Numeričko određivanje nominalnog sustrujanja broda za rasuti teret

Gluščić, Petar

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:542700

Rights / Prava: Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-04**

Repository / Repozitorij:

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

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Petar Gluščić

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Nastia Degiuli, dipl. ing.
Dr. sc. Andrea Farkas, mag. ing. nav. arch.

Student:

Petar Gluščić

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se svojim mentorima prof. dr. sc. Nastii Degiuli, dipl. ing. te dr. sc. Andrei Farkasu, mag. ing. nav. arch. na velikoj pomoći i brojnim savjetima koji su omogućili izradu ovoga rada.

Zahvaljujem se obitelji, prijateljima i kolegama koji su mi bili veliki oslonac tijekom studiranja.

Petar Gluščić

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

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Petar Gluščić** JMBAG: **0035210019**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Numeričko određivanje nominalnog sustrujanja broda za rasuti teret**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Numerical assessment of nominal wake for a bulk carrier**

Opis zadatka:

Određivanje polja nominalnog sustrujanja, koje se mjeri u ravnini diska brodskog vijka bez njegova prisustva od iznimne je važnosti za projektiranje brodskog vijka. Za projektanta brodskog vijka važno je poznavati vrijednosti srednjeg nominalnog sutrujanja po pojedinom radijusu.
U završnom radu potrebno je, uz pomoć programskog paketa za računalnu dinamiku fluida, numerički odrediti nominalno sustrujanje broda za rasuti teret. Pri tome treba koristiti model trodimenzijskog strujanja viskoznog fluida.
U radu je potrebno:

1. Dati pregled literature vezane za određivanje polja nominalnog sustrujanja.
2. Dati matematičku osnovu numeričkih metoda za simulaciju viskoznog strujanja fluida.
3. Pripremiti proračunsku mrežu, početne i rubne uvjete potrebne za numeričku simulaciju viskoznog strujanja fluida.
4. Numerički odrediti iznos srednjeg nominalnog sustrujanja po pojedinom radijusu i po disku vijka koristeći programski paket za računalnu dinamiku fluida.
5. Usporediti numerički dobivene rezultate s eksperimentalnim rezultatima dostupnim u literaturi.

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

Zadatak zadan:	Datum predaje rada:	Predviđeni datumi obrane:
30. 11. 2021.	**1. rok:** 24. 2. 2022. **2. rok (izvanredni):** 6. 7. 2022. **3. rok:** 22. 9. 2022.	**1. rok:** 28. 2. – 4. 3. 2022. **2. rok (izvanredni):** 8. 7. 2022. **3. rok:** 26. 9. – 30. 9. 2022.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

Dr. sc. Andrea Farkas

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Ivan Ćatipović

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA IV
POPIS OZNAKA V
SAŽETAK VIII
SUMMARY IX
1. UVOD 1
1.1. Pregled literature 1
2. SUSTRUJANJE 5
2.1. Općenito 5
2.2. Koeficijent nominalnog sustrujanja 6
3. RAČUNALNA DINAMIKA FLUIDA 9
3.1. Numeričke simulacije 9
3.1.1. Provedba numeričke simulacije 9
3.2. Matematički model 10
3.3. Osnovne jednadžbe dinamike fluida 11
3.4. Reynoldsove osrednjene Navier-Stokesove jednadžbe 12
3.5. Modeli turbulencije 14
3.6. Strujanje u blizini krute stijenke (zidne funkcije) 14
3.7. Metoda konačnih volumena 16
3.8. Metoda udjela fluida u volumenu 17
3.9. Verifikacija rezultata 18
3.10. Validacija rezultata dobivenih numeričkom simulacijom 19
4. NUMERIČKA SIMULACIJA POKUSA OTPORA 21
4.1. Ulaz u STAR-CCM+ 21
4.2. Kreiranje proračunske domene 22
4.3. Rubni uvjeti 23
4.3.1. Rubni uvjeti za slučaj prisustva slobodne površine 23
4.3.2. Rubni uvjeti za numeričke simulacije s udvojenim modelom 24
4.4. Diskretizacija geometrijske mreže 25
4.4.1. Volumetrijske kontrole 28
4.5. Unos fizikalnog modela 31
4.5.1. Fizikalni model numeričkih simulacija sa slobodnom površinom 31
4.5.2. Fizikalni model numeričkih simulacija s udvojenim modelom 32
4.6. Postavljanje parametara rješavača 33
4.6.1. Parametri rješavača za numeričke simulacije sa slobodom površinom 33
4.6.2. Parametri rješavača za numeričke simulacije s udvojenim modelom 33
5. ANALIZA REZULTATA 34
5.1. Prikaz rezultata 34
5.2. Verifikacija rezultata 39

5.3. Validacija rezultata 40
5.4. Analiza strujanja oko modela broda..... 42
6. ZAKLJUČAK..... 46
LITERATURA..... 47
PRILOZI..... 50

POPIS SLIKA

Slika 1. Određivanje srednjeg nominalnog koeficijenta sustrujanja po pojedinom radijusu [19] ... 7
Slika 2. Određivanje srednjeg nominalnog koeficijenta sustrujanja po disku vijka [19] ... 7
Slika 3. Shematski prikaz provođenja numeričkih simulacija [20] ... 10
Slika 4. Razvoj graničnog sloja prilikom strujanja uz krutu stijenku [24] ... 15
Slika 5. Profil brzine strujanja u turbulentnom graničnom sloju [24] ... 16
Slika 6. Dio diskretiziranog područja proračuna [20] ... 17
Slika 7. Prikaz dvofaznog fluida u ćeliji [26] ... 17
Slika 8. JBC model broda ... 22
Slika 9. Dimenzije proračunske domene ... 22
Slika 10. Granice domene za prvi tip simulacija ... 23
Slika 11. Položaj granica domene za prvi tip simulacija ... 24
Slika 12. Granice domene za drugi tip simulacija ... 24
Slika 13. Položaj granica domene za drugi tip simulacija ... 25
Slika 14. Prikaz udvojenog modela ... 25
Slika 15. Model broda diskretiziran grubom mrežom ... 28
Slika 16. Model broda diskretiziran srednjom mrežom ... 28
Slika 17. Model broda diskretiziran finom mrežom ... 28
Slika 18. Volumetrijske kontrole pramca i krme ... 29
Slika 19. Diskretizacija graničnog sloja, gruba mreža ... 30
Slika 20. Poprečni presjek grube mreže na z = 0,2925 m, pogled odozgo ... 30
Slika 21. Fizikalni model numeričkih simulacija sa slobodnom površinom ... 32
Slika 22. Fizikalni model numeričkih simulacija s udvojenim modelom ... 33
Slika 23. Parametar y^+ duž modela broda u numeričkim simulacijama sa slobodnom površinom ... 34
Slika 24. Parametar y^+ duž udvojenog modela broda ... 34
Slika 25. Profil slobodne površine duž trupa modela broda ... 35
Slika 26. Slika valova ... 35
Slika 27. Sila ukupnog otpora prve grupe numeričkih simulacija ... 36
Slika 28. Sila ukupnog otpora druge i treće grupe numeričkih simulacija ... 36
Slika 29. Polje nominalnog sustrujanja prve grupe numeričkih simulacija ... 37
Slika 30. Polje nominalnog sustrujanja druge grupe numeričkih simulacija ... 37
Slika 31. Polje nominalnog sustrujanja treće grupe numeričkih simulacija ... 38
Slika 32. Usporedba nominalnog sustrujanja treće grupe simulacija dobivenih finom mrežom ... 38
Slika 33. Raspon numeričke nesigurnosti prve grupe numeričkih simulacija ... 42
Slika 34. Raspon numeričke nesigurnosti druge grupe numeričkih simulacija ... 43
Slika 35. Raspon numeričke nesigurnosti treće grupe numeričkih simulacija ... 43
Slika 36. Koeficijent nominalnog sustrujanja za fine mreže uz k-ω SST model turbulencije ... 44
Slika 37. Koeficijent nominalnog sustrujanja za fine mreže iz treće grupe simulacija ... 44
Slika 38. Usporedba polja nominalnog sustrujanja ... 45

POPIS TABLICA

Tablica 1. Glavne značajke broda i modela [28] ... 21
Tablica 2. Postavke diskretizacije ... 26
Tablica 3. Osnovne veličine ćelija geometrijskih mreža ... 27
Tablica 4. Broj ćelija geometrijskih mreža ... 31
Tablica 5. Numerička nesigurnost mreže prve grupe numeričkih simulacija ... 39
Tablica 6. Numerička nesigurnost mreže druge grupe numeričkih simulacija ... 39
Tablica 7. Numerička nesigurnost mreže treće grupe numeričkih simulacija ... 40
Tablica 8. Koeficijent nominalnog sustrujanja po radijusu vijka dobiven eksperimentom [28] ... 40
Tablica 9. Koeficijent nominalnog sustrujanja za prvu grupu numeričkih simulacija ... 41
Tablica 10. Koeficijent nominalnog sustrujanja za drugu grupu numeričkih simulacija ... 41
Tablica 11. Koeficijent nominalnog sustrujanja za treću grupu numeričkih simulacija ... 41

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
B	m	širina broda
C_B	/	koeficijent punoće
D_{ij}	s^{-1}	tenzor brzine deformacije
f_i	N/m^3	gustoća masene sile
Fn	/	Froudeov broj
g	m/s^2	gravitacijska konstanta
L	m	duljina broda
L_{PP}	m	duljina između perpendikulara
$N_{C,i}$	/	broj ćelija geometrijske mreže
p	Pa	tlak
$\bar{p}$	Pa	vremenski osrednjena vrijednost polja tlaka
p'	Pa	pulsirajući (fluktuirajući) tlak
p_i	/	red točnosti
R	m	polumjer brodskog vijka
R_i	/	omjer konvergencije
Rn	/	Reynoldsov broj
RD	%	relativna devijacija
r_{gl}	m	polumjer glavine brodskog vijka
r_{xx}	m	radijus tromosti mase oko x osi
r_{yy}	m	radijus tromosti mase oko y osi
r_{zz}	m	radijus tromosti mase oko z osi
S	m^2	oplakana površina
T	m	gaz broda
U	m/s	srednja brzina strujanja
U_G	/	nesigurnost mreže
U_I	/	iterativna nesigurnost
U_{SN}	/	ukupna nesigurnost numeričke simulacije
U_T	/	nesigurnost vremenskog koraka

U_τ	m/s	brzina trenja
U^+	/	bezdimenzijska brzina u graničnom sloju
v	m/s	brzina broda
v_A	m/s	brzina pritjecanja vode vijku
$\overline{v}_A$	m/s	srednja brzina pritjecanja vode vijku
v_i	m/s	vektor brzine
$\overline{v}_i$	m/s	vremenski osrednjena vrijednost komponente polja brzine
v_i'	m/s	pulsirajuća (fluktuirajuća) komponenta brzine
∇	m^3	volumen istisnine
V_1	m^3	volumen tekućine koji protječe kroz disk vijka
w	/	koeficijent sustrujanja
w_E	/	koeficijent efektivnog sustrujanja
w_F	/	koeficijent sustrujanja trenja
w_{kor}	/	korekcija koeficijenta sustrujanja
w_N	/	koeficijent nominalnog sustrujanja
$w_{N,EKS}$	/	koeficijent nominalnog sustrujanja dobiven eksperimentalno
$w_{N,RDF}$	/	koeficijent nominalnog sustrujanja dobiven numeričkom simulacijom
w_P	/	koeficijent potencijalnog sustrujanja
w_W	/	koeficijent sustrujanja valova
$\overline{w}_{N_D}$	/	koeficijent srednjeg nominalnog sustrujanja po disku vijka
$\overline{w}_{N_R}$	/	koeficijent srednjeg nominalnog sustrujanja po pojedinom radijusu
x_{CG}	m	udaljenost težišta mase od središnjeg perpendikulara u x smjeru
y	m	udaljenost od stijenke
y_{CG}	m	udaljenost težišta mase od središnjeg perpendikulara u y smjeru
y^+	/	bezdimenzijska udaljenost od stijenke
z_{CG}	m	udaljenost težišta mase od središnjeg perpendikulara u z smjeru
δ_{ij}	/	Kroneckerov simbol
μ	Pas	dinamički koeficijent viskoznosti
μ_t	Pas	dinamički koeficijent turbulentne viskoznosti
ν	m^2/s	kinematički koeficijent viskoznosti
κ	/	von Karmanova konstanta
λ	/	koeficijent geometrijske sličnosti
ρ	kg/m^3	gustoća
Σ_{ij}	N/m^2	devijatorski dio tenzora naprezanja
σ_{ji}	N/m^2	tenzor naprezanja
τ	N/m^2	tangencijalno naprezanje

τ_w	N/m^2	tangencijalno naprezanje na stijenki
ϕ_i	/	vrijednost rezultata numeričke simulacije

SAŽETAK

U ovom radu provedene su numeričke simulacije pokusa otpora modela broda *Japan Bulk Carrier* (JBC) primjenom računalne dinamike fluida (RDF) u svrhu određivanja nominalnog sustrujanja, odnosno koeficijenta nominalnog sustrujanja. Numeričke simulacije provedene su primjenom komercijalnog programskog paketa STAR-CCM+. Izvršene su tri grupe numeričkih simulacija: numeričke simulacije s modelom broda sa slobodnom površinom, numeričke simulacije s udvojenim modelom (eng. *double body*) bez slobodne površine te numeričke simulacije s udvojenim modelom bez slobodne površine s profinjenom geometrijskom mrežom u području gdje će biti smješten brodski vijak. Svaka grupa numeričkih simulacija sastoji se od tri simulacije različitih gustoća mreža s k-ω SST modelom turbulencije te simulacije uz primjenu fine mreže i k-ε modela turbulencije. Za prvu grupu simulacija primijenjen je model nestacionarnog trodimenzijskog viskoznog strujanja, dok je za drugu i treću grupu primijenjen stacionarni model trodimenzijskog viskoznog strujanja. Unutar numeričkih simulacija sa slobodnom površinom primijenjena je metoda udjela fluida u volumenu (eng. *Volume of Fluid*-VOF) za praćenje i lociranje slobodne površine. Numeričko određivanje nominalnog sustrujanja provedeno je pri jednom Froudeovom broju. Izvršena je verifikacija numeričkih rezultata te je izračunata numerička nesigurnost pri određivanju nominalnog sustrujanja primjenom metode indeksa konvergencije mreže (eng. *Grid Convergence Index method*-GCI). Dobiveni numerički rezultati uspoređeni su s eksperimentalnim podacima dostupnim u literaturi. Pokazano je kako računalna dinamika fluida daje zadovoljavajuće rezultate te stoga može biti vrlo koristan alat za određivanje nominalnog sustrujanja.

Ključne riječi: računalna dinamika fluida, STAR-CCM+, k-ω SST model turbulencije, k-ε model turbulencije, metoda udjela fluida u volumenu, nominalno sustrujanje

SUMMARY

In this study, numerical simulations of the resistance test for the Japan Bulk Carrier (JBC) model are performed using Computational Fluid Dynamics (CFD) for the assessment of the nominal wake, i.e. the nominal wake fraction. Numerical simulations are performed using the commercial software package STAR-CCM+. Three groups of numerical simulations are carried out: numerical simulations with a ship model with free surface, numerical simulations with a double body model without free surface, and numerical simulations with a double body model without free surface with the refined mesh in the area where a propeller will be placed. Each group of numerical simulations is consisted of three simulations with different mesh densities and k-ω SST turbulence model, and one simulation with the fine mesh and k-ε turbulence model. For the first group of simulations, the model based on unsteady three-dimensional viscous flow is used, while for the remaining ones, the model based on steady three-dimensional viscous flow is used. Within numerical simulations with free surface, the Volume of Fluid (VOF) method is applied for tracking and locating free surface. The numerical assessment of the nominal wake is performed at one Froude number. The obtained numerical results are verified and the numerical uncertainty in the prediction of nominal wake is calculated using the Grid Convergence Index (GCI) method. The obtained numerical results are compared with the experimental data available in the literature. It is shown that CFD can provide satisfactory results and that it can be a valuable tool in the assessment of nominal wake.

Key words: Computational Fluid Dynamics, STAR-CCM+, k-ω SST turbulence model, k-ε turbulence model, Volume of Fluid method, nominal wake

1. UVOD

Određivanje polja nominalnog sustrujanja, koje se mjeri u ravnini diska brodskog vijka bez njegova prisustva, od iznimne je važnosti za projektiranje brodskog vijka. Za projektanta brodskog vijka važno je poznavati vrijednosti srednjeg nominalnog sustrujanja po pojedinom radijusu. Polje sustrujanja izravno utječe na dimenzije brodskog vijka te na geometriju njegovih krila. U ovom radu određeno je nominalno sustrujanje broda za rasuti teret, odnosno za *Japan Bulk Carrier* (JBC).

Postoji nekoliko metoda za određivanje hidrodinamičkih značajki broda, a to su:

- empiričko-statističke metode,
- eksperimentalne metode (ispitivanje na modelima),
- numeričke metode (računalna dinamika fluida).

Empiričko-statističke metode su najjednostavnije i najbrže za korištenje. Temelje se na statistički obrađenim podacima izmjerenima u naravi. Modelska ispitivanja vrlo su skupa i dugotrajna. Problem kod takvih ispitivanja je što nije moguće ostvarivanje hidrodinamičke sličnosti pojava na modelu broda i brodu u naravi pa se zadovoljava jednakost Froudeovog broja, a vrijednost Reynoldsovog broja drži iznad kritične vrijednosti. Numeričke metode mnogo su brže i jeftinije od eksperimentalnih, a razvojem računala sve se više primjenjuju u istraživanju hidrodinamičkih značajki broda. Eksperimentalne i numeričke metode odlično se nadopunjuju te rezultati dobiveni njihovom primjenom u kombinaciji s mjerenjima u naravi daju najkvalitetnija rješenja kod osnivanja broda i prognoze hidrodinamičkih značajki u službi broda.

U ovom radu za provedbu numeričkih simulacija korišten je komercijalni programski paket STAR-CCM+. Izrađena su tri tipa mreže različitih gustoća za koje se proveo postupak verifikacije pri jednom Froudeovom broju, a u svrhu određivanja numeričke nesigurnosti. Rezultati su uspoređeni s eksperimentalnim podacima dostupnim u literaturi te je zaključeno da su rezultati provedenih simulacija zadovoljavajuće točnosti.

