

Numerička simulacija pokusa vlastitog pogona kontejnerskog broda

Pribanić, Dominik

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:549587>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-10**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Dominik Pribanić

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

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

Student:

Dominik Pribanić

Zagreb, 2020.

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

Posebno se zahvaljujem svojoj mentorici prof. dr. sc. Nastii Degiuli, dipl. ing., kao i Andrei Farkasu, mag. ing. nav. arch., te Ivani Martić, mag. ing. nav. arch., na stručnom vodstvu, velikom strpljenju, danim savjetima, pristupačnosti i utrošenom vremenu tijekom izrade ovog rada i tokom cijelog studija.

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

Dominik Pribanić



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



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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Dominik Pribanić** Mat. br.: 0035201588

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Numerička simulacija pokusa vlastitoga pogona kontejnerskoga broda**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Numerical simulation of self-propulsion test for containership**

Opis zadatka:

Poznavanje hidrodinamičkih značajki i interakcije trupa broda i brodske vijka prilikom rada brodske vijka iza trupa broda predstavlja vrlo važan element u procesu projektiranja broda. Za određivanje hidrodinamičkih značajki trupa broda i brodske vijka danas se najčešće provode pokusi s modelima brodova i brodskih vijaka u bazenima za modelska ispitivanja koji su vrlo skupi i dugotrajni. Kako bi se odredile hidrodinamičke značajke broda u naravi, dobivene eksperimentalne vrijednosti potrebno je ekstrapolirati određenom metodom ekstrapolacije. Numeričke simulacije primjenom računalne dinamike fluida omogućuju određivanje hidrodinamičkih značajki broda u naravi, kao i uvid u strujanje oko trupa broda i brodske vijka te njihovu interakciju. Na taj način moguće je procijeniti potrebnu snagu motora, potrošnju goriva kao i emisiju štetnih plinova.

U diplomskom radu potrebno je, primjenom programskog paketa za računalnu dinamiku fluida, numerički simulirati pokus vlastitoga pogona kontejnerskoga broda u naravi.

U radu je potrebno:

1. Dati pregled literature vezane za numeričke simulacije pokusa vlastitoga pogona.
2. Dati matematičku osnovu numeričkih simulacija viskoznoga strujanja fluida.
3. Pripremiti proračunsku mrežu, početne i rubne uvjete potrebne za numeričku simulaciju viskoznoga strujanja fluida.
4. Opisati računalni model za numeričku simulaciju pokusa vlastitoga pogona.
5. Izvršiti numeričku simulaciju pokusa vlastitoga pogona za kontejnerski brod primjenom programskoga paketa za računalnu dinamiku fluida.
6. Usporediti numerički dobivene rezultate hidrodinamičkih značajki s ekstrapoliranim eksperimentalnim rezultatima.

Rezultate proračuna prikazati odgovarajućim tablicama, dijagramima i slikama.

U radu koristiti programski paket STAR-CCM+.

U radu treba navesti literaturu i eventualno dobivenu pomoć tijekom izrade.

Zadatak zadan:

24. rujna 2020.

Datum predaje rada:

26. studenoga 2020.

Predviđeni datumi obrane:

30.11. – 4.12.2020.

Zadatak zadao:

Nastja Degiuli
Prof. dr. sc. Nastja Degiuli

Predsjednica Povjerenstva:

Nastja Degiuli
Prof. dr. sc. Nastja Degiuli

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. UVOD.....	1
1.1. Pregled literature	2
2. MODELSKA ISPITIVANJA	5
2.1. Pokus otpora broda.....	5
2.2. Pokus slobodne vožnje vijka.....	5
2.3. Pokus vlastitog pogona	7
2.3.1. Kontinentalna metoda	8
2.3.2. Britanska metoda	9
2.3.3. Rezultati pokusa vlastitog pogona	10
2.4. Ekstrapolacija rezultata modelskih ispitivanja.....	11
3. RAČUNALNA DINAMIKA FLUIDA	13
3.1. Općenito	13
3.2. Matematički model	13
3.3. Osnovne jednadžbe dinamike fluida	15
3.4. Reynoldsove osrednjene Navier – Stokesove jednadžbe	16
3.5. Modeli turbulencije	18
3.5.1. Realizable k - ϵ model turbulencije.....	19
3.5.2. k - ω SST model turbulencije.....	19
3.6. Zidne funkcije	20
3.7. Numeričke metode	22
3.8. Metoda konačnih volumena	23
3.9. Metoda udjela fluida u volumenu	24
3.10. Metoda višestrukih referentnih koordinatnih sustava	25
3.11. Metoda virtualnog diska.....	26
3.12. „Body force“ metoda	26
3.13. Verifikacija rezultata.....	27
3.13.1. Monotona konvergencija	28
3.13.2. Oscilatorna konvergencija.....	28
3.13.3. Divergencija	28
3.14. Validacija rezultata	28
4. PRIPREMA NUMERIČKIH SIMULACIJA	29
4.1. Numeričke simulacije pokusa slobodne vožnje vijka	29
4.1.1. Ulaz u STAR-CCM+	29
4.1.2. Kreiranje domene	30
4.1.3. Rubni uvjeti.....	31

