T.N., Kraskowski, M., Chien, N.M., Anh, V.T., Luu, D.L., Phuong, N.K. (2018). *Numerical study on the influence of trim on ship resistance in trim optimization process*. *Naval Engineers. Journal*, 130, 133–142.

- [26] LV, X.-J., Wu, X.-G., Sun, J.-L., and Tu, H.-W. (2013). *Trim optimization of ship by a potential-based panel method*. Advances in Mechanical Engineering, 2013, 1–7.
- [27] Tuck, EO (1978). *Hydrodynamic problems of ships in restricted waters*. Annual Review of Fluid Mechanics, 10:33–46.
- [28] JX, Y., ZJ, Z. (2010). *Calculation of ship squat in restricted waterways by using a 3D panel method*. Journal of Hydrodynamics, 22(5):472–477.
- [29] Alidadi, M., Calisal, S. (2011). *A numerical study on squat of a Wigley hull*. In: ASME 30th international conference on Ocean, offshore and arctic engineering, CFD and Viv: offshore geotechnics, Rotterdam, The Netherlands, vol 7, pp 539–543.
- [30] Prakash, S., Chandra, B. (2013). *Numerical estimation of shallow water resistance of a river-sea ship using CFD*. International Journal of Computer Applications, 71(5):33–40.
- [31] Degiuli, N. *Otpor i propulzija broda*, podloge za predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.
- [32] Raven, H. (2016). *A new correction procedure for shallow-water effects in ship speed trials*. In: Proceedings of the 2016 PRADS Conference, Copenhagen.
- [33] Larsson, L., Raven, H. C., Randolph Paulling, J. (2010). *Ship resistance and flow*. The Society of naval Architects and Marine Engineers.
- [34] Elsherbiny, K., Tezdogan, T., Kotb, M., Incecik, A., Day, S. (2019b). *Experimental analysis of the squat of ships advancing through the New Suez Canal*. Ocean Engineering, 178, 331–344.
- [35] Josip Uršić, *Plovnost broda*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1991.
- [36] Sun, J., Tu, H., Chen, Y., Xie, D. & Zhou, J. (2015). *A study on trim optimization for a container ship based on effects due to resistance*. Ocean engineering.
- [37] Virag, Z., Džijan, I. *Računalna dinamika fluida*, skripta - predavanja, FSB, Zagreb, 2014.
- [38] Werner, A., Degiuli, N. *Mehanika fluida IIB*, podloge za nastavu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.
- [39] Demirel, Y.K., Khorasanchi, M., Turan, O., Incecik, A., Shultz, M.P. (2014.). *A CFD model for the frictional resistance prediction of antifouling coatings*. Ocean Engineering, 2014., 89, pp. 21-31.
- [40] ITTC (2017). *Quality system manual recommended procedures and guidelines procedure uncertainty analysis in CFD verification and validation*.
- [41] STAR-CCM+, User Guide.
- [42] ITTC (2011). – *Recommended Procedures and Guidelines*, 7.5–03–02–03.

-
- [43] Campbell, R., Terziev, M., Tezdogan, T., Incecik, A. (2022). *Computational fluid dynamics predictions of draught and trim variations on ship resistance in confined waters*. Ocean and Marine Engineering.
- [44] Du, P., Ouahsine A., Sergent, P., Haibao, Hu. (2020). *Resistance and wave characterizations of inland vessels in the fully – confined waterway*. Ocean Engineering.
- [45] Lungu, A. (2019).: *Numerical simulation of the squatting of floating bodies moving in shallow water*. 13th International Conference Interdisciplinarity in Engineering.