1.1. Pregled literature

Računalna dinamika fluida ima široku primjenu u znanosti pa se tako koristi i u brojnim istraživanjima u području brodske hidrodinamike. Farkas et al. [1] pokazali su opsežnu kvantifikaciju numeričke nesigurnosti pri određivanju otpora i nominalnog sustrujanja za dva

broda u naravi: KCS (eng. *KRISO Container Ship*) i brod za prijevoz rasutog tereta. Procjena je provedena za stanje glatke površine trupa i za trup prekriven biofilmom. Autori su proveli dvije vrste numeričkih simulacija: sa slobodnom površinom i s udvojenim brodom koji ne uključuje slobodnu površinu. Numeričke nesigurnosti svih simulacija procijenjene su primjenom metode indeksa konvergencije mreže (eng. *Grid Convergence Index*-GCI). Autori su pokazali da čak i malo obraštanje trupa biofilmom može dovesti do značajnih promjena značajki otpora i nominalnog sustrujanja. Farkas et al. [2] su procijenili utjecaj biofilma na značajke propulzije za kontejnerski brod. Dobiveni rezultati su ukazali da prisutnost biofilma uzrokuje smanjenje koeficijenta poriva (K_T) i povećanje koeficijenta momenta (K_Q) što dovodi do značajnog smanjenja stupnja djelovanja vijka u slobodnoj vožnji (η_o). Pokazano je da se obraštanje biofilmom ne smije zanemariti i da ono može uzrokovati iznimno štetne posljedice na hidrodinamičke značajke broda. Tako obraštanje biofilmom može uzrokovati značajan porast snage predane vijku (P_D) te posljedično povećanje potrošnje goriva ili smanjenje brzine broda. Bakica et al. [3] su analizirali opterećenja uređaja za uštedu energije (eng. *Energy Saving Device*-ESD) u mirnoj vodi i na valovima primjenom numeričkih simulacija s pojednostavljenim modelom brodskog vijka. Rezultati numeričkih simulacija pokazali su zadovoljavajuće slaganje s eksperimentalnim ispitivanjima za model broda bez i s uređajem za uštedu energije. Autori su uz primjenu numeričkih simulacija temeljito procijenili raspodjelu tlaka na uređaju za uštedu energije te zaključili da je gubitak poriva u prisustvu valova veći kada je uređaj za uštedu energije prisutan u odnosu na slučaj bez njega. Wang et al. [4] su pokazali kako nominalno sustrujanje ovisi o geometrijskom mjerilu modela na primjeru kontejnerskoga broda od 4000 TEU. Provedene su numeričke simulacije s udvojenim modelom broda bez utjecaja slobodne površine za modele različitih mjerila te za brod u naravi. Na temelju rezultata autori su predložili novu metodu ekstrapolacije polja nominalnog sustrujanja. Farkas et al. [5] su procijenili nominalno sustrujanje tipičnog *handymax* broda za prijevoz rasutog tereta. Provedene su numeričke simulacije viskoznog strujanja oko modela broda sa i bez zidnih funkcija te numeričke simulacije za brod u naravi sa zidnim funkcijama. Autori su proveli postupak verifikacije geometrijske mreže te ispitali utjecaj izbora modela turbulencije na konačno rješenje. Zaključeno je da RSM (eng. *Reynolds Stress Model*) model turbulencije daje najbolje rezultate. Mikkelsen et al. [6] su proučavali polje nominalnog sustrujanja kontejnerskog broda KCS na pravilnim valovima za pet različitih smjerova nailaska valova s valnom duljinom jednakom duljini broda. Autori su pokazali da za sve kutove nailaska valova, isključujući valove u pramac, iznos srednjeg nominalnog sustrujanja poprima veće vrijednosti u odnosu na gibanje u mirnoj vodi. Li et al. [7] su odredili otpor i nominalno sustrujanje

kontejnerskoga broda i broda za prijevoz rasutog tereta. Temeljem usporedbe s eksperimentalnim rezultatima, autori su zaključili da za određivanje ukupnog otpora bez privjesaka nije potrebna geometrijska mreža s prevelikim brojem ćelija te da se uz primjenu *Re-Normalisation Group* (RNG) *k-ε* modela turbulencije i dodavanjem slojeva prizama u graničnom sloju može postići razumna i točna raspodjela polja nominalnog sustrujanja. Gaggero et al. [8] su pokazali da se za određivanje nominalnog sustrujanja mogu koristiti numeričke simulacije s udvojenim modelom. Autori su također proučavali utjecaj modela turbulencije na dobivene rezultate nominalnog sustrujanja na mjerilu modela te su ukazali na prednosti anizotropnih modela turbulencije. Guo et al. [9] su korigirali utjecaj mjerila na polje nominalnog sustrujanja promjenom oblika krmenog dijela modela broda. Nizom ispitivanja s različitim shemama deformacije geometrije, autori su utvrdili najtočniju metodu deformiranja geometrije za korekciju utjecaja mjerila na nominalno sustrujanje. Choi et al. [10] su ispitali značajke otpora i propulzije na primjeru nekoliko trgovačkih brodova. Autori su istraživali sliku strujnica kod ispitanih brodova, značajke sustava valova oko modela broda te polja sustrujanja u ravnini diska vijka. Wu et al. [11] su istražili utjecaj stanja krcanja na dodatni otpor na valovima i nominalno sustrujanje modela tankera. Autori su pokazali da je dodatni otpor porastao uslijed plovidbe broda u balastnom stanju. Također, autori su pokazali da su gibanja broda kao što su zalijetanje, poniranje i posrtanje izraženija s porastom valne duljine, odnosno da iščezavaju za vrlo kratke valove. Guo et al. [12] su proveli sustavno ispitivanje eksperimentalne i numeričke nesigurnosti pri određivanju otpora krme i pramca broda te pri predviđanju urona i kuta trima. Autori su ispitali četiri različite gustoće mreže i dva modela turbulencije, *k-ω* SST (eng. *Shear Stress Transport*) te *Explicit Algebraic Stress k-ω* (EASM) model turbulencije. Zaključili su da su nominalno sustrujanje i ukupni otpor točnije predviđeni primjenom EASM modela turbulencije. Pereira et al. [13] su kvantificirali numeričku nesigurnost, kao i pogreške modeliranja za rezultate strujanja oko modela tankera te tankera u naravi. Cilj rada bio je ukazati da je utjecaj mjerila na koeficijent nominalnog sustrujanja i faktor forme veći od numeričke nesigurnosti određivanja ovih hidrodinamičkih značajki. Kornev et al. [14] su primijenili kombinaciju nestacionarnih Reynoldsovih osrednjenih Navier-Stokesovih jednadžbi (eng. *Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes*-URANS) s metodom simulacije velikih vrtloga (eng. *Large Eddy Simulation*-LES) kako bi istražili polje sustrujanja iza broda KVLCC2 (eng. *KRISO Very Large Crude Carrier 2*). Autori su zaključili da se nestabilnost u vrtložnom tragu iza brodova pune forme mora uzeti u obzir prilikom ispitivanja propulzije i nestacionarnih opterećenja. Lin i Kouh [15] su istražili utjecaje mjerila na polje nominalnog sustrujanja i koeficijenta upijanja primjenom novog postupka za ispitivanje

vlastitog pogona. Zaključili su kako je s praktične točke gledišta učinak mjerila na koeficijent upijanja zanemariv, dok je utjecaj mjerila na nominalno sustrujanje značajan. Sánchez et al. [16] su pokazali značajnu razliku između nominalnog i efektivnog sustrujanja kod brodova s punom formom.

2. SUSTRUJANJE

2.1. Općenito

Razlika između brzine broda i brzine pritjecanja vode brodskom vijku naziva se brzina sustrujanja. Ukoliko se ta brzina podijeli s brzinom broda dobije se izraz za određivanje koeficijenta sustrujanja prema Tayloru [17]:

$$w = \frac{v - v_A}{v} = 1 - \frac{v_A}{v} \quad \textbf{(1)}$$

Jednadžba (1) se najčešće primjenjuje za određivanje koeficijenta sustrujanja. Postoji i izraz prema Froudeu, no on se rijetko primjenjuje:

$$w_F = \frac{v - v_A}{v_A} = \frac{v}{v_A} - 1 \quad \textbf{(2)}$$

Koeficijent sustrujanja moguće je podijeliti na tri komponente [18]:

$$w = w_P + w_F + w_W \quad \textbf{(3)}$$

gdje je w_P koeficijent potencijalnog sustrujanja, w_F koeficijent sustrujanja trenja i w_W koeficijent sustrujanja valova.

Potencijalno sustrujanje nastalo bi prilikom gibanja broda u idealnoj tekućini bez trenja i bez valova. Ovo sustrujanje se može matematički izračunati i ne ovisi o smjeru gibanja broda niti o brzini broda.

Sustrujanje trenja je razlika između ukupnog sustrujanja te sume potencijalnog sustrujanja i sustrujanja valova. Ova komponenta sustrujanja posljedica je trenja u graničnom sloju.

Sustrujanje valova odnosi se na gibanje čestica tekućine u valu (po kružnim ili eliptičkim putanjama). Gibanje čestica u valu dobro opisuje trohoidna teorija vala. Važno je napomenuti kako je ova komponenta sustrujanja kod brodova koji plove pri nižim vrijednostima Froudeovog broja gotovo zanemariva.

Koeficijent sustrujanja također je moguće podijeliti i na četiri komponente:

$$w = w_P + w_F + w_W + w_{kor} \quad \textbf{(4)}$$

gdje je w_{kor} komponenta sustrujanja uvedena zbog promjena u polju sustrujanja uzrokovanih djelomično zbog rotacije u mlazu vijka, a djelomično zbog drugih promjena u pritjecanju vode vijku. Ovom su komponentom definirane promjene sustrujanja kod ekstremnih opterećenja kao što je primjerice plovidba broda krmom.

Kada se koeficijent sustrujanja određuje pomoću brodskog vijka, kojeg smatramo integratorom sustrujanja, koeficijent sustrujanja se naziva koeficijent efektivnog sustrujanja w_E.

U slučaju određivanja koeficijenta sustrujanja na mjestu vijka kada vijka nema, koeficijent sustrujanja se naziva koeficijent nominalnog sustrujanja w_N.

Komponenta sustrujanja uvedena zbog promjena u polju sustrujanja glasi:

$$w_{kor} = |w_E| - |w_N| \tag{5}$$

Uobičajeno je $w_N > w_E$.

Sustrujanje nastaje zbog dva razloga:

- Brod ploveći razmiče vodu ispred sebe i gura je u stranu, a zatim se voda vraća i ispunjava prostor gdje se ranije nalazio brod.
- Zbog viskoznosti vode, brod prilikom gibanja sa sobom vuče određenu količinu vode koja čini granični sloj.

2.2. Koeficijent nominalnog sustrujanja

Kako je već navedeno, koeficijent sustrujanja određen na mjestu vijka kada vijka nema, naziva se koeficijent nominalnog sustrujanja [19].

Prilikom modelskih ispitivanja koeficijent nominalnog sustrujanja se određuje mjerenjem pomoću:

- Prandtl-Pitotove cijevi s jednom ili pet rupica,
- lasera,
- krilaca,
- prstenova.

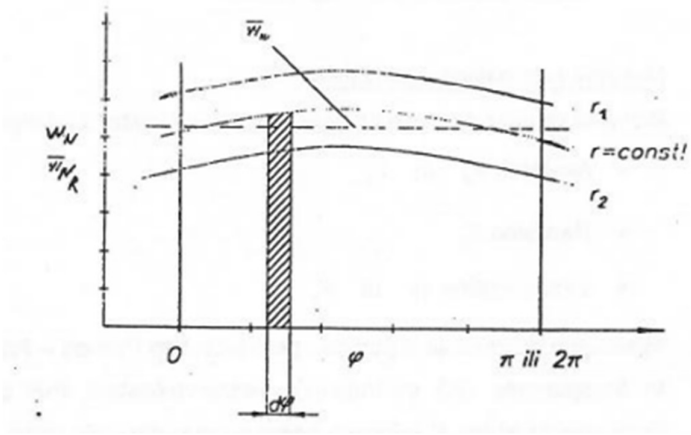
Izraz za određivanje koeficijenta nominalnog sustrujanja glasi:

$$w_N = \frac{v - v_A}{v} = 1 - \frac{v_A}{v} \tag{6}$$

Prilikom projektiranja brodskog vijka važno je znati vrijednosti srednjeg nominalnog sustrujanja po pojedinom radijusu $\overline{w}_{N_R}$:

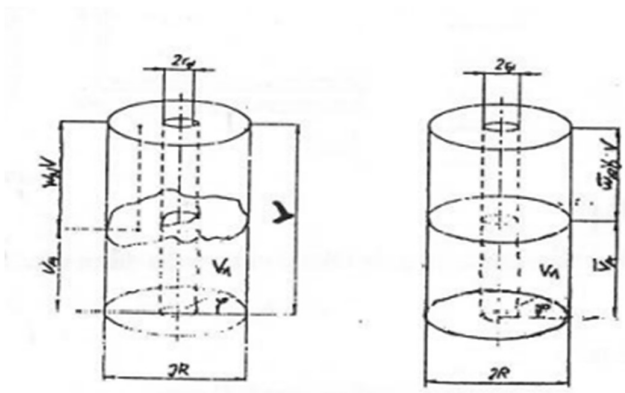
$$\overline{w}_{N_R} = \frac{\int_0^{2\pi} w_{N_R} \mathrm{d}\varphi}{2\pi} = 1 - \frac{\int_0^{2\pi} \frac{v_A}{v} \mathrm{d}\varphi}{2\pi} \tag{7}$$

Budući da funkcionalna ovisnost $w_{N_R} = f(\varphi)$ nije poznata, površina ispod krivulje određuje se numeričkom integracijom, slika 1. [19].



Slika 1. Određivanje srednjeg nominalnog koeficijenta sustrujanja po pojedinom radijusu [19]

Srednje nominalno sustrujanje po disku vijka $\overline{w}_{N_D}$ određuje se na temelju volumena tekućine koji protječe kroz disk, slika 2. [19].



Slika 2. Određivanje srednjeg nominalnog koeficijenta sustrujanja po disku vijka [19]

Volumen tekućine koji protječe kroz disk vijka:

$$V_1 = \int_{r_{gl}}^{R} \int_{0}^{2\pi} v_A(r,\varphi)\, r\, \mathrm{d}r\, \mathrm{d}\varphi = \left(R^2 - r_{gl}^2\right) \pi\, \overline{v}_A \qquad \textbf{(8)}$$

gdje je r_{gl} polumjer glavine vijka, R polumjer vijka, v_A brzina pritjecanja vode vijku i $\overline{v}_A$ srednja brzina pritjecanja vode vijku.

Srednja brzina pritjecanja vode vijku određuje se kako slijedi:

$$\overline{v}_A = \frac{\int_{r_{gl}}^{R} \int_0^{2\pi} v_A(r,\varphi) r \, \mathrm{d}r \, \mathrm{d}\varphi}{\left(R^2 - r_{gl}^2\right) \pi} \tag{9}$$

Srednje nominalno sustrujanje po disku vijka računa se:

$$\overline{w}_{N_D} = 1 - \frac{\overline{v}_A}{v} \tag{10}$$

Uvrštavanjem jednadžbe (9) u jednadžbu (10) te sređivanjem izraza dobije se:

$$\overline{w}_{N_D} = \frac{\int_{r_{gl}}^{R} \int_0^{2\pi} w_N \, r \, \mathrm{d}r \, \mathrm{d}\varphi}{\left(R^2 - r_{gl}^2\right) \pi} \tag{11}$$

Koeficijent sustrujanja je najčešće manji za brod nego za model broda zbog nejednakosti Reynoldsovih brojeva. Naime, relativni utjecaj trenja kod broda u naravi je manji nego kod modela broda te je time i relativna debljina graničnog sloja kod broda u naravi manja nego kod modela broda. Stoga ekstrapolacija srednjeg nominalnog sustrujanja s modela na brod zahtijeva korekciju vrijednosti zbog utjecaja mjerila.

3. RAČUNALNA DINAMIKA FLUIDA

Mehanika fluida je teorijsko-eksperimentalna znanost [20]. Teorijski dio bavi se analitičkim rješavanjem matematičkih modela strujanja fluida. Dugi niz godina, većina problema mehanike fluida rješavala se modelskim ispitivanjima, koji su bili jedina mogućnost dobivanja rezultata, ponajviše zato što je strujanje fluida opisano nelinearnim parcijalnim diferencijalnim jednadžbama za koje ne postoji opće analitičko rješenje.

Razvojem računala i pojavom računalne dinamike fluida (RDF) uobičajeni pristup se počinje mijenjati. RDF je utemeljena na teorijskom pristupu, a značajka RDF-a da se za jedno numeričko rješenje ne mogu donositi zaključci o utjecaju pojedinih parametara vrijedi i kod eksperimentalnog pristupa. Važno je napomenuti kako se RDF i eksperimentalne metode međusobno nadopunjuju te da je RDF jeftinija te brža metoda.

3.1. Numeričke simulacije

Na samom početku provedbe numeričke simulacije potrebno je definirati problem i odabrati odgovarajući matematički model [20]. Komercijalni programski paketi kao što je STAR-CCM+ u sebi sadrže matematičke modele za rješavanje problema te je potrebno odabrati najpogodniji model za provedbu numeričke simulacije. Odabirom matematičkog modela slijedi drugi korak numeričkih simulacija, koji se sastoji od tri dijela, a cilj mu je numeričko rješavanje odabranog matematičkog modela. Prvim korakom diskretizira se područje proračuna, odnosno generira se geometrijska mreža. Nadalje, u drugom koraku diskretiziraju se parcijalne diferencijalne jednadžbe matematičkog modela na generiranoj geometrijskoj mreži, uz poštivanje specifičnih rubnih uvjeta. Rezultat diskretizacije jednadžbi, koja se provodi jednom od metoda (metoda konačnih volumena, metoda konačnih elemenata, metoda konačnih razlika i sl.), je sustav algebarskih jednadžbi. Konačno, u trećem koraku provodi se analiza dobivenih rezultata.