4.1.4.	Diskretizacija geometrijske mreže	32
4.1.5.	Unos fizikalnog modela	35
4.1.6.	Postavljanje parametara rješavača	35
4.2.	Numeričke simulacije pokusa otpora	36
4.2.1.	Ulaz u STAR-CCM+	36
4.2.2.	Kreiranje domene	37
4.2.3.	Rubni uvjeti	38
4.2.4.	Diskretizacija geometrijske mreže	39
4.2.5.	Unos fizikalnog modela	45
4.2.6.	Postavljanje parametara rješavača	46
4.3.	Numeričke simulacije pokusa vlastitog pogona	47
4.3.1.	Ulaz u STAR-CCM+	47
4.3.2.	Kreiranje domene	47
4.3.3.	Rubni uvjeti	48
4.3.4.	Diskretizacija geometrijske mreže	48
4.3.5.	Unos fizikalnog modela	50
4.3.6.	Postavljanje parametara rješavača	51
5.	REZULTATI	52
5.1.	Rezultati numeričkih simulacija pokusa slobodne vožnje vijka	52
5.2.	Rezultati numeričkih simulacija pokusa otpora	59
5.3.	Rezultati numeričkih simulacija pokusa vlastitog pogona	65
6.	ZAKLJUČAK	70
	LITERATURA	72

POPIS SLIKA

Slika 1.	Pokus otpora broda [24]	5
Slika 2.	Pokus slobodne vožnje vijka [25]	6
Slika 3.	Pokus vlastitog pogona [27]	7
Slika 4.	Kontinentalna metoda vlastitog pogona	9
Slika 5.	Britanska metoda vlastitog pogona	9
Slika 6.	Razvoj turbulentnog graničnog sloja [31]	20
Slika 7.	Profil brzine u turbulentnom graničnom sloju [30]	21
Slika 8.	Prikaz diskretizacije dijela područja proračuna [30]	23
Slika 9.	Prikaz dvofaznog fluida u konačnom volumenu [30]	24
Slika 10.	Model vijka DTC broda	30
Slika 11.	Dimenzije domene numeričkih simulacija pokusa slobodne vožnje vijka.....	30
Slika 12.	Rubni uvjeti u numeričkim simulacijama pokusa slobodne vožnje vijka.....	31
Slika 13.	Presjek geometrijske mreže numeričkih simulacija pokusa slobodne vožnje vijka na $z = 0$ m	33
Slika 14.	Presjek geometrijske mreže numeričkih simulacija pokusa slobodne vožnje vijka na $x = 1,5$ m	33
Slika 15.	Volumetrijska kontrola oko broskog vijka	34
Slika 16.	Odabran fizikalni model za pokus slobodne vožnje.....	35
Slika 17.	DTC model broda	36
Slika 18.	Nacrt rebara DTC broda [33]	37
Slika 19.	Dimenzije domene numeričkih simulacija pokusa otpora	37
Slika 20.	Rubni uvjeti u numeričkim simulacijama pokusa otpora	38
Slika 21.	Volumetrijske kontrole na pramcu broda	40
Slika 22.	Volumetrijske kontrole na slobodnoj površini	40
Slika 23.	Volumetrijske kontrole oko trupa broda	41
Slika 24.	Volumetrijske kontrole za obuhvaćanje Kelvinovog kuta	42
Slika 25.	Diskretizacija graničnog sloja na trupu broda dobivena primjenom fine geometrijske mreže.....	43
Slika 26.	Presjek grube geometrijske mreže na $z = 0$ m.....	43
Slika 27.	Presjek srednje geometrijske mreže na $z = 0$ m	44
Slika 28.	Presjek fine geometrijske mreže na $z = 0$ m	44
Slika 29.	Odabran fizikalni model pokusa otpora.....	45
Slika 30.	Dimenzije domene numeričkih simulacija pokusa vlastitog pogona	47
Slika 31.	Rubni uvjeti u numeričkim simulacijama pokusa vlastitog pogona.....	48
Slika 32.	Volumetrijska kontrola u području oko broskog vijka.....	48
Slika 33.	Volumetrijske kontrole za numeričke simulacije pokusa vlastitog pogona.....	49
Slika 34.	Presjek geometrijske mreže na $z = 0$ m	50
Slika 35.	Odabran fizikalni model pokusa vlastitog pogona	50
Slika 36.	Model virtualnog diska.....	51
Slika 37.	Prikaz strujnica uslijed nastrojavanja fluida na broski vijak pri numeričkoj simulaciji pokusa slobodne vožnje.....	52
Slika 38.	Vrijednost tangencijalnog naprezanja na tlačnoj (lijevo) i podtlačnoj (desno) strani broskog vijka	53
Slika 39.	Vrijednost tlaka na tlačnoj (lijevo) i podtlačnoj (desno) strani broskog vijka	53
Slika 40.	Vrijednost parametra y^+ na tlačnoj (lijevo) i podtlačnoj (desno) strani broskog vijka	54
Slika 41.	Dijagram slobodne vožnje vijka dobiven $k - \omega$ SST modelom turbulencije	55
Slika 42.	Usporedba dijagrama slobodne vožnje dobivenih RDF-om i eksperimentalno	55

Slika 43.	Prikaz slobodne površine dobivene numeričkim simulacijama pokusa otpora pri različitim vrijednostima Froudeovog broja	59
Slika 44.	Vrijednost parametra y^+ duž trupa broda pri različitim vrijednostima Froudeovog broja.....	60
Slika 45.	Vrijednost tangencijalnog naprežanje duž trupa broda pri različitim vrijednostima Froudeovog broja	60
Slika 46.	Prikaz strujnica na slobodnoj površini iza krme broda pri $Fn = 0,218$	61
Slika 47.	Prikaz strujnica na slobodnoj površini ispred pramca broda pri $Fn = 0,218$	61
Slika 48.	Slike valova dobivene numeričkim simulacijama pokusa otpora primjenom različitih modela turbulencije pri $Fn = 0,174$	62
Slika 49.	Slike valova dobivene numeričkim simulacijama pokusa otpora primjenom različitih modela turbulencije pri $Fn = 0,218$	62
Slika 50.	Slobodna površina iza krme broda dobivena numeričkom simulacijom pokusa vlastitog pogona pri $Fn = 0,218$	65
Slika 51.	Aksijalna komponenta brzine ispred virtualnog diska pri $Fn = 0,218$	65
Slika 52.	Slike valova dobivene numeričkim simulacijama pokusa vlastitog pogona pri različitim vrijednostima Froudeovog broja	66

POPIS TABLICA

Tablica 1. Glavne značajke broskog vijka.....	29
Tablica 2. Postavke diskretizacije numeričkih simulacija pokusa slobodne vožnje vijka	32
Tablica 3. Broj ćelija u statičkom i rotirajućem dijelu domene	34
Tablica 4. Glavne značajke DTC broda	36
Tablica 5. Postavke diskretizacije numeričkih simulacija pokusa otpora za finu mrežu	39
Tablica 6. Osnovna veličina ćelija za tri mreže različitih gustoća	39
Tablica 7. Broj ćelija koristeći različite gustoće mreža.....	44
Tablica 8. Odabrani vremenski koraci pri $Fn = 0,218$	46
Tablica 9. Validacija koeficijenta poriva	56
Tablica 10. Validacija koeficijenta momenta.....	57
Tablica 11. Validacija stupnja djelovanja vijka u slobodnoj vožnji.....	57
Tablica 12. Verifikacija rezultata za gustoću geometrijske mreže.....	63
Tablica 13. Verifikacija rezultata za veličinu vremenskog koraka	63
Tablica 14. Validacija ukupnog otpora broda	64
Tablica 15. Validacija točke vlastitog pogona pri $Fn = 0,174$	67
Tablica 16. Validacija točke vlastitog pogona pri $Fn = 0,218$	67
Tablica 17. Validacija komponenata propulzije pri $Fn = 0,174$	68
Tablica 18. Validacija komponenata propulzije pri $Fn = 0,218$	68