3.1.1. Provedba numeričke simulacije

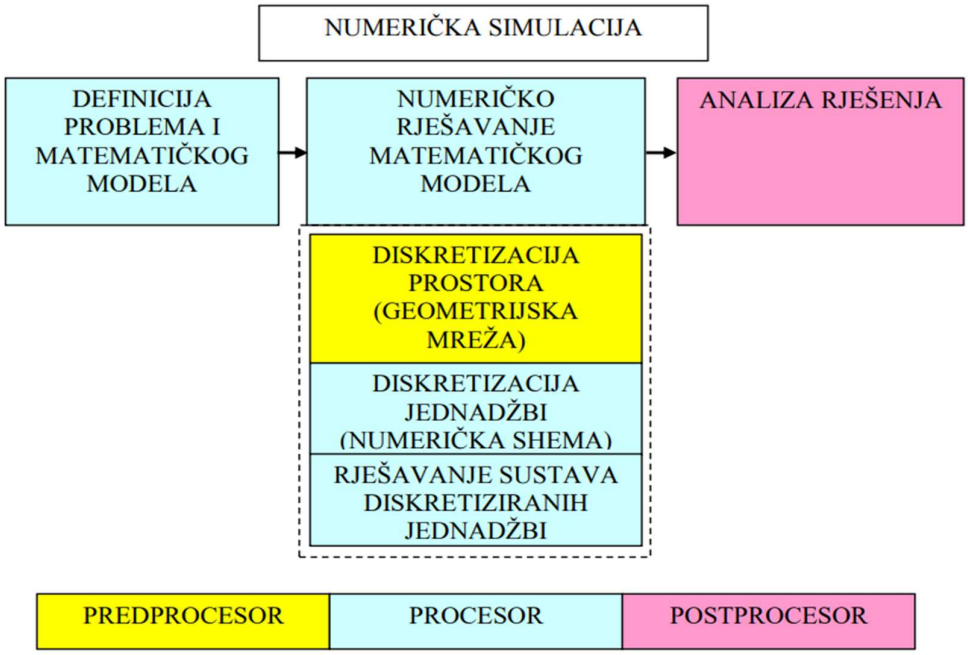
Numerička simulacija se provodi kroz tri programa, a to su: predprocesor, procesor i postprocesor [20].

Predprocesor je računalni program kojim se generira geometrijska mreža. Generiranje mreže nije trivijalan posao, nego suprotno, samo generiranje čini znatan dio ukupnog vremena za provedbu numeričke simulacije, gdje je bitno voditi računa o zadovoljenju rubnih uvjeta. U

područjima gdje se pojavljuju veliki gradijenti fizikalnih veličina zahtijeva se diskretizacija s manjim ćelijama. Danas se intenzivno radi na razvoju automatskih generatora mreže.

Procesor je program koji numerički rješava određeni matematički model uz zadovoljenje početnih i rubnih uvjeta. Postoje dva principa rada procesora. Jedna opcija je da procesor ima fiksno ugrađeni matematički model, dok u drugom slučaju korisnik slobodno zadaje matematički model utemeljen na objektnom programiranju.

Postprocesor je program koji služi za vizualizaciju rezultata, odnosno za određivanje pojedinih integralnih veličina.



Slika 3. Shematski prikaz provođenja numeričkih simulacija [20]

3.2. Matematički model

Temelj svake numeričke simulacije je matematički model koji daje matematički zapis fizikalnog modela [20]. Fizikalni model prilikom opisivanja stvarnog svijeta obuhvaća brojne pretpostavke:

- kontinuum,
- homogenost i izotropnost,
- jednokomponentan ili višekomponentan fluid,

- jednodimenzijsko, dvodimenzijsko ili trodimenzijsko strujanje,
- stacionarno ili nestacionarno strujanje,
- neviskozno, laminarno ili turbulentno strujanje.

Pretpostavlja se da je fluid kontinuum što znači da u potpunosti ispunjava prostor i zadržava fizikalna svojstva čak i u slučaju infinitezimalnog volumena.

Homogenost je karakteristika fluida da u svim točkama ima jednaka fizikalna svojstva, dok se kod izotropnosti pretpostavlja da su fizikalna svojstva jednaka u svim smjerovima.

Zrak se promatra kao homogena smjesa te je zamišljen kao jednokomponentni fluid. No, u slučajevima kada je koncentracija elemenata različita u različitim točkama, zrak treba smatrati višekomponentnim fluidom.

Iako je strujanje trodimenzijskog karaktera, u mnogim slučajevima je moguće zanemariti fizikalne promjene u jednom smjeru, što znači da se takva strujanja mogu promatrati kao dvodimenzijska. Postoje primjeri s izraženim strujanjem u samo jednom smjeru (npr. cijevi) te je takva strujanja moguće razmatrati kao jednodimenzijska.

U većini problema potrebno je razmatrati nestacionarno strujanje, ali je važno naglasiti kako je kod nekih slučajeva moguće razmatrati stacionarno strujanje.

Pojava laminarnog strujanja u prirodi je rijetka, a određena je niskim iznosima Reynoldsovog broja. S druge strane pojave turbulentnog strujanja puno su češće, a postoje slučajevi u kojima se pojavljuju oba slučaja (primjerice kod optjecanja tijela).

Zaključno, bitno je izraditi takav fizikalni model koji što kvalitetnije opisuje uvjete u stvarnosti, a iz njega proizlazi matematički model koji je određen nizom parcijalnih diferencijalnih jednadžbi koje opisuju strujanje fluida.

3.3. Osnovne jednadžbe dinamike fluida

Za problem proračuna nestlačivog viskoznog strujanja, u ovom završnom radu korištene su Navier-Stokesove jednadžbe, koje se izvode iz osnovnih jednadžbi dinamike fluida [21].

Jednadžba kontinuiteta (zakon očuvanja mase) za nestlačivi fluid glasi:

$$\nabla \cdot \vec{v} = \mathrm{div}\vec{v} = \frac{\partial v_j}{\partial x_j} = 0 \qquad \textbf{(12)}$$

Zakon održanja količine gibanja (Eulerova jednadžba gibanja) za nestlačivi fluid glasi:

$$\rho \frac{\mathrm{D}v_i}{\mathrm{D}t} = \rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \rho v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \rho f_i + \frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j} \qquad \textbf{(13)}$$

gdje je ρ gustoća fluida, v_i vektor brzine, f_i gustoća masene sile, σ_{ji} tenzor naprezanja i $\frac{\mathrm{D}}{\mathrm{D}t}$ operator materijalne derivacije.

Zakon posebnih ponašanja fluida (konstitutivne jednadžbe) definiran je kako slijedi:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \sum_{ij} \tag{14}$$

$$p = -\frac{1}{3}\sigma_{kk} \tag{15}$$

$$\sum_{ij} = 2\mu D_{ij} - \frac{2}{3}\mu D_{kk}\delta_{ij} \tag{16}$$

$$D_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right) \tag{17}$$

gdje je p tlak, δ_{ij} Kroneckerov simbol, $\sum_{ij}$ devijatorski dio tenzora naprezanja, μ dinamički koeficijent viskoznosti i D_{ij} tenzor brzine deformacije.

Kombinacijom jednadžbi (13) - (17) uz zanemarivanje koeficijenta volumenske viskoznosti slijede Navier-Stokesove jednadžbe:

$$\rho\frac{\partial v_i}{\partial t} + \rho v_j\frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \rho f_i - \frac{\partial}{\partial x_i}\left(p + \frac{2}{3}\mu D_{kk}\right) + 2\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu D_{ij}\right) \tag{18}$$

Uvodi se supstitucija:

$$v = \frac{\mu}{\rho} \tag{19}$$

gdje je v kinematički koeficijent viskoznosti.

Uz uvedenu supstituciju (19) i pojednostavnjenje za μ = const. jednadžba (18) glasi:

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j\frac{\partial v_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{x_i} + v\nabla^2 v_i \tag{20}$$

Uvođenjem konstitutivnih jednadžbi dobiva se zatvoreni sustav s deset jednadžbi i deset nepoznanica kojima je moguće opisati strujanje viskoznog neslačivog fluida.

3.4. Reynoldsove osrednjene Navier-Stokesove jednadžbe

Reynoldsove osrednjene Navier-Stokesove jednadžbe (RANS) primjenjuju se za kvantitativno opisivanje turbulentnog strujanja [21]. Uz pretpostavku zanemarivanja masenih sila takvo strujanje može se opisati jednadžbom kontinuiteta (12) i zakonom očuvanja količine gibanja

(20), gdje su dobivene nepoznanice komponente polja brzine v_i i polje tlaka p. Komponente polja brzine v_i moguće je prikazati zbrojem osrednjene vrijednosti i pulsirajućeg dijela:

$$v_i = \overline{v_i} + v_i' \tag{21}$$

gdje je $\overline{v_i}$ osrednjena vrijednost komponente polja brzine, a v_i' pulsirajuća (fluktuirajuća) komponenta brzine.

Polje tlaka p također je moguće prikazati:

$$p = \overline{p} + p' \tag{22}$$

gdje je $\overline{p}$ osrednjena vrijednost polja tlaka, a p' pulsirajući (fluktuirajući) tlak.

Uvrštavanjem jednadžbi (21) i (22) u jednadžbu kontinuiteta (12), proizlazi:

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

Osrednjavanjem jednadžbe (23) slijedi jednadžba očuvanja mase za osrednjeno strujanje:

$$\frac{\partial \overline{v_j}}{\partial x_j} = 0 \tag{24}$$

Razlika jednadžbi (23) i (24) daje jednadžbu kontinuiteta za pulsirajuće strujanje:

$$\frac{\partial \overline{v_j}'}{\partial x_j} = 0 \tag{25}$$

Za slučaj jednadžbe kontinuiteta vrijedi princip superpozicije, jednadžbe (23) i (24) su istovjetne jednadžbi (25).

Uz zanemarivanje masene sile te vremenskim osrednjavanjem, jednadžbe (21) i (22) uvrštenjem u jednadžbu (20) daju Reynoldsove osrednjene Navier-Stokesove jednadžbe:

$$\rho\frac{\partial \overline{v_i}}{\partial t} + \rho\overline{v_j}\frac{\partial \overline{v_i}}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu\frac{\partial \overline{v_i}}{\partial x_j} - \rho\overline{v_i'v_j'}\right) \tag{26}$$

gdje je $-\rho\overline{v_i'v_j'}$ Reynoldsov tenzor turbulentnog naprezanja.

Ovakvim pristupom osrednjavanja pokušava se stohastička priroda turbulentnog strujanja definirati vremenski osrednjenim poljima brzine i tlaka, a to bi bilo ostvarivo uz poznavanje beskonačno mnogo korelacija brzine i tlaka. Ipak, iskustvene spoznaje pokazuju da je za proračunavanje karakteristika polja brzine i tlaka dovoljno poznavati konačan broj korelacija [20].

3.5. Modeli turbulencije

Uloga modela turbulencija je da usklađuju broj jednadžbi i broj nepoznanica polja strujanja tako da se zaustave na određenoj korelaciji te da zadovolje opće zahtjeve kao što su: univerzalnost, točnost, mogućnost ekonomičnog rješavanja i jednostavnost [20]. Promatrajući red korelacije brzina za koju se rješava transportna jednadžba, modele turbulencije dijelimo na: modele prvog, drugog i trećeg reda. Najjednostavniji modeli turbulencije su oni prvog reda. U njima se modelira dvojna korelacija brzina (tenzor Reynoldsovih naprezanja) prema hipotezi Boussinesqa:

$$-\rho\overline{v_i'v_j'} = \mu_t\left(\frac{\partial\overline{v_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial\overline{v_j}}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\rho\overline{k}\delta_{ij} \tag{27}$$

gdje je μ_t koeficijent turbulentne viskoznosti.

Uvrštenjem Boussinesqove hipoteze u Reynoldsove jednadžbe slijedi:

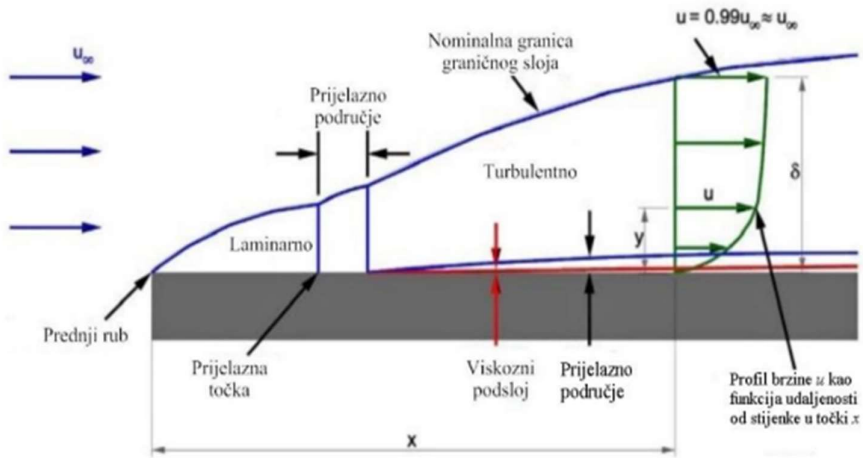
$$\frac{\partial\overline{v_j}}{\partial x_j} = 0 \tag{28}$$

$$\rho\frac{\partial\overline{v_i}}{\partial t} + \rho\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\overline{v_j}\overline{v_i}\right) = -\frac{\partial\left(\overline{p} + \frac{2}{3}\rho\overline{k}\right)}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \mu_t\right)\left(\frac{\partial\overline{v_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial\overline{v_j}}{\partial x_i}\right)\right] \tag{29}$$

Za potrebe izrade ovog rada korištena su dva modela turbulencije: k-ε i k-ω SST. k-ε model turbulencije se sastoji od dvije dodatne transportne jednadžbe, gdje je $k = k(x,t)$ simbol za turbulentnu kinetičku energiju, a $\varepsilon = \varepsilon(x,t)$ je stopa rasipanja (disipacije) turbulentne energije [22]. k-ω SST (eng. *Shear Stress Transport*) je jedan od najčešće primijenjenih modela turbulencije s dvije dodatne transportne jednadžbe u problemima brodske hidromehanike, koji u odnosu na k-ε model umjesto vremenske komponente razmatra duljinsku, pri čemu ω predstavlja specifičnu disipaciju energije [23].

3.6. Strujanje u blizini krute stijenke (zidne funkcije)

Pri gibanju broda u vodi oko njega se stvara turbulentni granični sloj, a tu pojavu se može razmatrati pojednostavljeno na primjeru strujanja vode oko ravne ploče. Na početku ploče pojavljuje se samo laminarno strujanje, nakon čega slijedi područje s kombinacijom laminarnog i turbulentnog strujanja, odnosno prijelazno područje, a nakon tog područja strujanje postaje u potpunosti turbulentno [24].



Slika 4. Razvoj graničnog sloja prilikom strujanja uz krutu stijenku [24]

Bezdimenzijski profil brzine strujanja može se zapisati kao:

$$U^+ = f(y^+) \tag{30}$$

gdje je U^+ bezdimenzijska brzina u graničnom sloju, a y^+ bezdimenzijska udaljenost od stijenke, a mogu se izraziti kao:

$$U^+ = \frac{U}{U_\tau} \tag{31}$$

$$U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \tag{32}$$

$$y^+ = \frac{yU_\tau}{\nu} \tag{33}$$

gdje je U srednja brzina strujanja, U_τ brzina trenja, τ_w tangencijalno naprezanje na stijenki i y je udaljenost od stijenke.

Na slici 5. prikazana je ovisnost bezdimenzijske brzine U^+ o bezdimenzijskoj udaljenosti y^+, odnosno dan je profil brzine strujanja u turbulentnom graničnom sloju.

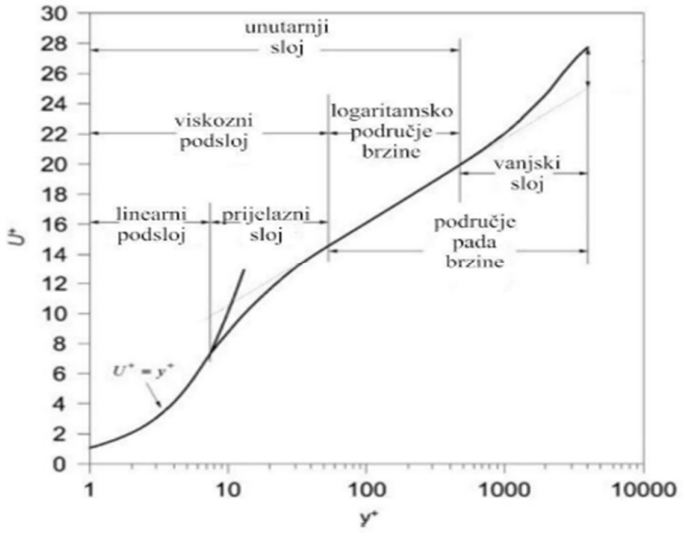
Za linearni podsloj vrijedi:

$$U^+ = y^+ \tag{34}$$

U logaritamskom području brzine vrijedi:

$$U^+ = \frac{1}{\kappa}\ln y^+ + B \tag{35}$$

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



Slika 5. Profil brzine strujanja u turbulentnom graničnom sloju [24]

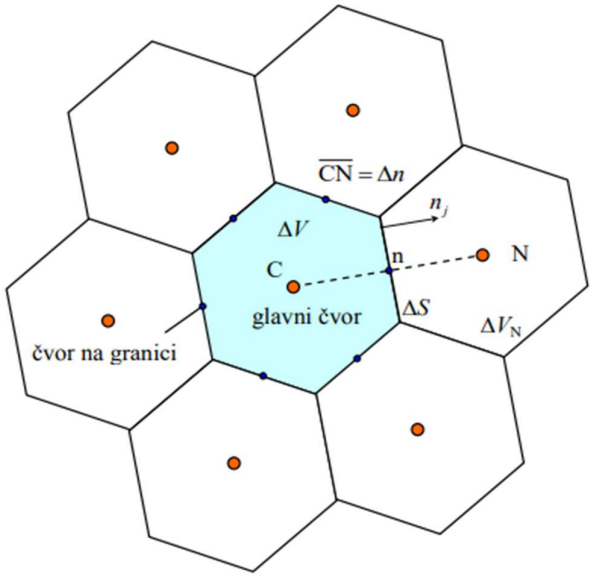
3.7. Metoda konačnih volumena

Metodom konačnih volumena područje proračuna podijeljeno je na konačan broj malih volumena pomoću mreže koja definira granice kontrolnih volumena [25]. Ovo je integralna metoda koja se temelji na integriranju konzervativnog oblika transportnih jednadžbi po konačnim volumenima na koje je podijeljeno područje proračuna [20]. Integral transportne jednadžbe po konačnom volumenu glasi:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_{\Delta V}\rho\varphi \mathrm{d}V = -\int_{\Sigma\Delta S}\left(\rho v_j\varphi - \Gamma\frac{\partial\varphi}{\partial x_j}\right)n_j\mathrm{d}S + \int_{\Delta V}S_\varphi \mathrm{d}V \qquad \textbf{(36)}$$

gdje je s lijeve strane jednadžbe brzina promjene sadržaja fizikalnog svojstva φ u ΔV, dok je s desne strane jednadžbe prvi član konvekcijski i difuzijski protok fizikalnog svojstva kroz granice, a drugi član predstavlja izvor fizikalnog svojstva.

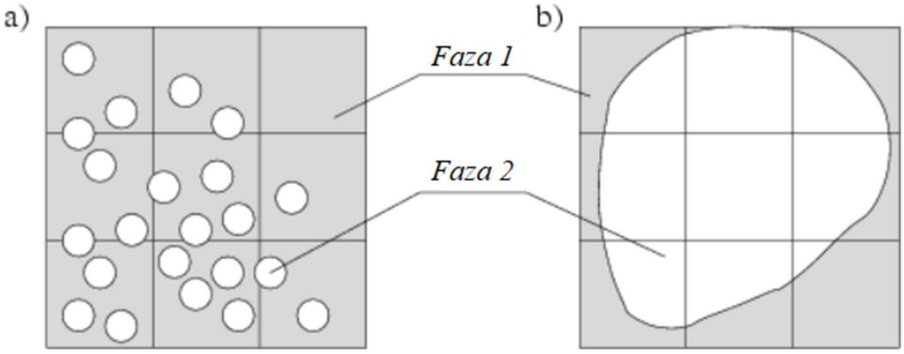
Jednadžba (36) pokazuje da je brzina promjene sadržaja fizikalnog svojstva unutar konačnog volumena proporcionalna brzini protoka tog fizikalnog svojstva kroz granice konačnog volumena i brzini nastajanja ili nestajanja tog fizikalnog svojstva unutar konačnog volumena. Protok fizikalnog svojstva poprima pozitivne vrijednosti kad se odvija od konačnog volumena prema okolini, a minus ispred integrala ukazuje da se za takav protok sadržaj fizikalnog svojstva unutar konačnog volumena smanjuje.



Slika 6. Dio diskretiziranog područja proračuna [20]

3.8. Metoda udjela fluida u volumenu

Metoda udjela fluida u volumenu (eng. *Volume of Fluid*-VOF) jednostavan je višefazni model pogodan za simuliranje strujanja fluida koji se ne miješaju. Primjerice u slučaju pokusa otpora broda to su voda i zrak između kojih se pojavljuje slobodna površina. U takvim slučajevima nema potrebe za dodatnim modeliranjem međufaznih interakcija (primjer slobodne površine), već pretpostavka da sve faze imaju isto polje brzine, tlaka i temperature postaje pogreška diskretizacije [26]. Na slici 7. dan je prikaz neprikladne (a) i prikladne (b) mreže za dvofazni model strujanja koristeći metodu udjela fluida u volumenu [26].



Slika 7. Prikaz dvofaznog fluida u ćeliji [26]

3.9. Verifikacija rezultata

Postupkom verifikacije određuje se nesigurnost rezultata numeričkih simulacija. Za provedbu verifikacije je potrebno imati minimalno tri rješenja dobivena primjenom različitih ulaznih parametara. Stoga su za potrebe ovog rada generirane tri mreže različitih gustoća. Razlike rezultata koji su dobiveni primjenom srednje ϕ_2 i fine mreže ϕ_1, odnosno grube ϕ_3 i srednje mreže dane su izrazima [1]:

$$\varepsilon_{21} = \phi_2 - \phi_1 \tag{37}$$

$$\varepsilon_{32} = \phi_3 - \phi_2 \tag{38}$$

gdje je ε_i razlika rezultata. Za omjer konvergencije R_i vrijedi [27]:

$$R_i = \frac{\varepsilon_{21}}{\varepsilon_{32}} \tag{39}$$

Konvergenciju je moguće podijeliti na:

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

U ovome radu, nesigurnost numeričkih simulacija U_{SN} (eng. *simulation numerical uncertainty*) određuje se metodom indeksa konvergencije mreže (eng. *Grid Convergence Index*-GCI), koja se oslanja na Richardsonovu ekstrapolaciju [1]. Ova metoda se koristi za procjenu nesigurnosti koje se pojavljuju iz grešaka mreže i vremenskog koraka. U_{SN} je izražena kao:

$$U_{SN}^2 = U_I^2 + U_G^2 + U_T^2 \tag{40}$$

gdje je U_I iterativna nesigurnost, U_G nesigurnost mreže i U_T nesigurnost vremenskog koraka. U ovom radu pretpostavljeno je:

$$U_{SN} = U_G \tag{41}$$

Važno je naglasiti kako je iterativna nesigurnost uobičajeno za red veličine manja od nesigurnosti mreže i vremenskog koraka te se učestalo zanemaruje [13]. Također, u stacionarnim numeričkim simulacijama nesigurnost vremenskog koraka jednaka je nuli, budući da nije provedena vremenska diskretizacija.

Za postupak verifikacije s gustoćom mreže kao ulazim parametrom, faktore profinjavanja moguće je izračunati na sljedeći način:

$$r_{21} = \sqrt[3]{\frac{N_{C,1}}{N_{C,2}}} \tag{42}$$

$$r_{32} = \sqrt[3]{\frac{N_{C,2}}{N_{C,3}}} \tag{43}$$

gdje je $N_{C,1}$ broj ćelija fine mreže, $N_{C,2}$ broj ćelija srednje mreže, a $N_{C,3}$ broj ćelija grube mreže. Ostali parametri definirani su kako slijedi:

$$p_a = \frac{1}{\ln(r_{21})}\left|\ln\left|\frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}}\right| + q(p_a)\right| \tag{44}$$

$$q(p_a) = \ln\left(\frac{r_{21}^{p_a} - s}{r_{32}^{p_a} - s}\right) \tag{45}$$

$$s = \operatorname{sgn}\left(\frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}}\right) \tag{46}$$

Ekstrapolirano rješenje računa se sljedećom jednadžbom:

$$\phi_{ext}^{21} = \frac{r_{21}^{p_a}\phi_1 - \phi_2}{r_{21}^{p_a}} \tag{47}$$

Približne i ekstrapolirane pogreške su dobivene na sljedeći način:

$$e_a^{21} = \left|\frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_1}\right| \tag{48}$$

$$e_{ext}^{21} = \left|\frac{\phi_{ext}^{21} - \phi_1}{\phi_{ext}^{21}}\right| \tag{49}$$

U konačnici, numerička nesigurnost numeričke simulacije određena je kao:

$$GCI_{fine}^{21} = \frac{1{,}25\, e_a^{21}}{r_{21}^{p_a} - 1} \cdot 100\% \tag{50}$$

3.10. Validacija rezultata dobivenih numeričkom simulacijom

Postupkom validacije uspoređuju se rezultati dobiveni numeričkom simulacijom s onima dobivenim eksperimentalno. Drugim riječima, validacija pokazuje koliko točno matematički model opisuje neku pojavu. U ovom radu rezultati su uspoređeni na sljedeći način:

$$RD = \frac{\varphi_{RDF} - \varphi_{EKS}}{\varphi_{EKS}} \cdot 100\% \quad \textbf{(51)}$$

gdje je RD relativno odstupanje, φ_{RDF} rješenje dobiveno numeričkom simulacijom, a φ_{EKS} rješenje dobiveno eksperimentalnim ispitivanjem.

4. NUMERIČKA SIMULACIJA POKUSA OTPORA

4.1. Ulaz u STAR-CCM+

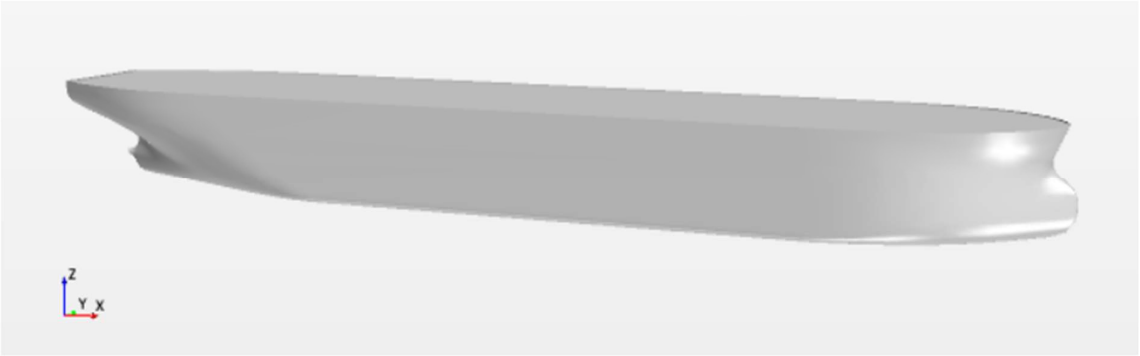
U ovom radu su provedene numeričke simulacije u u komercijalnom paketu STAR-CCM+ na modelu broda JBC, čiji je 3D model javno dostupan, kao i rezultati eksperimentalnih ispitivanja [28]. Model se u programskom paketu STAR-CCM+ unosi naredbom unosa površinske diskretizirane mreže (eng. *import surface mesh*). U tablici 1. prikazane su glavne značajke JBC broda u naravi i modela broda [28].

Tablica 1. Glavne značajke broda i modela [28]

Značajka	Brod	Model
λ	1	40
L_{PP}	280 m	7 m
B	45 m	1,125 m
T	16,5 m	0,4125 m
∇	178369,9 m^3	2,78703 m^3
S	19556,1 m^2	12,2226 m^2
C_B	0,858	0.858
x_{CG} (od glavnog rebra)	7,133 m	0,178325 m
y_{CG}	0 m	0 m
z_{CG}	13,29 m	0,33225 m
r_{xx}	18 m	0,45 m
r_{yy}	70 m	1,75 m
r_{zz}	70 m	1,75 m

U tablici 1. λ je mjerilo geometrijske sličnosti, L_{PP} duljina između perpendikulara, B širina, T gaz, ∇ volumen istisnine, S oplakana površina, C_B blok koeficijent, x_{CG} udaljenost težišta mase od središnjeg perpendikulara u x smjeru, y_{CG} udaljenost težišta mase od simetralne ravnine u y smjeru, z_{CG} udaljenost težišta mase od osnovice u z smjeru, r_{xx} polumjer momenta tromosti oko x osi, r_{yy} polumjer momenta tromosti oko y osi, a r_{zz} polumjer momenta tromosti oko z osi.

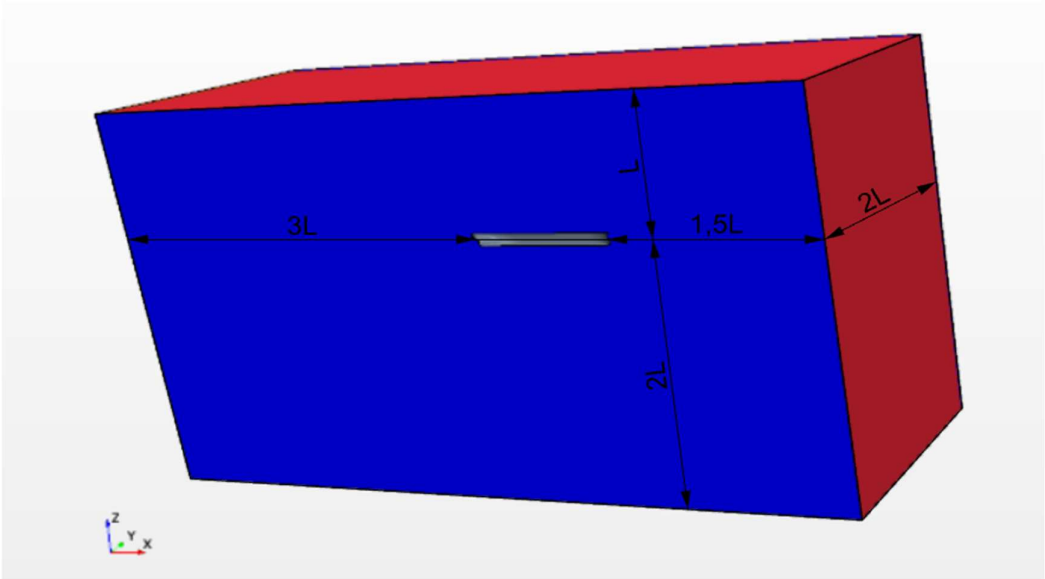
Važno je naglasiti kako su se numeričke simulacije sa slobodnom površinom provodile s fiksnim modelom broda. Ovo je napravljeno kako bi se omogućila vjerodostojna usporedba rezultata nominalnog sustrujanja dobivenih primjenom numeričkih simulacija sa slobodnom površinom i numeričkih simulacija s udvojenog modela.



Slika 8. JBC model broda

4.2. Kreiranje proračunske domene

Za provedbu numeričke simulacije potrebno je oko modela broda kreirati proračunsku domenu. Domena je oblika kvadra na čijim se granicama zadaju rubni uvjeti. Generirana je samo polovina domene, budući da je model broda simetričan te se na taj način omogućuje skraćivanje vremena proračuna.



Slika 9. Dimenzije proračunske domene

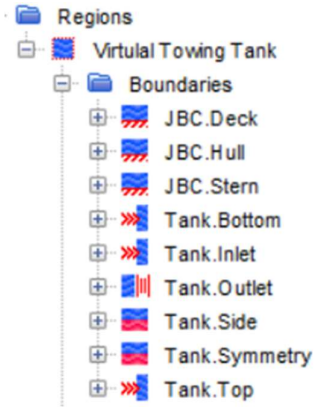
Dimenzije proračunske domene određene su prema literaturi [11 - 13], a prikazane su na slici 9. Nakon generiranja kvadra operacijom *Boolean* stvara se domena oduzimanjem modela od kvadra.

4.3. Rubni uvjeti

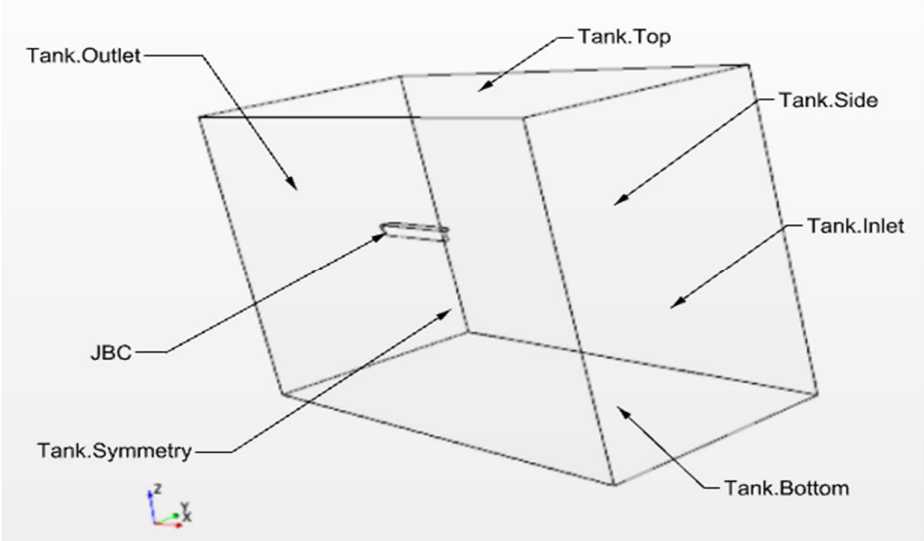
Proračunsku domenu je potrebno podijeliti na zasebne granice (eng. *boundaries*) te se za svaku granicu zadaju određeni rubni uvjeti. Kako su u ovom radu provedena dva tipa numeričkih simulacija, oni zahtijevaju određene razlike u postavci rubnih uvjeta: prvi tip se odnosi na numeričke simulacije sa slobodnom površinom, dok se u drugom tipu provode numeričke simulacije s udvojenim modelom bez prisustva slobodne površine. U oba slučaja model je fiksan, a voda nastrujava na njega.

4.3.1. Rubni uvjeti za slučaj prisustva slobodne površine

Model broda podijeljen je na granice (*JBC.Deck*, *JBC.Hull*, *JBC.Stern*) za koje je postavljen isti rubni uvjet zida (eng. *wall*) s obzirom da model miruje, a voda nastrujava na njega. Na simetralnoj ravnini modela postavljena je granica domene *Tank.Symmetry* s rubnim uvjetom simetrije (eng. *symmetry plane*), čime je omogućeno razmatranje samo polovine modela. Za granice *Tank.Inlet*, *Tank.Top* i *Tank.Bottom* postavljen je uvjet koji definira brzinu na ulazu (eng. *velocity inlet*). U konačnici, za granicu *Tank.Outlet* postavljen je rubni uvjet temeljen na tlaku na izlazu (eng. *pressure outlet*). Na slikama 10. i 11. je prikazan popis granica domene te njihov položaj.