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
a_l	/	koeficijent modela turbulencije
A_E	m^2	raširena površina broskog vijka
A_0	m^2	površina diska broskog vijka
B	m	širina broda
C_A	/	korelacijski dodatak
C_{AAS}	/	koeficijent otpora zraka
C_B	/	koeficijent punoće
C_{FM}	/	koeficijent otpora trenja modela broda
C_{FS}	/	koeficijent otpora trenja broda
C_{TM}	/	koeficijent ukupnog otpora modela broda
C_{TS}	/	koeficijent ukupnog otpora broda
C_W	/	koeficijent otpora valova
C_μ	/	bezdimenzijski koeficijent turbulencije
d	m	udaljenost od stijenke
d	m	promjer glavine vijka
D	m	promjer broskog vijka
D_{ij}	s^{-1}	tenzor brzine deformacije
F_2	/	funkcija miješanja modela turbulencije
Fn	/	Froudeov broj
F_S	/	faktor sigurnosti
g	m/s^2	ubrzanje zemljine sile teže
J	/	koeficijent napredovanja vijka
J_T	/	koeficijent napredovanja vijka određen iz jednakosti poriva
k	/	faktor forme
\bar{k}	J/kg	specifična kinetička energija turbulencije
K_Q	/	koeficijent momenta
K_{QT}	/	koeficijent momenta određen iz jednakosti poriva
K_T	/	koeficijent poriva
l_t	m	duljina puta miješanja čestica
L_{PP}	m	duljina između okomica broda
L_{WL}	m	duljina broda na vodnoj liniji
n	s^{-1}	broj okretaja broskog vijka
n_M	s^{-1}	broj okretaja modela broskog vijka
p	Pa	tlak
\bar{p}	Pa	vremenski osrednjena vrijednost polja tlaka
p'	Pa	pulsirajuća komponenta tlaka
p_i	/	red točnosti

P	m	uspon vijka
P_D	W	snaga predana vijku
Q	Nm	moment na brodskom vijku
Q_M	Nm	moment na modelu brodskog vijka
r_k	m	radij vektor
R_i	/	omjer konvergencije
R_n	/	Reynoldsov broj
R_T	N	ukupni otpor broda
R_{TM}	N	ukupni otpor modela broda
RD	%	relativna devijacija
S	m ²	oplakana površina trupa broda
\hat{S}_i	N	vrijednost rezultata numeričke simulacije
S_L	N	donja vrijednost rezultata numeričke simulacije
S_U	N	gornja vrijednost rezultata numeričke simulacije
t	s	vrijeme
t	/	koeficijent upijanja
T	m	gaz
T	N	poriv brodskog vijka
T	s	vremenska skala turbulencije
T	s	period (vrijeme potrebno da čestica fluida prođe put jednak duljini broda)
T_M	N	poriv modela brodskog vijka
\bar{u}	m/s	komponenta brzine strujanja paralelno sa stijenkom
U_i	N	nesigurnost rješenja fizikalne veličine
\bar{U}_{SN}	%	ukupna nesigurnost simulacije
\bar{U}_T	%	nesigurnost vremenskog koraka
\bar{U}_G	%	nesigurnost geometrijske mreže
u_τ	m/s	brzina trenja
v	m/s	brzina
v_i	m/s	vektor brzine
\bar{v}_i	m/s	vremenski osrednjena vrijednost komponente polja brzine
v_i'	m/s	pulsirajuća komponenta brzine
v_i^R	m/s	brzina unutar relativnog koordinatnog sustava
v_i^I	m/s	brzina unutar inercijskog koordinatnog sustava
v_t	m/s	karakteristična brzina turbulentnih pulsacija
v_A	m/s	brzina napredovanja brodskog vijka
v_{AM}	m/s	brzina napredovanja modela brodskog vijka
V	čv	brzina broda
V_M	čv	brzina modela broda
w	/	koeficijent sustrujanja