Slika 10. Granice domene za prvi tip simulacija

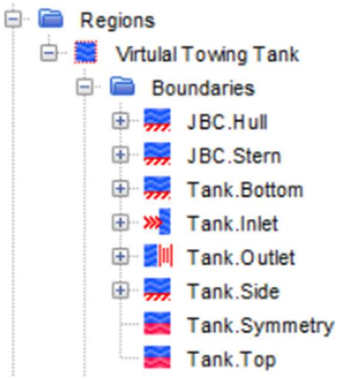


Slika 11. Položaj granica domene za prvi tip simulacija

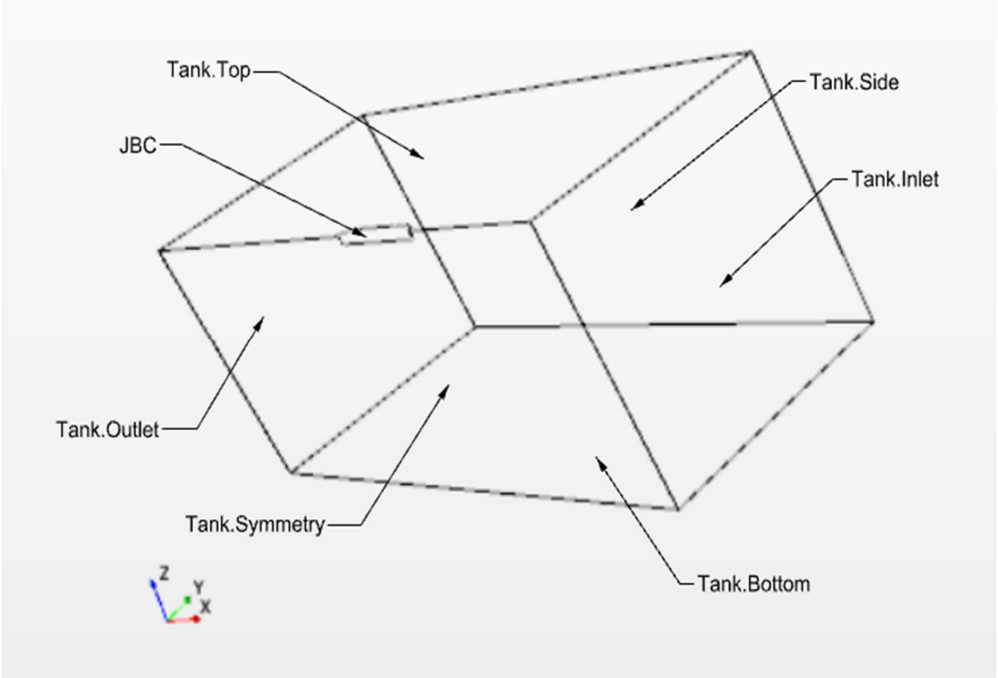
4.3.2. Rubni uvjeti za numeričke simulacije s udvojenim modelom

U ovome slučaju se granica *Tank.Top* postavlja na mjesto gaza modela, odnosno na poziciju slobodne površine. Za granicu *Tank.Top* vrijedi rubni uvjet simetrije (eng. *symmetry plane*) kojim se postiže udvojeni model. Model JBC je podijeljen u dvije granice (*JBC.Hull*, *JBC.Stern*) s rubnim uvjetom zida (eng. *wall*). Paluba modela sada je izvan područja domene te se ne uzima u obzir. Rubni uvjet granice *Tank.Inlet* ostaje nepromijenjen te definira brzinu na ulazu (eng. *velocity inlet*), a isto vrijedi i za granicu *Tank.Outlet,* gdje vrijedi uvjet tlaka na izlazu (eng. *pressure outlet*). Na granice *Tank.Bottom* i *Tank.Side* zadaje se uvjet „*slip wall*“.

Na slikama 12. i 13. prikazan je popis granica domene te njihov položaj.

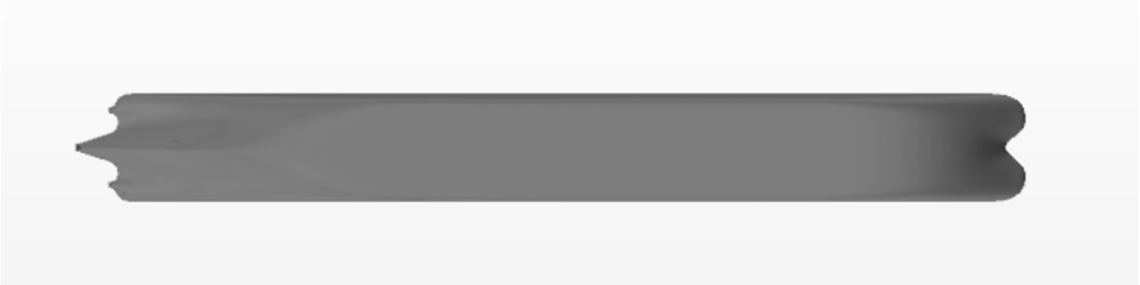


Slika 12. Granice domene za drugi tip simulacija



Slika 13. Položaj granica domene za drugi tip simulacija

Na slici 14. dan je prikaz udvojenog modela broda JBC.



Slika 14. Prikaz udvojenog modela

4.4. Diskretizacija geometrijske mreže

Svaka geometrijska mreža sastavljena je od osnovnih jedinica, odnosno ćelija (eng. *cell*), a ćelije su sastavljene od vrhova (eng. *vertices*), rubova (eng. *feature curves*) i stranica (eng. *faces*). Stranice se ne smiju preklapati, ali se moraju dodirivati na rubovima. Za potrebe ovog rada diskretizacija domene je provedena alatom za automatsko generiranje mreže (eng. *automated mesh*) dostupnim u programskom paketu STAR-CCM+. Alati odabrani za diskretizaciju mreže, slijedeći upute prema [30] su:

- alat za rediskretizaciju površina (eng. *Surface Remesher*),
- automatsko popravljanje površina (eng. *Automatic Surface Repair*),
- alat za odsijecanje suvišnih površina (eng. *Trimmed Cell Mesher*),
- alat za diskretizaciju prizama u graničnom sloju (eng. *Prism Layer Mesher*).

U tablici 2. prikazane su postavke diskretizacije.

Tablica 2. Postavke diskretizacije

Svojstvo	Opcija	Vrijednost
Osnovna veličina	Vrijednost	0,1 m
Ciljana veličina površine	Postotak osnovne veličine	50%
Minimalna veličina površine	Postotak osnovne veličine	6,25%
Zakrivljenost površine	Broj točaka u krugu	36
Automatsko popravljanje površine	Minimalna neposredna blizina	0,001
Broj slojeva u prizmi	Broj	6
Faktor rastezanja	Koeficijent povećanja slojeva u prizmi	1,5
Ukupna debljina slojeva u prizmi	Apsolutna vrijednost	0,045 m
Stopa rasta volumena	Zadana stopa rasta	Sporo
Maksimalna veličina površine	Postotak osnovne veličine	1600%

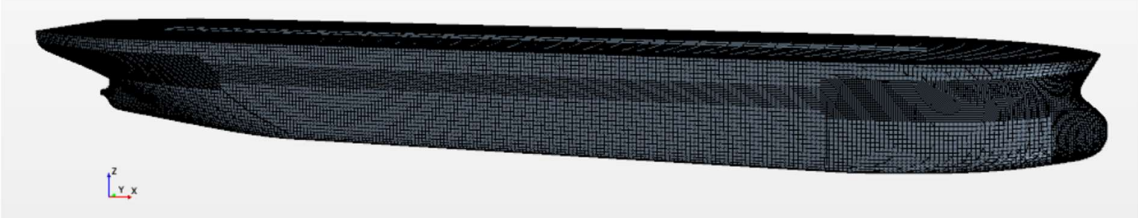
Kako je već prije navedeno, za provedbu postupka verifikacije zahtijeva se minimalno tri numerička rješenja, stoga su generirane tri mreže različitih gustoća (gruba, srednja i fina). Kako su svi parametri diskretizacije zadani relativno u odnosu na osnovnu veličinu ćelije, nakon što je generirana gruba mreža, srednja mreža je dobivena dijeljenjem osnovne veličine ćelije s $\sqrt{2}$. Konačno, fina mreža je dobivena primjenom dvostruko manje osnovne veličine ćelije u odnosu na grubu mrežu. Za potrebe ovog rada je provedeno ukupno dvanaest numeričkih simulacija:

1. četiri numeričke simulacije sa slobodnom površinom (kasnije „prva grupa simulacija“):
    - gruba mreža s *k-ω* SST modelom turbulencije,
    - srednja mreža s *k-ω* SST modelom turbulencije,
    - fina mreža s *k-ω* SST modelom turbulencije,
    - fina mreža s *k-ε* modelom turbulencije,
2. četiri numeričke simulacije s udvojenim modelom bez slobodne površine (kasnije „druga grupa simulacija“):
    - gruba mreža s *k-ω* SST modelom turbulencije,
    - srednja mreža s *k-ω* SST modelom turbulencije,
    - fina mreža s *k-ω* SST modelom turbulencije,
    - fina mreža s *k-ε* modelom turbulencije,
3. četiri numeričke simulacije s udvojenim modelom bez slobodne površine uz dodatna profinjenja u području domene gdje je smješten brodski vijak (kasnije „treća grupa simulacija“):
    - profinjena gruba mreža s *k-ω* SST modelom turbulencije,
    - profinjena srednja mreža s *k-ω* SST modelom turbulencije,
    - profinjena fina mreža s *k-ω* SST modelom turbulencije,
    - profinjena fina mreža s *k-ε* modelom turbulencije.

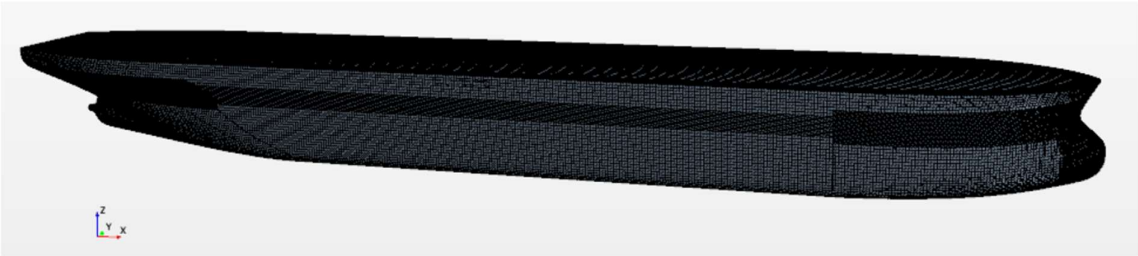
Tri dodatne simulacije s *k-ε* modelom turbulencije provedene su radi usporedbe dobivenih rezultata s onima dobivenim primjenom *k-ω* SST modela turbulencije, odnosno analize utjecaja izbora modela turbulencije na rezultate nominalnog sustrujanja. Profinjenje mreža kod treće grupe simulacija napravljeno je za trup modela i područje iza krme broda u svrhu određivanja utjecaja načina diskretizacije na točnost rezultata.

Tablica 3. Osnovne veličine ćelija geometrijskih mreža

Gustoća mreže	Gruba	Srednja	Fina
Osnovna veličina ćelije	0,05 m	0,07071 m	0,1 m



Slika 15. Model broda diskretiziran grubom mrežom



Slika 16. Model broda diskretiziran srednjom mrežom

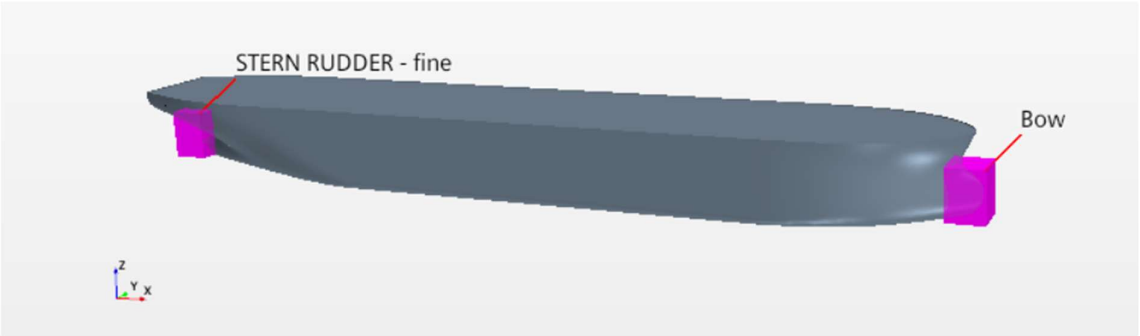
Slika 17. Model broda diskretiziran finom mrežom

Na slikama 15. - 17. je prikazan model broda diskretiziran grubom, srednjom i finom mrežom. Smanjenje osnovne veličine ćelije, između ostalog, rezultira točnijom diskretizacijom trupa modela broda.

4.4.1. Volumetrijske kontrole

Za odgovarajuću diskretizaciju domene potrebno je posvetiti posebnu pažnju na dijelove domene gdje je potrebno izvršiti profinjenje mreže kako bi se dobili što točniji rezultati, primjerice na mjestima s velikim gradijentima fizikalnih veličina. U ovome radu je napravljeno profinjenje u području pramca i krme, trupa modela broda, slobodne površine i Kelvinovog kuta. Za prvu i drugu grupu simulacija profinjenja su jednaka, dok su kod treće grupe simulacija izostavljena profinjenja slobodne površine i Kelvinovog kuta. U svrhu adekvatne usporedbe

rezultata dobivene primjenom prve i druge grupe simulacija, odlučeno je zadržati ista profinjenja. Ovo je omogućilo istraživanje utjecaja valova, odnosno veličine komponente koeficijenta sustrujanja valova za koju se očekuje da će biti gotovo zanemarivog iznosa. Mreža treće grupe simulacija dodatno je profinjena u području pramca i krme, gdje su ćelije generirane kao 6,25% osnovne veličine, te na području trupa, gdje su ćelije generirane kao 12,5% osnovne veličine. Na slici 18. prikazana su područja dodatnih volumetrijskih profinjenja u području krme i pramca.

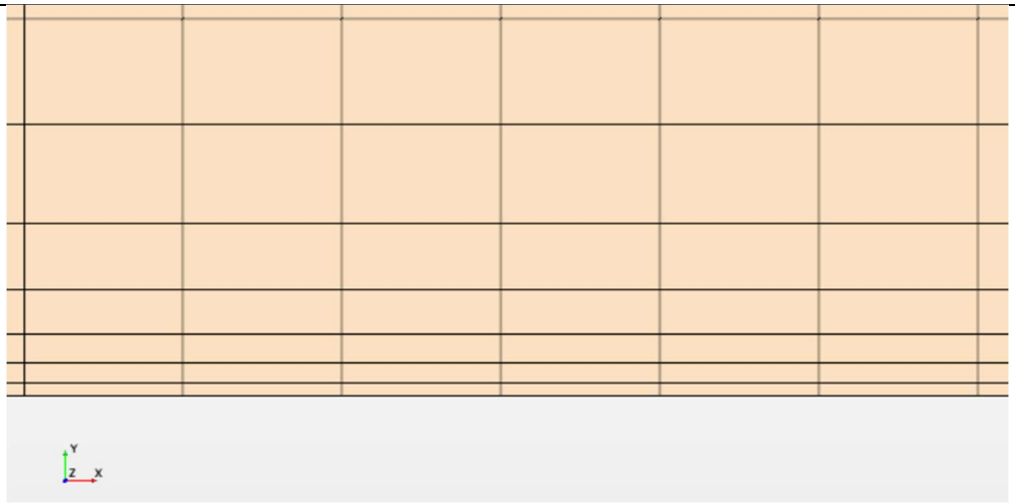


Slika 18. Volumetrijske kontrole pramca i krme

Diskretizacija graničnog sloja oko trupa broda vrlo je važna, a s obzirom da u tom području gradijent brzine i intenzitet turbulencije poprimaju najveće vrijednosti zahtijeva se dodatno profinjenje mreže za postizanje što točnijih rezultata [31]. Za diskretizaciju graničnog sloja korišten je alat za diskretizaciju prizama, čije su postavke navedene u tablici 2. Ćelije moraju postepeno rasti od manjih prema većima, a zadnja ćelija graničnog sloja ne smije biti veća od prve sljedeće koja se nastavlja na granični sloj. Kako su se u ovome radu primijenile zidne funkcije, preporuča se postavljanje parametra y^+ u granicama $30 \leq y^+ \leq 300$. Na taj način prva ćelija uz trup modela broda nalazit će se unutar logaritamskog područja brzine [29]. Izraz za približno određivanje parametra y^+ glasi [31]:

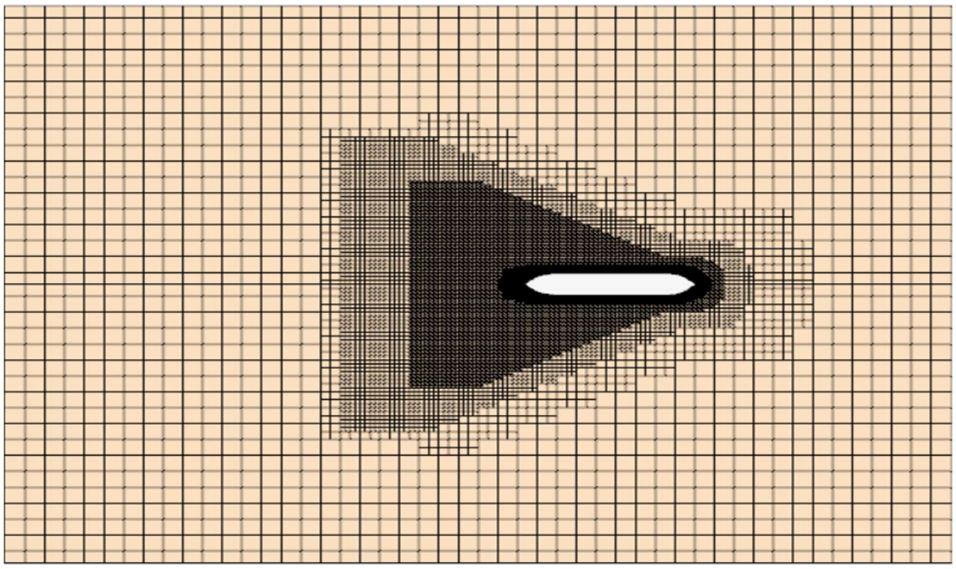
$$y^+ = 0{,}172 \left(\frac{y}{L}\right) Rn^{0.9} \tag{52}$$

gdje je y polovina visine prve ćelije u graničnom sloju, L duljina modela (jednaka duljini između perpendikulara L_{PP} iz tablice 1.), a Rn Reynoldsov broj.



Slika 19. Diskretizacija graničnog sloja, gruba mreža

Nadalje, za diskretizaciju područja oko trupa broda izvan graničnog sloja potrebno je izraditi četiri volumetrijske kontrole u obliku kvadra i cilindra. Diskretizacija slobodne površine izvršena je pomoću tri kvadra, koji pokrivaju cijelu domenu u ravnini slobodne površine, a u smjeru osi z obuhvaćaju očekivani položaj slobodne površine. Kelvinov kut je kut između točaka sjecišta poprečnih i razilaznih valova, čija je diskretizacija provedena pomoću tri volumetrijske kontrole u obliku kvadra i cilindra smještenima na različita područja oko trupa modela broda. Slika 20. prikazuje tlocrt diskretizirane grube mreže na poziciji z = 0,2925 m, pri čemu je z = 0 m na osnovici.



Slika 20. Poprečni presjek grube mreže na z = 0,2925 m, pogled odozgo

U tablici 4. je dan prikaz broja dobivenih ćelija za različite gustoće mreža.

Tablica 4. Broj ćelija geometrijskih mreža

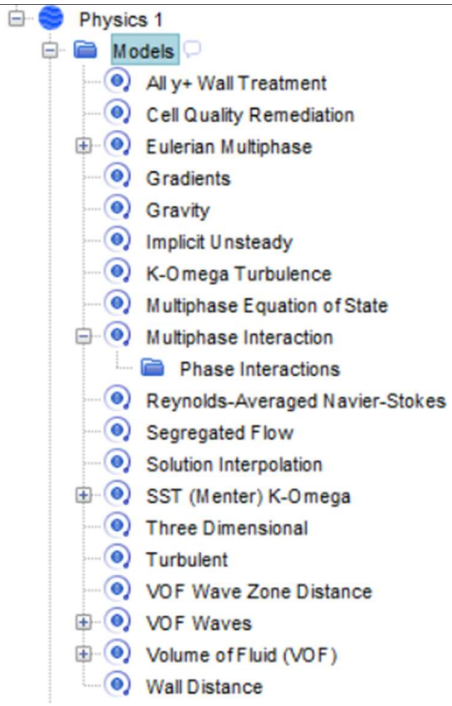
Grupa simulacija	Gruba mreža	Srednja mreža	Fina mreža
Prva grupa simulacija	563 783	1 165 156	2 510 999
Druga grupa simulacija	367 444	788 386	1 670 270
Treća grupa simulacija	857 024	1 670 270	3 221 475

Prema podacima navedenim u tablici 4. može se zaključiti kako mreže prve grupe simulacija imaju više ćelija u odnosu na drugu grupu simulacija te je samim time vrijeme provedbe prve grupe simulacija znatno dulje. Uz to, vrijeme proračuna prve grupe simulacija je znatno dulje kako je riječ o nestacionarnim simulacijama koje uključuju utjecaj slobodne površine. Također, iz tablice 4. moguće je uočiti kako profinjenje mreže u slučaju treće grupe simulacija znatno povećava broj ćelija.

4.5. Unos fizikalnog modela

4.5.1. Fizikalni model numeričkih simulacija sa slobodnom površinom

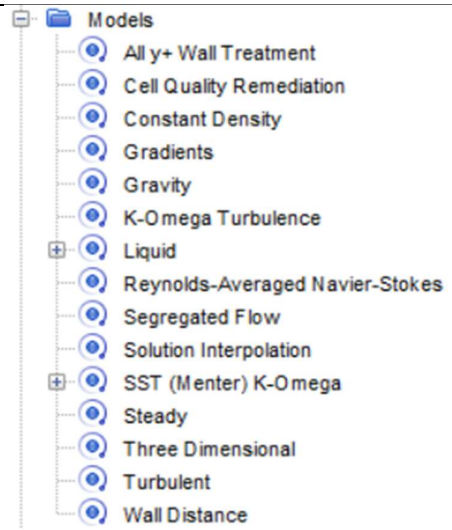
Prilikom provedbe numeričke simulacije pokusa otpora potrebno je razmatrati strujanje dva fluida, vode i zraka. Stoga je primijenjen Eulerov višefazni model (eng. *Eulerian Multiphase*) te model ravnih VOF valova (eng. *Flat* VOF *Waves*), koji zahtijeva unos brzine vode i zraka te njihove gustoće. Kako je prilikom provedbe eksperimenata u bazenu potrebno obratiti pažnju na utjecaj stijenki bazena na modelska ispitivanja, tako je i kod numeričkih simulacija bitno smanjiti utjecaj refleksije valova, koji su uzrokovani odbijanjem od granica domene. Ta se neželjena pojava sprječava primjenom prigušenja VOF valova (eng. VOF *Wave damping*). U ovom radu primijenjena duljina prigušenja jednaka je duljini modela broda. Na slici 21. dan je prikaz odabranog fizikalnog modela za prvu grupu simulacija.



Slika 21. Fizikalni model numeričkih simulacija sa slobodnom površinom

4.5.2. Fizikalni model numeričkih simulacija s udvojenim modelom

Numeričke simulacije s udvojenim modelom simuliraju duboko uronjeni model, što znači da je potrebno analizirati isključivo viskozno strujanje vode oko udvojenog modela. Stoga se fizikalni model razlikuje od onih simulacija koje su uključivale utjecaj slobodne površine. Time je onemogućena i pojava valova pa nema potrebe za korištenjem modela ravnih VOF valova kao u slučaju prve grupe simulacija. Važno je naglasiti kako su ove simulacije stacionarne, odnosno nije potrebno provesti vremensku diskretizaciju, što uvelike ubrzava vrijeme proračuna. Slikom 22. dan je prikaz odabranog fizikalnog modela za drugu i treću grupu simulacija.



Slika 22. Fizikalni model numeričkih simulacija s udvojenim modelom

4.6. Postavljanje parametara rješavača

4.6.1. Parametri rješavača za numeričke simulacije sa slobodom površinom

Za ovu grupu numeričkih simulacija korišten je nestacionarni implicitni rješavač (eng. *implicit unsteady solver*), koji je pogodan za numeričke simulacije sa slobodnom površinom. Podrelaksacijski faktori upotrjebljeni su za pospješivanje konvergencije u vremenskom koraku. Postavljena vrijednost podrelaksacijskog faktora za tlak je 0,4, za brzinu iznosi 0,7, a za odvojeni volumni udio 0,8. Maksimalni broj unutarnjih iteracija postavljen je na 5, a ukupno fizikalno vrijeme simulacije je postavljeno na 120 s. U numeričkim simulacijama primijenjen je vremenski korak iznosa 0,03 s, što odgovara 1/200 perioda, pri čemu je period određen kao omjer duljine i brzine modela.

4.6.2. Parametri rješavača za numeričke simulacije s udvojenim modelom

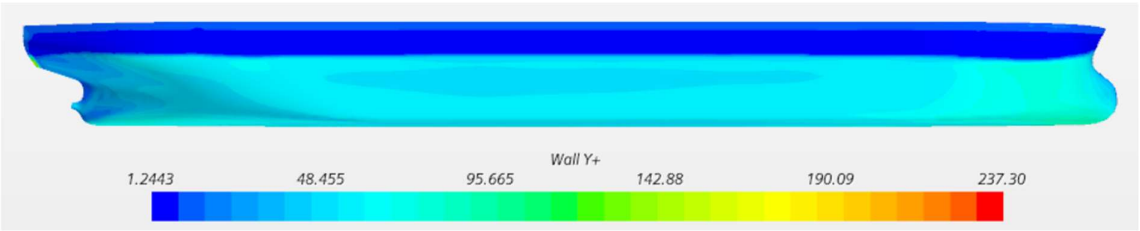
Kako u ovim numeričkim simulacijama nema slobodne površine, ne koristi se nestacionarni implicitni rješavač, već se primjenjuje stacionarni rješavač (eng. *stedy solver*). Podrelaksacijski faktor za tlak postavljen je na 0,1, a za brzinu na 0,5. U ovom slučaju razmatrano je prvih 5000 koraka iteracije, kako bi se minimizirala iterativna nesigurnost.

5. ANALIZA REZULTATA

Unutar ovog poglavlja dan je prikaz rezultata numeričkih simulacija kao i usporedba s rezultatima dobivenim eksperimentalnim ispitivanjima. Također su dani rezultati provedene verifikacije mreže, kao i analiza utjecaja izbora modela turbulencije na dobivene rezultate. Važno je napomenuti kako su sva ispitivanja provedena za jednu vrijednost Froudeovog broja $Fn = 0{,}142$.

5.1. Prikaz rezultata

Programski paket STAR-CCM+ uz numeričke rezultate omogućuje unutar postprocesora vizualni prikaz rezultata. Na slikama 23. i 24. je prikazana vrijednost parametra y^+ duž trupa modela broda za slučaj numeričkih simulacija sa slobodnom površinom, odnosno za slučaju numeričkih simulacija s udvojenim modelom. Može se utvrditi da je uvjet $30 \leq y^+ \leq 300$ zadovoljen na oplakanoj površini.

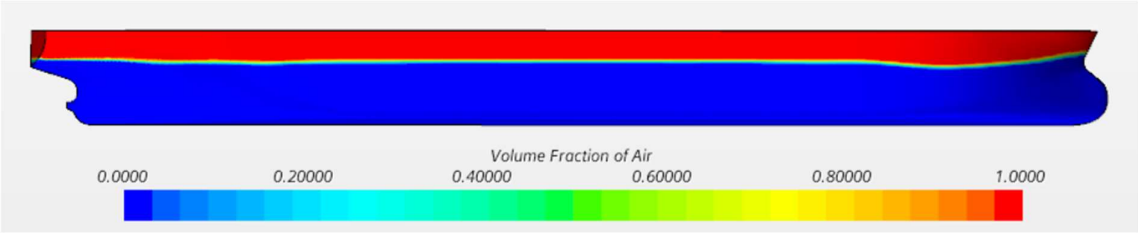


Slika 23. Parametar y^+ duž modela broda u numeričkim simulacijama sa slobodnom površinom

Slika 24. Parametar y^+ duž udvojenog modela broda

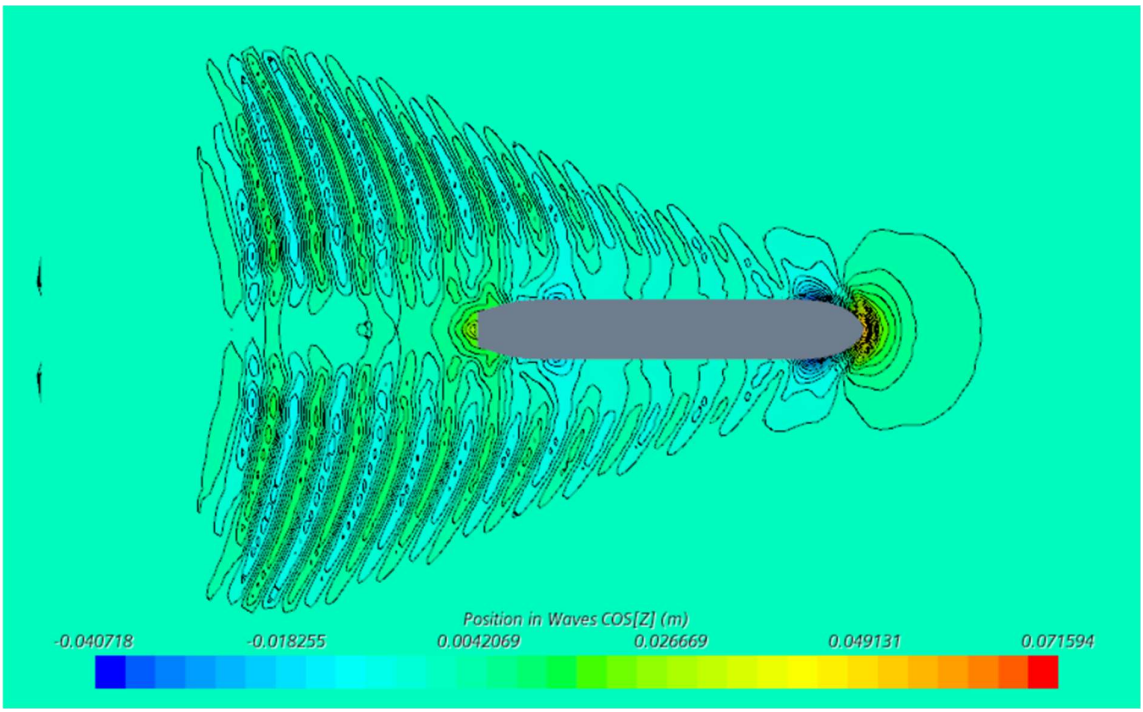
Na slici 25. je prikazan profil slobodne površine duž trupa modela broda za prvu grupu numeričkih simulacija. Slobodna površina je prikazana uz pomoć volumnog udjela zraka u ćeliji (eng. *Volume Fraction of Air*), gdje je vrijednosti 0 pridružena plava boja i ona prikazuje

vodu, dok je vrijednosti 1 pridružena crvena boja koja označava zrak. Moguće je uočiti stvaranje valnog brijega na pramcu, kao i stvaranje valnog dola u području pramčanog ramena.



Slika 25. Profil slobodne površine duž trupa modela broda

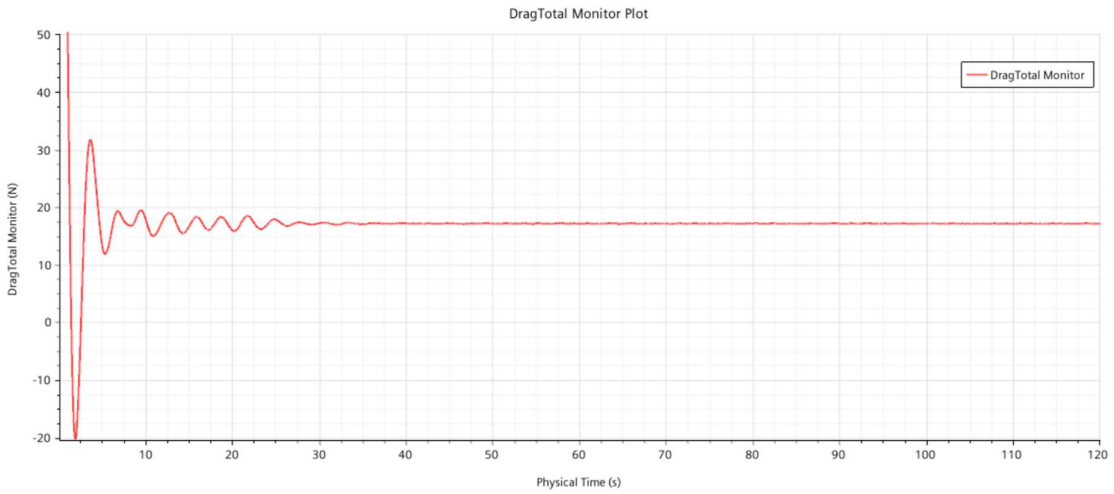
Prikaz slike valova iza modela broda s jasno uočljivim Kelvinovim kutom je dan na slici 26. Moguće je uočiti kako su valne visine vrlo malog iznosa, što je bilo i za očekivati obzirom da je numerička simulacija provedena pri niskoj vrijednosti *Fn.*



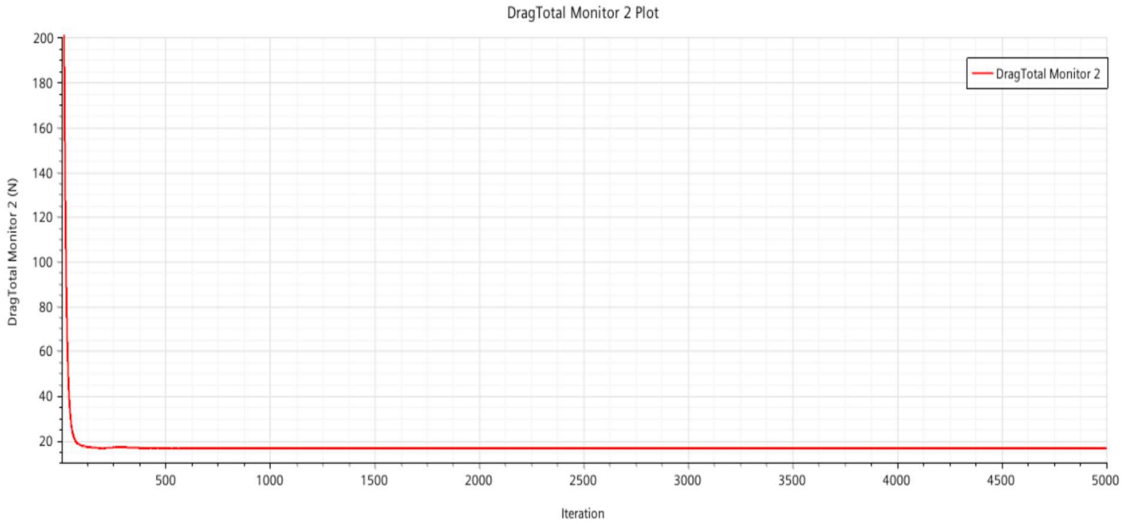
Slika 26. Slika valova

Na slici 27. je prikazan ukupni otpor modela broda dobiven provedbom prve grupe numeričkih simulacija, gdje je korišten nestacionarni implicitni rješavač, dok je na slici 28. dan prikaz ukupnog otpora udvojenog modela dobiven provedbom druge i treće grupe numeričkih

simulacija, gdje je korišten stacionarni rješavač. Na obje slike je vidljiva konvergencija rezultata.