w_T	/	koeficijent sustrujanja određen iz jednakosti poriva
w_{TS}	/	koeficijent sustrujanja određen iz jednakosti poriva za brod
y	m	udaljenost od stijenke
y^+	/	bezdimenzijska udaljenost od stijenke
Z	/	broj krila vijka
Z	N	vučna sila
α^*	/	koeficijent modela turbulencije
α_i	/	volumni udio pojedine faze fluida unutar kontrolnog volumena
Δ	t	istisnina
ΔC_F	/	dodatak za hrapavost
δ_{ij}	/	Kroneckerov simbol
$\delta_{RE_i}^{*(1)}$	/	prvi korak greške uslijed analize konvergencije
ε	m^2s^{-3}	brzina disipacije kinetičke energije turbulencije
$\bar{\varepsilon}$	m^2s^{-3}	osrednjena vrijednost brzine disipacije kinetičke energije turbulencije
ε_i	N	razlika rezultata dobivenih numeričkim simulacijama
η_D	/	koeficijent korisnosti kvazi-propulzije
η_H	/	stupanj utjecaja trupa
η_O	/	stupanj djelovanja broskog vijka u slobodnoj vožnji
η_R	/	koeficijent prijelaza
κ	/	Von Karmanova konstanta
μ	Pas	dinamički koeficijent viskoznosti
μ_T	Pas	dinamički koeficijent turbulentne viskoznosti
ν	m^2/s	kinematički koeficijent viskoznosti
ρ	kg/m^3	gustoća fluida
Σ_{ij}	N/m^2	devijatorski dio tenzora naprezanja
σ_{ij}	N/m^2	tenzor naprezanja
τ	N/m^2	tangencijalno naprezanje
$\bar{\tau}_{ij}$	N/m^2	osrednjeni tenzor naprezanja
$\varphi, EKSP$	/	fizikalna veličina dobivena eksperimentalno
φ, RDF	/	fizikalna veličina dobivena numeričkom simulacijom
ω	s^{-1}	kutna brzina
Ω_i	s^{-1}	vektor kutne brzine

SAŽETAK

U ovom radu provedene su numeričke simulacije pokusa otpora broda, pokusa slobodne vožnje broskog vijka te pokusa vlastitog pogona primjenom računalne dinamike fluida (RDF) koristeći komercijalni programski paket STAR-CCM+. Numeričke simulacije provedene su za DTC (Duisburg Test Case) brod i brodski vijak u naravi. Generirana je proračunska domena te je provedena diskretizacija primjenom konačnih volumena. Postavljeni su rubni uvjeti te fizikalne postavke numeričkih simulacija. Nestacionarno strujanje viskoznog fluida modelirano je Reynoldsovim osrednjenim Navier-Stokesovim (RANS) jednadžbama uz primjenu realizable $k - \varepsilon$ i $k - \omega$ SST modela turbulencije. Slobodna površina opisana je primjenom metode udjela fluida u volumenu (eng. *Volume of Fluid*, VOF). Numeričke simulacije pokusa vlastitog pogona provedene su primjenom „Virtual disk“ i „Body force“ metoda, a pokusa slobodne vožnje primjenom metode višestrukih referentnih koordinatnih sustava (eng. *Moving Reference Frame*, MRF). U numeričkim simulacijama uz stijenku broda i broskog vijka primijenjene su zidne funkcije. Verifikacija je provedena za numeričku simulaciju pokusa otpora pri čemu je analizirana gustoća geometrijske mreže i veličina vremenskog koraka. Dobiveni rezultati numeričkih simulacija pokusa otpora, pokusa slobodne vožnje i pokusa vlastitog pogona validirani su eksperimentalnim rezultatima dostupnim u literaturi ekstrapoliranim na brod u naravi. Pokazano je da se numeričkim simulacijama može ostvariti zadovoljavajuća točnost.

Ključne riječi: računalna dinamika fluida (RDF), pokus otpora, pokus slobodne vožnje, pokus vlastitog pogona, RANS, realizable $k - \varepsilon$, $k - \omega$ SST

SUMMARY

In this thesis numerical simulations of resistance, open water and self-propulsion test are carried out using computational fluid dynamics (CFD) with the commercial software package STAR-CCM+. Numerical simulations are carried out for the full-scale DTC (Duisburg Test Case) ship and the propeller. Within the software package, computational domain is generated and its discretization is performed using finite volume method. The boundary conditions and physical settings of numerical simulations are set. The unsteady flow of viscous fluid is modeled using the Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) equations utilizing realizable $k - \varepsilon$ and $k - \omega$ SST turbulence models. The free surface is described using the Volume of Fluid (VOF) method. Numerical simulations of the self-propulsion test are performed using the Virtual disk and Body force methods, while the numerical simulations of the open water test are performed using the Moving Reference Frame (MRF) method. In the numerical simulations wall functions are applied along the wall of the ship and the propeller. The verification study is performed for the numerical simulations of the resistance test where the grid size and the time step are analyzed. The obtained results of the numerical simulations of resistance, open water and self-propulsion tests are validated with the experimental results available in the literature extrapolated to full-scale ship. It has been shown that satisfactory accuracy can be achieved by numerical simulations.

Key words: computational fluid dynamics (CFD), resistance test, open water test, self-propulsion test, RANS, realizable $k - \varepsilon$, $k - \omega$ SST

1. UVOD

Prilikom projektiranja broda potrebno je poznavati njegove hidrodinamičke značajke. Uobičajeni način njihovog određivanja u prošlosti bio je eksperimentalnim putem, odnosno ispitivanjem modela broda u bazenu. Eksperimentalnim metodama se uglavnom dobiva ograničeni broj informacija o nekoj pojavi, ali se zato ponavljanjem eksperimenta za različite kombinacije utjecajnih parametra može dobiti potpuniji uvid u pojavu. Računalna dinamika fluida - RDF (eng. *Computational Fluid Dynamics*, CFD) je alternativna metoda koja danas svoju primjenu često nalazi u brodskoj hidrodinamici. Osim skraćivanja vremena projektiranja i manje cijene, RDF daje potpuniju sliku polja strujanja, omogućuje simuliranje uvjeta koji se ne mogu ostvariti u eksperimentu te općenito troši manje energije. Glavni nedostatak RDF-a je ograničenost primjene na slučajeve za koje postoji pouzdan matematički model. Danas je česti slučaj kombinacija RDF-a i eksperimentalnih ispitivanja u bazenu, jer se ove dvije metode međusobno dobro nadopunjuju [1].

Za dobivanje što točnijih rezultata numeričkih simulacija i za iskorištavanje punog potencijala RDF-a u brodskoj hidrodinamici potrebno je dobro poznavati teoriju RDF-a te znati se vješto koristiti odabranim računalnim programom. Također, numeričke simulacije većinom zahtijevaju velike računalne resurse te ih je bitno znati dobro iskoristiti.

U ovome radu korišten je komercijalni programski paket STAR-CCM+ za RDF s kojim su provedene numeričke simulacije pokusa slobodne vožnje broskog vijka, pokusa otpora broda te pokusa vlastitog pogona. Modeli broda i broskog vijka dostupni u literaturi, skalirani su na stvarnu veličinu te su uneseni u STAR-CCM+. Dan je pregled literature te je prikazan korišteni matematički model. Kreirana je proračunska domena, provedena je njena diskretizacija na konačne volumene, definirani su rubni uvjeti te fizikalne postavke numeričkih simulacija. Sve numeričke simulacije provedene su primjenom dva modela turbulencije, realizable $k-\varepsilon$ i $k-\omega$ SST, te su dobiveni rezultati uspoređeni. Pokus otpora i pokus vlastitog pogona provedeni su za dva Froudeova broja. Provedena je verifikacija rezultata pokusa otpora pri čemu je analizirana gustoća geometrijske mreže i veličina vremenskog koraka. Svi rezultati su validirani koristeći modelske rezultate dostupne u literaturi ekstrapolirane na brod u naravi.