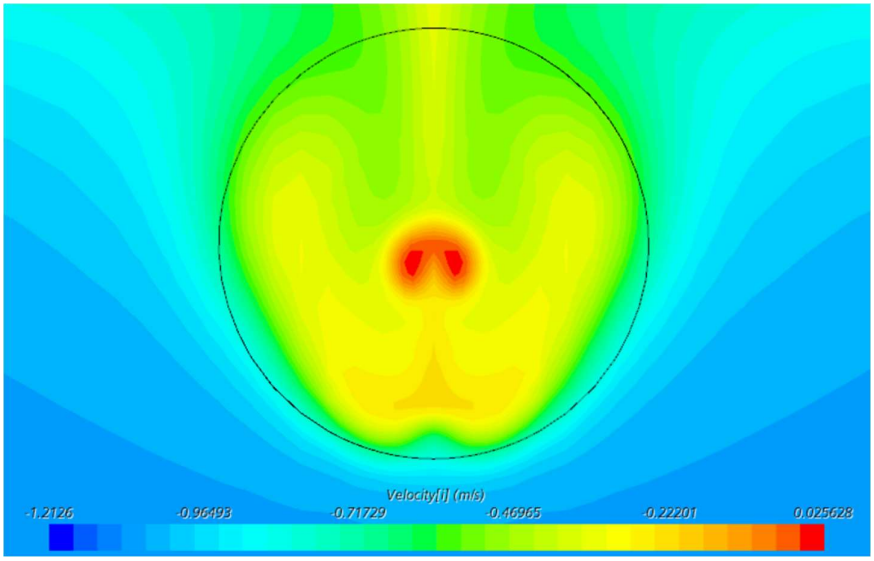
Slika 27. Sila ukupnog otpora prve grupe numeričkih simulacija



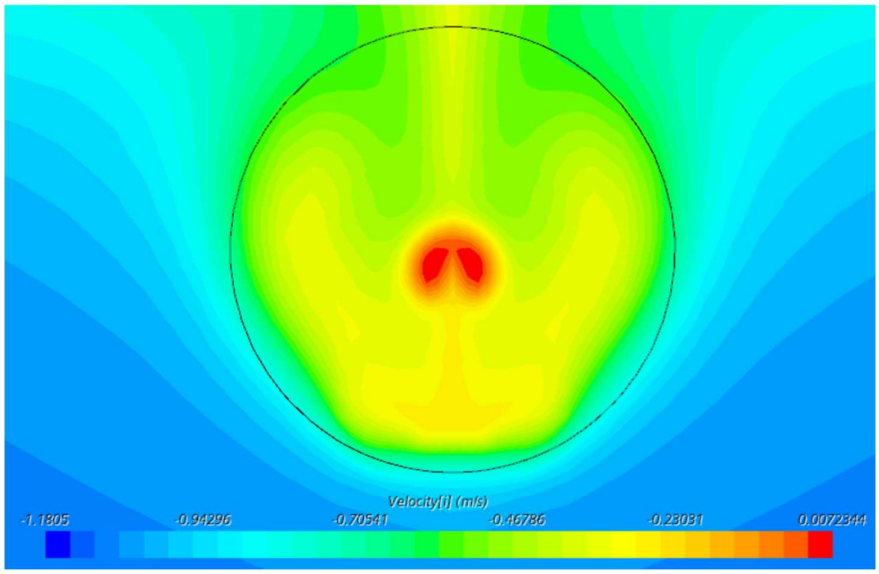
Slika 28. Sila ukupnog otpora druge i treće grupe numeričkih simulacija

Na slikama 29. - 31. je prikazano polje nominalnog sustrujanja. Na mjesto položaja vijka (x/L_{PP} = 0,9843) postavljena je ravnina te su na njoj prikazane aksijalne komponente brzine. Negativne vrijednosti brzina koje se javljaju u legendi, posljedica su razmatranja slučaja u kojem model broda miruje, a voda nastrujava na njega. Kako je u ovome radu naglasak stavljen baš na nominalno sustrujanje dan je prikaz za finu mrežu uz k-ω SST model turbulencije svake grupe

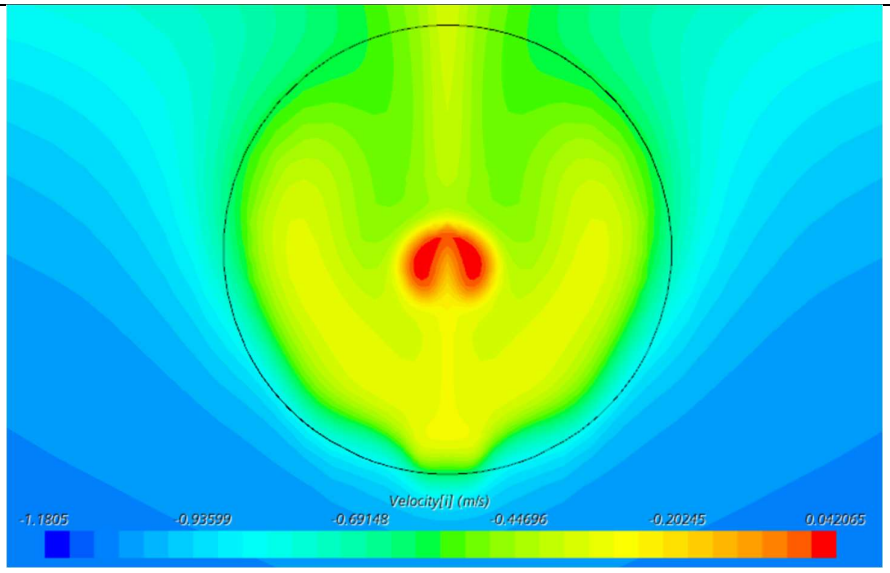
simulacija, da bi se pokazalo kako različite postavke numeričkih simulacija utječu na konačni rezultat. Na slikama je prikazana i kružnica promjera koji odgovara promjeru brodskog vijka. Usporedbom slika 29. i 30. lako je uočljivo kako je sustrujanje valova u ovom slučaju gotovo zanemarivo, budući da su dobivena gotovo identična polja nominalnog sustrujanja kod numeričkih simulacija sa slobodnom površinom i simulacija viskoznog strujanja oko udvojenog modela. Ovo potvrđuje valjanost primjene numeričkih simulacija s udvojenim modelom kod određivanja nominalnog sustrujanja pri nižim vrijednostima Froudeovog broja.



Slika 29. Polje nominalnog sustrujanja prve grupe numeričkih simulacija

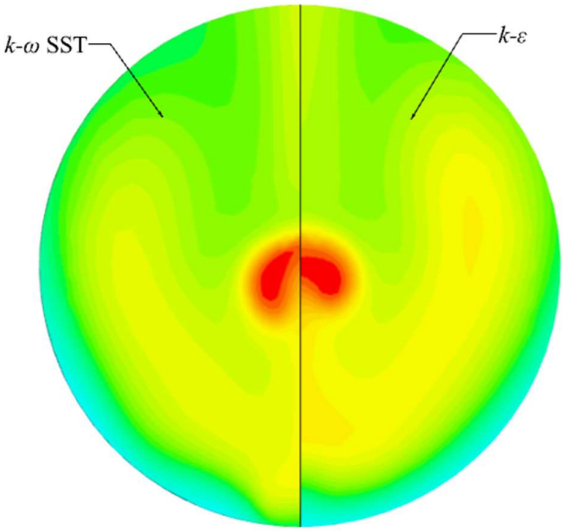


Slika 30. Polje nominalnog sustrujanja druge grupe numeričkih simulacija



Slika 31. Polje nominalnog sustrujanja treće grupe numeričkih simulacija

Slika 32. prikazuje usporedbu polja nominalnog sustrujanja dobivenog numeričkim simulacijama s finom mrežom iz treće grupe simulacija. Lijeva polovica prikazuje nominalno sustrujanje dobiveno primjenom *k-ω* SST modela turbulencije, dok je na desnoj polovici prikazano nominalno sustrujanje dobiveno primjenom *k-ε* modela turbulencije. Moguće je uočiti da je s *k-ω* SST modelom turbulencije dobiveno značajnije usporavanje strujanja u ravnini diska vijka.



Slika 32. Usporedba nominalnog sustrujanja treće grupe simulacija dobivenih finom mrežom

5.2. Verifikacija rezultata

U tablicama u ovom potpoglavlju dani su rezutati postupaka verifikacije gustoće mreže za sve tri grupe numeričkih simulacija. Kao što je već i ranije navedeno, za provedbu postupka potrebna su minimalno tri rezultata te se stoga koriste rezultati dobiveni grubom, srednjom i finom mrežom uz *k-ω* SST model turbulencije. Numerička nesigurnost određena je za svaku vrijednost nominalnog sustrujanja po radijusu vijka te za koeficijente srednjeg nominalnog sustrujanja.

Tablica 5. Numerička nesigurnost mreže prve grupe numeričkih simulacija

r/R	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_{ext}^{21}	GCI_{fine}^{21}	GCI_{fine}^{21}, %
0,4	0,669	0,662	0,666	0,682	0,02373	2,373
0,5	0,674	0,670	0,671	0,676	0,00469	0,469
0,6	0,697	0,692	0,691	0,699	0,00398	0,398
0,7	0,698	0,688	0,690	0,701	0,00479	0,479
0,8	0,655	0,642	0,624	0,686	0,05915	5,915
0,9	0,547	0,533	0,526	0,563	0,03864	3,864
1	0,419	0,419	0,409	0,419	0,00006	0,006
1,2	0,289	0,295	0,295	0,288	0,00477	0,477
$\overline{w}_N$	0,641	0,632	0,629	0,647	0,01180	1,180

Tablica 6. Numerička nesigurnost mreže druge grupe numeričkih simulacija

r/R	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_{ext}^{21}	GCI_{fine}^{21}	GCI_{fine}^{21}, %
0,4	0,656	0,655	0,670	0,656	0,00004	0,004
0,5	0,661	0,664	0,674	0,659	0,00299	0,299
0,6	0,680	0,688	0,691	0,674	0,01044	1,044
0,7	0,676	0,688	0,690	0,675	0,00216	0,216
0,8	0,636	0,658	0,644	0,595	0,07998	7,998
0,9	0,536	0,540	0,527	0,535	0,00246	0,246
1	0,427	0,430	0,422	0,425	0,00615	0,615
1,2	0,290	0,293	0,294	0,289	0,00459	0,459
$\overline{w}_N$	0,627	0,634	0,632	0,624	0,00613	0,613

Tablica 7. Numerička nesigurnost mreže treće grupe numeričkih simulacija

r/R	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_{ext}^{21}	GCI_{fine}^{21}	GCI_{fine}^{21}, %
0,4	0,647	0,646	0,657	0,647	0,00031	0,031
0,5	0,663	0,668	0,661	0,653	0,01998	1,998
0,6	0,680	0,682	0,683	0,677	0,00404	0,404
0,7	0,677	0,676	0,684	0,677	0,00027	0,027
0,8	0,631	0,635	0,642	0,626	0,01033	1,033
0,9	0,526	0,550	0,542	0,515	0,02632	2,632
1	0,415	0,421	0,422	0,414	0,00516	0,516
1,2	0,287	0,285	0,289	0,290	0,01072	1,072
$\overline{w}_N$	0,624	0,627	0,631	0,594	0,05849	5,849

U tablicama 5. - 7. dani su rezultati proračuna numeričke nesigurnosti primjenom metode indeksa konvergencije mreže. Moguće je uočiti kako je numerička nesigurnost određivanja nominalnog sustrujanja po radijusu vijka, kao i srednjeg nominalnog sustrujanja po disku vijka $\overline{w}_N$, uglavnom ispod 3%, s najvećom vrijednosti od 8% dobivenoj na radijusu r/R=0,8 u drugoj grupi numeričkih simulacija.

5.3. Validacija rezultata

U tablicama 8. - 11. je dan pregled rezultata dostupnih u literaturi [28] te rezultata dobivenih numeričkim simulacijama. Unutar ovih tablica predstavljene su vrijednosti koeficijenata nominalnog sustrujanja po radijusu vijka w_N te vrijednosti srednjeg nominalnog koeficijenta sustrujanja po disku vijka $\overline{w}_N$.

Tablica 8. Koeficijent nominalnog sustrujanja po radijusu vijka dobiven eksperimentom [28]

r/R	$w_{N,EKS}$
0,4	0,601
0,5	0,634
0,6	0,681
0,7	0,691
0,8	0,663
0,9	0,598
1	0,486
1,2	0,282
$\overline{w}_{N,EKS}$	0,548

Tablica 9. Koeficijent nominalnog sustrujanja za prvu grupu numeričkih simulacija

	Gruba mreža (k-ω SST)		Srednja mreža (k-ω SST)		Fina mreža (k-ω SST)		Fina mreža (k-ε)	
r/R	$w_{N,RDF}$	RD, %	$w_{N,RDF}$	RD, %	$w_{N,RDF}$	RD, %	$w_{N,RDF}$	RD, %
0,4	0,666	10,851	0,662	10,112	0,669	11,291	0,683	13,721
0,5	0,671	5,837	0,670	5,612	0,674	6,295	0,688	8,537
0,6	0,691	1,484	0,692	1,642	0,697	2,335	0,716	5,127
0,7	0,690	-0,197	0,688	-0,405	0,698	0,993	0,710	2,782
0,8	0,624	-5,826	0,642	-3,215	0,655	-1,278	0,651	-1,802
0,9	0,526	-12,007	0,533	-10,906	0,547	-8,592	0,539	-9,865
1	0,409	-15,893	0,419	-13,740	0,419	-13,830	0,423	-12,868
1,2	0,295	4,524	0,295	4,434	0,289	2,441	0,297	5,459
$\overline{w}_{N,RDF}$	0,608	11,643	0,614	12,569	0,624	14,574	0,63	15,583

Tablica 10. Koeficijent nominalnog sustrujanja za drugu grupu numeričkih simulacija

	Gruba mreža (k-ω SST)		Srednja mreža (k-ω SST)		Fina mreža (k-ω SST)		Fina mreža (k-ε)	
r/R	$w_{N,RDF}$	RD, %	$w_{N,RDF}$	RD, %	$w_{N,RDF}$	RD, %	$w_{N,RDF}$	RD, %
0,4	0,670	11,538	0,655	9,050	0,656	9,142	0,669	11,302
0,5	0,674	6,248	0,664	4,725	0,661	4,223	0,673	6,218
0,6	0,691	1,506	0,688	0,989	0,680	-0,184	0,703	3,230
0,7	0,690	-0,201	0,688	-0,432	0,676	-2,155	0,702	1,586
0,8	0,644	-2,936	0,658	-0,769	0,636	-4,084	0,649	-2,095
0,9	0,527	-11,835	0,540	-9,766	0,536	-10,288	0,545	-8,823
1	0,422	-13,068	0,430	-11,591	0,427	-12,201	0,438	-9,914
1,2	0,294	4,309	0,293	3,987	0,290	2,819	0,295	4,469
$\overline{w}_{N,RDF}$	0,612	12,274	0,616	13,037	0,610	11,842	0,625	14,658

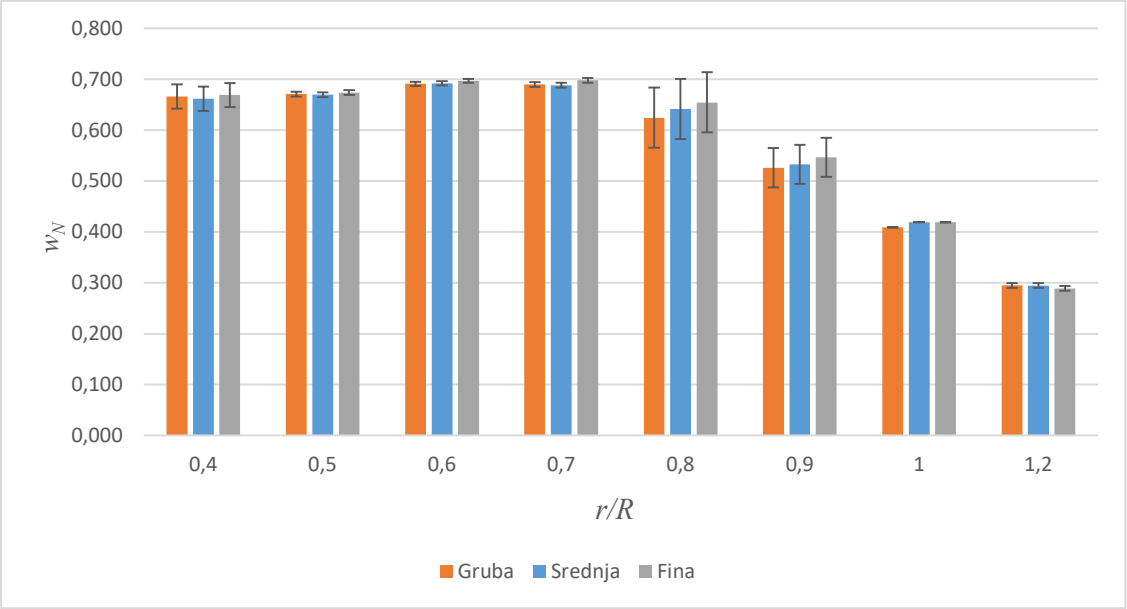
Tablica 11. Koeficijent nominalnog sustrujanja za treću grupu numeričkih simulacija

	Gruba mreža (k-ω SST)		Srednja mreža (k-ω SST)		Fina mreža (k-ω SST)		Fina mreža (k-ε)	
r/R	$w_{N,RDF}$	RD, %	$w_{N,RDF}$	RD, %	$w_{N,RDF}$	RD, %	$w_{N,RDF}$	RD, %
0,4	0,657	9,307	0,646	7,419	0,647	7,629	0,661	9,916
0,5	0,661	4,311	0,668	5,318	0,663	4,612	0,684	7,875
0,6	0,683	0,260	0,682	0,094	0,680	-0,220	0,710	4,220
0,7	0,684	-0,989	0,676	-2,186	0,677	-2,037	0,706	2,214
0,8	0,642	-3,139	0,635	-4,215	0,631	-4,816	0,652	-1,641
0,9	0,542	-9,366	0,550	-8,024	0,526	-12,065	0,542	-9,400
1	0,422	-13,171	0,421	-13,473	0,415	-14,551	0,431	-11,316
1,2	0,289	2,607	0,285	1,020	0,287	1,836	0,292	3,415
$\overline{w}_{N,RDF}$	0,614	12,587	0,610	11,919	0,604	10,779	0,625	14,710

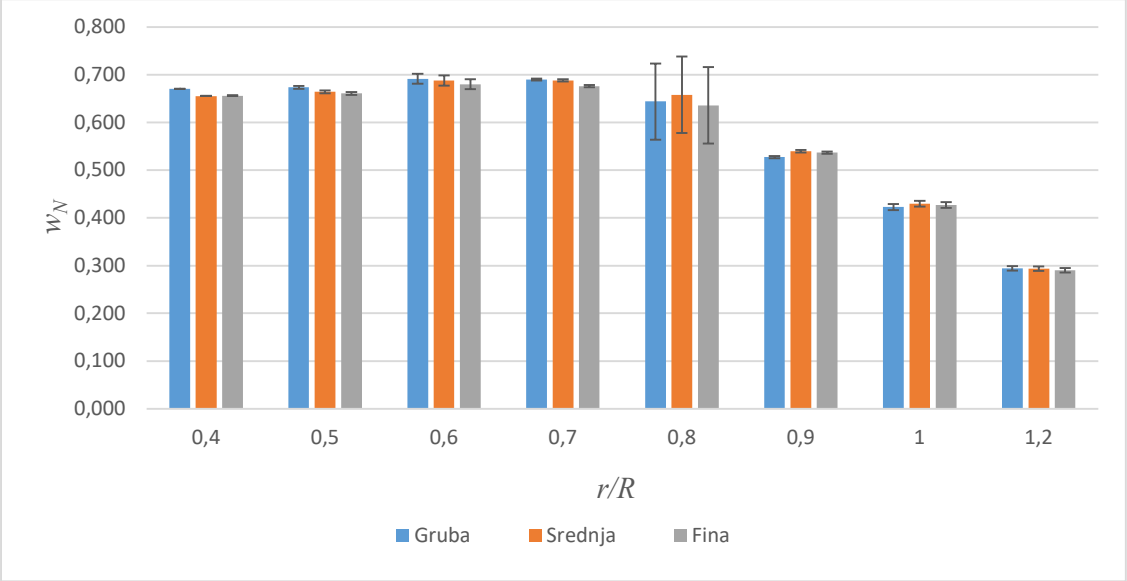
Iz tablica 9. - 11. moguće je uočiti zadovoljavajuće slaganje numeričkih i eksperimentalnih rezultata. Tako je odstupanje rezultata uglavnom ispod 10% na svim radijusima, a prouzrokovano je kvalitetom geometrijske mreže. Temeljem dobivenih rezultata moguće je izvući određene zaključke. Tako je numerička simulacija s udvojenim modelom u pravilu pogodnija za određivanje koeficijenta nominalnog sustrujanja, a profinjavanjem mreže rezultati postaju točniji. Također je uočljivo kako su rezultati numeričkih simulacija s *k-ω* SST modelom turbulencije točniji od onih s *k-ε* modelom turbulencije, što je u skladu s rezultatima prikazanim u literaturi [5].