1.1. Pregled literature

Farkas et al. [2] su proveli numeričke simulacije pokusa otpora, pokusa slobodne vožnje vijka i pokusa vlastitog pogona za brod za rasuti teret i brodski vijak u naravi. Rezultati dobiveni modelskim ispitivanjima ekstrapolirani su na stvarnu veličinu koristeći pet različitih metoda ekstrapolacije. Numeričke simulacije provedene su koristeći RANS jednadžbe te primjenom četiri različita modela turbulencije. Prikazane su prednosti i mane određenih ekstrapolacijskih metoda. Rezultati su verificirani i validirani te je pokazano da RDF daje zadovoljavajuća rješenja pri određivanju brodskih hidrodinamičkih značajki za brod i brodski vijak u naravi. Seo et al. [3] su u svom radu prikazali način pripreme geometrijske mreže i dali određene savjete za dobivanje što točnijih rezultata numeričkih simulacija. Izvršene su simulacije pokusa otpora, pokusa vlastitog pogona i pokusa slobodne vožnje vijka koristeći RANS jednadžbe. Slobodna površina modelirana je primjenom metode udjela fluida u volumenu (eng. *Volume of Fluid*, VOF), a područje oko brodskog vijka, u pokusima slobodne vožnje i vlastitog pogona, diskretizirano je koristeći metodu klizajuće geometrijske mreže (eng. *sliding mesh*). Niklas et al. [4] su usporedili silu ukupnog otpora dobivenu koristeći RDF s rezultatima dobivenim Holtrop-Mennen metodom, rezultatima dobivenim ispitivanjem modela u bazenu te rezultatima dobivenim na pokusnoj plovidbi. Prikazana je važnost metode ekstrapoliranja rezultata s modela na brod u naravi. Seok et al. [5] su istražili utjecaj povećanja hrapavosti uslijed obraštanja trupa broda na povećanje ukupnog otpora broda primjenom numeričkih simulacija. Rezultati numeričkih simulacija validirani su s eksperimentalnim rezultatima. Autori su pokazali kako je RDF dobra metoda za analizu povećanja operativnih troškova uslijed obraštanja trupa broda. Farkas et al. [6] su istražili utjecaj obraštanja trupa broda na njegove eksploatacijske karakteristike primjenom RDF-a. Hrapavost je modelirana preko zidnih funkcija unutar programskog paketa STAR-CCM+. Izvršene su numeričke simulacije za tri trgovačka broda u naravi. Pokazano je kako obraštanje trupa broda utječe na smanjenje brzine i potrošnju goriva broda te je istaknuto da RDF može biti koristan brodovlasniku za određivanje trenutka u kojemu bi se trebao očistiti brodski trup i vijak. Nguyen et al. [7] su u svom radu istražili utjecaj primijenjenog modela turbulencije na rezultate numeričkih simulacija. Dobiveni rezultati ukazuju da, u usporedbi s drugim modelima turbulencije, $k - \varepsilon$ modeli turbulencije daju veći otpor trenja, a $k - \omega$ modeli turbulencije daju veći otpor viskoznog tlaka. Također je prikazano kako primijenjeni model turbulencije utječe na polje sustrujanja oko brodskog vijka te na odvajanje strujanja iza krme broda. Feng et al. [8] su ispitali novu „BEMT“ metodu za numeričku simulaciju pokusa vlastitog pogona te pokazali da daje skoro identične rezultate kao

i uobičajena „Body force“ metoda, a zahtijeva manje računalnih resursa. Naveli su kako je potrebno provesti još numeričkih simulacija na nekoliko različitih modela brodskog vijka kako bi potvrdili pogodnost korištenja navedene metode u drugim slučajevima. Shivachev et al. [9] su proučili utjecaj trima na dodatni otpor za KCS model broda. Rezultate dobivene numeričkim simulacijama validirali su s eksperimentalnim rezultatima. Lee et al. [10] su primijenili RDF za provedbu numeričkih simulacija stabilneta broda u oštećenom stanju. Modelu broda zadano je šest stupnjeva slobode gibanja te su provedene numeričke simulacije pokusa slobodnog valjanja u oštećenom i neoštećenom stanju na valovima. Priloženi rezultati ukazuju na povećanje koeficijenta prigušenja te smanjenje amplitude valjanja uslijed oštećenja broda. Liu et al. [11] su u svom radu proveli numeričke simulacije pokusa čistog zanošenja u plitkoj vodi za DTC model broda koristeći RDF. Provedena je verifikacija geometrijske mreže i vremenskog koraka te validacija rezultata. Analiziran je utjecaj plitke vode, blizine bočnih stijenki, brzine broda, dinamičkog urona te trima broda na konačne rezultate. Di Mascio et al. [12] su primjenom RDF-a istražili stvaranje vrtloga uslijed strujanja fluida iza propelera pri nailasku na kormilo. Dobivene rezultate usporedili su s eksperimentalno dobivenim rezultatima te je potvrđena valjanost numeričkih simulacija. Tezdogan et al. [13] su primjenom RDF-a odredili dodatni otpor na valovima za KCS brod u naravi. Numeričke simulacije proveli su pri projektnoj i smanjenoj brzini plovidbe koristeći RANS jednadžbe. Dobivene rezultate su validirali s dostupnim eksperimentalnim rezultatima te su pokazali da RDF daje zadovoljavajuće rezultate. Sigmund et al. [14] su u svom radu primjenom RDF-a istražili utjecaj valova na propulzijske značajke jednovijčanog i dvovijčanog broda. Provedene su numeričke simulacije pokusa slobodne vožnje vijka u homogenom polju brzina te pokusa otpora i pokusa vlastitog pogona u mirnoj vodi te na valovima. Numeričke simulacije provedene su na modelu broda sa šest stupnjeva slobode gibanja, a pri pokusu vlastitog pogona korištena je metoda klizajuće geometrijske mreže. Rezultati dobiveni numeričkim simulacijama uspoređeni su s eksperimentalno dobivenim rezultatima te je pokazana valjanost rezultata. Guo et. al [15] su prikazali rezultate provedene višeobjektne optimizacije na primjeru trimarana koristeći RDF, pri čemu su ulazni parametri optimizacije bili sustav propulzije vodenim mlazom, oblik trupa broda te određeni lokalni oblici trupa broda. Pokazano je da je RDF valjana metoda za višeobjektnu optimizaciju u brodskoj hidrodinamici. Niklas et al. [16] su analizirali utjecaj različitih oblika bulba broda na otpor primjenom RDF-a. Numeričke simulacije su provedene za brod u naravi te je pokazana valjanost dobivenih rezultata. Kang et al. [17] su u svom radu ispitali mogućnost analize stvaranja kavitacije na brodskom vijku koristeći RDF. Numeričke simulacije proveli su koristeći programski paket STAR-CCM+ primjenom RANS jednadžbi i