5.4. Analiza strujanja oko modela broda

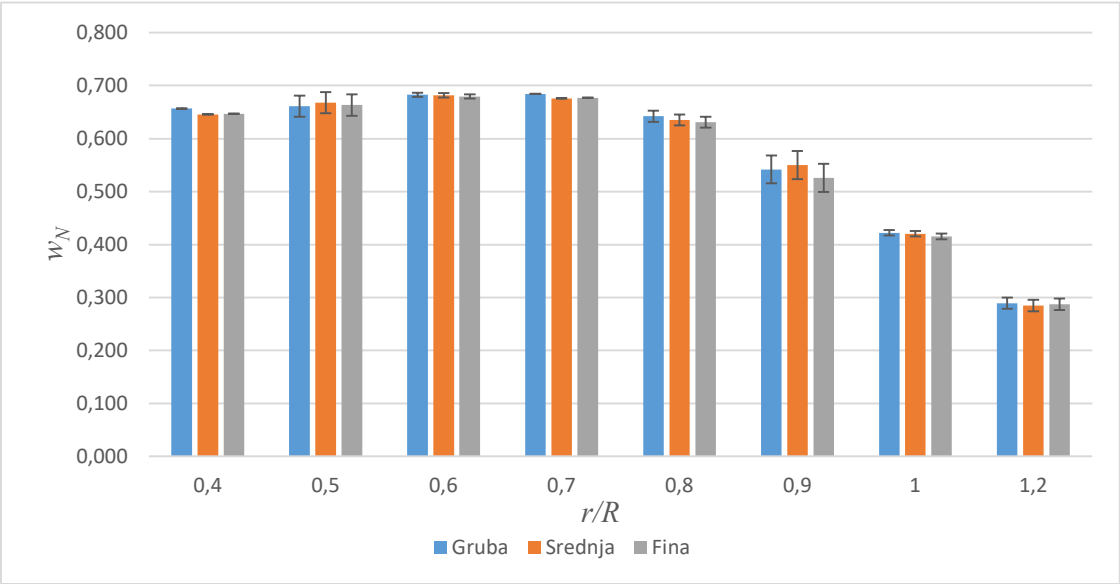
Na slikama 33. - 35. je prikazana ovisnost koeficijenta nominalnog sustrujanja o radijusu vijka te raspon numeričke nesigurnosti u određivanju nominalnog sustrujanja. Na slikama su prikazani rezultati svih triju mreža s *k-ω* SST modelom turbulencije svake grupe simulacija. Moguće je uočiti kako je na presjecima *r/R*=0,8 i *r/R*=0,9 dobivena nešto veća numerička nesigurnost, dok je na ostalim presjecima nesigurnost znatno manja.



Slika 33. Raspon numeričke nesigurnosti prve grupe numeričkih simulacija

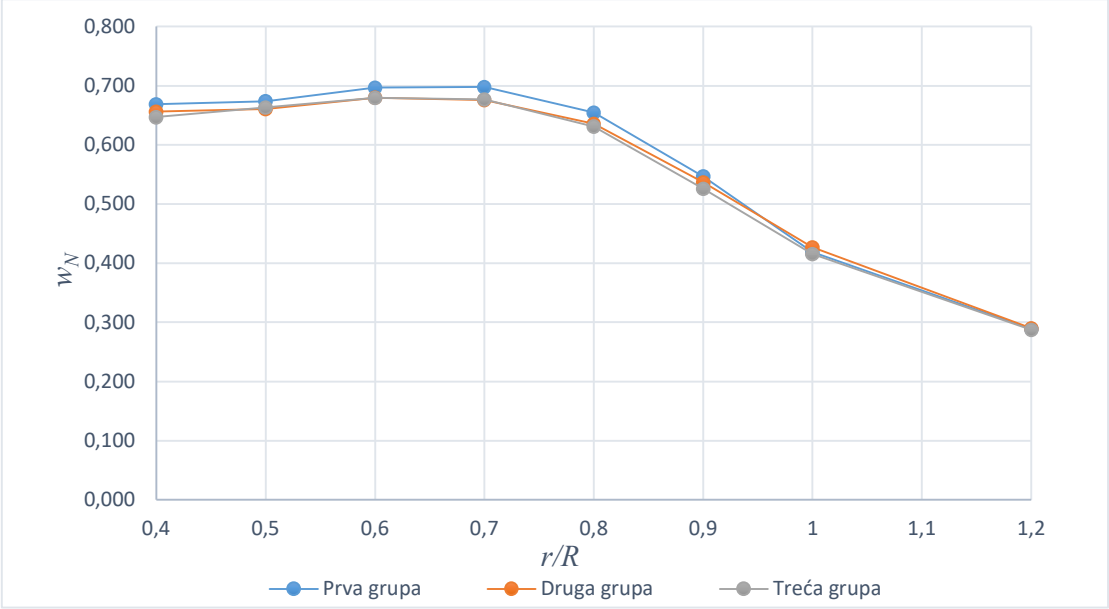


Slika 34. Raspon numeričke nesigurnosti druge grupe numeričkih simulacija



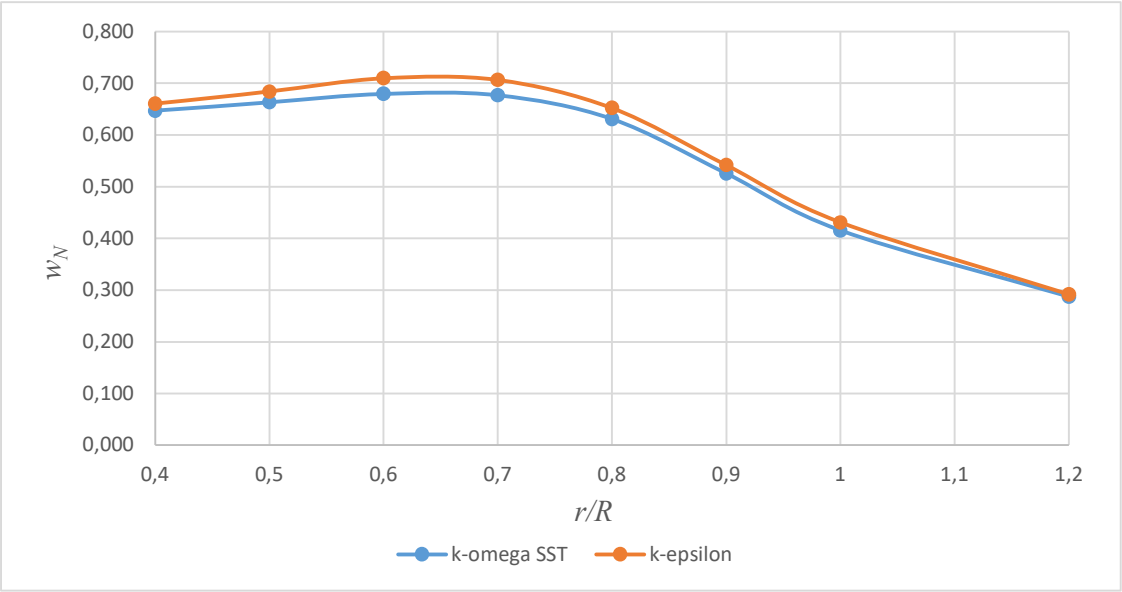
Slika 35. Raspon numeričke nesigurnosti treće grupe numeričkih simulacija

Na slici 36. prikazana je ovisnost koeficijenta nominalnog sustrujanja po radijusu vijka s rezultatima dobivenima finom mrežom uz *k-ω* SST model turbulencije za svaku grupu simulacija. Moguće je uočiti kako su iznosi koeficijenta nominalnog sustrujanja nešto viši za simulacije uz prisutnost slobodne površine u odnosu na numeričke simulacije s udvojenim modelom. Rezultati druge i treće grupe simulacija gotovo su identični, uz zanemarive razlike.



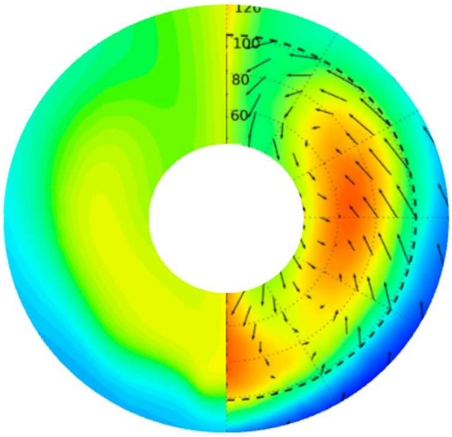
Slika 36. Koeficijent nominalnog sustrujanja za fine mreže uz *k-ω* SST model turbulencije

Na slici 37. je prikazana ovisnost koeficijenta nominalnog sustrujanja po radijusu vijka s rezultatima dobivenima finom mrežom uz primjenu *k-ω* SST modela turbulencije te uz primjenu *k-ε* modela turbulencije za treću grupu simulacija. Moguće je zaključiti kako su iznosi koeficijenta nominalnog sustrujanja po radijusu vijka manji primjenom *k-ω* SST modela turbulencije, u odnosu na rezultate dobivene primjenom *k-ε* modela turbulencije.



Slika 37. Koeficijent nominalnog sustrujanja za fine mreže iz treće grupe simulacija

Slika 38. prikazuje usporedbu polja nominalnog sustrujanja dobivenog numeričkim simulacijama uz primjenu fine mreže s *k-ω* SST modelom turbulencije u sklopu treće grupe simulacija (lijeva polovica) i polja nominalnog sustrujanja dobivenog eksperimentalnim istraživanjem (desna polovica).



Slika 38. Usporedba polja nominalnog sustrujanja

Moguće je uočiti kako je numeričkim simulacijama dobiveno gotovo identično polje sustrujanja kao i eksperimentalnim istraživanjem.

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu provedene su numeričke simulacije viskoznog strujanja oko modela broda za rasuti teret primjenom programskog paketa STAR-CCM+. Dan je pregled literature u području brodske hidrodinamike s naglaskom na određivanje nominalnog sustrujanja, kao i teorijska osnova sustrujanja koje se pojavljuje prilikom gibanja broda. Prikazan je matematički model temeljen na Reynoldsovim osrednjenim Navier-Stokesovim jednadžbama, koji je primijenjen za određivanje nominalnog sustrujanja. Provedene su tri grupe numeričkih simulacija: numeričke simulacije s modelom broda uz prisustvo slobodne površine, numeričke simulacije s udvojenim modelom te numeričke simulacije s udvojenim modelom uz dodatno profinjenje geometrijske mreže. Određeni su koeficijenti nominalnog sustrujanja po radijusu vijka te koeficijent srednjeg nominalnog sustrujanja po disku vijka. Numerička nesigurnost pri određivanju nominalnog sustrujanja proračunata je metodom indeksa konvergencije mreže te uglavnom iznosi ispod 3%. Provedena je usporedba dobivenih rezultata s eksperimentalnim rezultatima dostupnim u literaturi. Pokazano je da su rezultati dobiveni numeričkim simulacijama zadovoljavajući, uz određeno odstupanje od eksperimentalnih rezultata koje uglavnom iznosi ispod 10%. Pokazano je da se primjenom udvojenog modela postižu zadovoljavajući rezultati, što se može objasniti činjenicom da je sustrujanje valova kod ispitanog modela pri maloj brzini zanemarivo. Također, pokazano je kako se daljnjim profinjavanjem mreže točnost povećava, ali time se trajanje numeričkih simulacija produljuje. Usporedbom numeričkih rezultata dobivenih finom mrežom s k-ω SST i k-ε modelima turbulencije je pokazano kako k-ω SST model turbulencije daje točnije rezultate.

U daljnjim istraživanjima od velike važnosti bilo bi ispitati kako dodatno profinjavanje geometrijske mreže utječe na rezultate numeričkih simulacija. Također, kako je u literaturi pokazano da je utjecaj mjerila na polje nominalnog sustrujanja značajan, bilo bi važno provesti numeričke simulacije viskoznog strujanja oko broda u naravi te istražiti utjecaj mjerila.

LITERATURA

[1] Farkas, A., Degiuli, N., Martić, I.: *Impact of biofilm on the resistance characteristics and nominal wake*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2020., 234(1), 59-75.

[2] Farkas, A., Song, S., Degiuli, N., Martić, I., Demirel, Y. K.: *Impact of biofilm on the ship propulsion characterstics and the speed reduction*, Ocean Engineering, 2020., 199, 107033.

[3] Bakica, A., Vladimir, N., Gattin, I., Jasak, H.: *CFD simulation of loadings on circular duct in calm water and waves*, Ships and Offshore Structures, 2020., 15(sup1), S110-S122.

[4] Wang, Z. Z., Xiong, Y., Wang, R., Shen, X. R., Zhong, C. H.: *Numerical study on scale effect of nomminal wake of single screw ship*, Ocean Engineering, 2015., 104, 437-451.

[5] Farkas, A., Degiuli, N., Martić, I., Dejhalla, R.: *Numerical and experimental assessment of nominal wake for a bulk carrier*, Journal of Marine Science and Technology, 2019., 24(4), 1092-1104.

[6] Mikkelsen, H., Shao, Y., Walther, J. H.: *Numerical study of nominal wake fields of a container ship in oblique regular waves*, Applied Ocean Research, 2022., 102968.

[7] Li, X., Dong, J., Sun, S.: *Numerical simulation and analysis of nominal wake of displacement ship*, In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1834, No. 1, p. 012018), 2021., IOP Publishing.

[8] Gaggero, S., Villa, D., Viviani, M.: *An extensive analysis of numerical ship self-propulsion prediction via a coupled BEM/RANS approach*, Applied Ocean Research, 2017., 66, 55-78.

[9] Guo, C., Wu, T., Zhang, Q., Luo, W., Su, Y.: *Numerical simulation and experimental studies on aft hull local parametrized non-geosim deformation for correcting scale effects of nominal wake field*, Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike, 2017., 68(1), 77-96.

[10] Choi, J. E., Min, K. S., Kim, J. H., Lee, S. B., Seo, H. W.: *Resistance and propulsion characteristics of various commercial ships based on CFD results*, Ocean Engineering, 2010., 37(7), 549-566.

[11] Wu, P.C., Okawa, H., Kim, H., Akamatsu, K., Sadat-Hosseini, H., *Stern, F., Toda, Y.: Added resistance and nominal wake in waves of KVLCC2 model ship in ballast condition*, In 30th Symposium on Naval Hydrodynamics, 2014., pp. 2-7.

[12] Guo, B. J., Deng, G. B., Steen, S.: *Verification and validation of numerical calculation of ship resistance and flow field of a large tanker*, Ships and Offshore Structures, 2013., 8(1), 3-14.

[13] Pereira, F. S., Eça, L., Vaz, G.: *Verification and Validation exercises for the flow around the KVLCC2 tanker at model and full-scale Reynolds numbers*, Ocean Engineering, 2017., 129, 133-148.

[14] Kornev, N., Taranov, A., Shchukin, E., Kleinsorge, L.: *Development of hybrid URANS-LES methods for flow simulation in the ship stern area*, Ocean Engineering, 2011., 38(16), 1831-1838.

[15] Lin, T. Y., Kouh, J. S.: *On the scale effect of trust deduction in a judicious self-propulsion procedure for a moderate-speed containership*, Journal of Marine Science and Technology, 2015., 20(2), 373-391.

[16] Sánchez-Caja, A., Martio, J., Saisto, I., Siikonen, T.: *On the enhancement of coupling potential flow models to RANS solvers for the prediction of propeller effective wakes*, Journal of Marine Science and Technology, 2015., 20(1), 104-117.

[17] Degiuli, N.: *Otpor i propulzija broda*, podloge za nastavu, https://e-ucenje.fsb.hr/course/view.php?id=857.

[18] Harvald, S. A.: *Resistance and propulsion of ships*, A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1983.

[19] Gamulin, A.: *Otpor i propulzija broda*, skripta, Brodarski institut, Zagreb, 1998.

[20] Džijan, I., Virag, Z.: *Računalna dinamika fluida*, skripta - predavanja, FSB, Zagreb 2014.

[21] Degiuli, N., Werner, A.: *Mehanika fluida IIB*, podloge za nastavu, https://e-ucenje.fsb.hr/course/view.php?id=861.

[22] Scott-Pomerantz, C. D.: *The k-epsilon model in the theory of turbulence*, Doctoral dissertation, University of Pittsburgh, 2004.

[23] Hino, T., Stern, F., Larsson, L., Visonneau, M., Hirata, N., Kim, J. (Eds.): *Numerical Ship Hydrodynamics: An Assessement of the Tokyo 2015 Workshop*, Springer Nature, 2020., Vol. 94.

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

[25] Ferziger, J. H., Perić, M., Street, R. L.: *Computatational Methods for Fluid Dynamics*, Berlin: springer, 2002., Vol. 3, pp. 196-200.

[26] STAR-CCM+, User guide.

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

[28] Tokyo 2015: *A Workshop on CFD in ship Hydrodynamics*, https://t2015.nmri.go.jp/jbc.html.

[29] Perić, M.: *Set-Up Recommendations for Simulation of Flow Around Ships*, interna komunikacija, 2016.

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

[31] Deng, R., Huang, D. B., Zhou, G. L., Sun, H. W.: *Investigation on Some Factors Effecting Ship Resistance Calculation with CFD Code FLUENT*, Journal of Ship Mechanics, 2013., 17(6), 616-624.

PRILOZI

I. CD-R disc