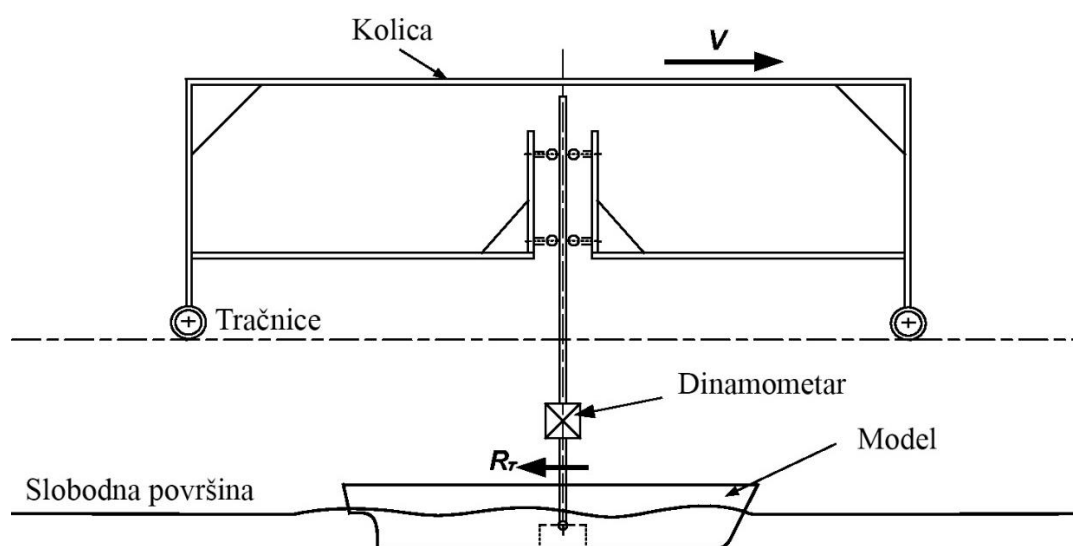
$k - \omega$ modela turbulencije te je pokazano da je RDF pogodna metoda za analizu kavitacije. Peng et al. [18] su u svom radu prikazali rezultate pokusa otpora i pokusa vlastitog pogona za Aframax model broda dobivene primjenom numeričkih simulacija te eksperimentalnim putem, uzimajući u obzir djelovanje valova. Korištene su RANS jednadžbe i $k - \varepsilon$ model turbulencije te metoda klizajuće geometrijske mreže za modeliranje broskog vijka. Dobiveni rezultati su validirani eksperimentalnim rezultatima. Htay et al. [19] su usporedili rezultate dobivene numeričkim simulacijama za KVLCC2 model broda pri jednom Froudeovom broju koristeći model s posebnom vrstom kormila „RBFS“ te s uobičajenim kormilom. Pokazano je da „RBFS“ kormilo ima povoljan učinak na sliku valova te na ukupan otpor broda. Elsherbiny et al. [20] su istražili utjecaj ograničene i plitke vode na ukupni otpor broda na primjeru KCS modela broda i Sueskog kanala. Provedene su numeričke simulacije koristeći RDF te su dobiveni rezultati uspoređeni s eksperimentalnim, analitičkim i empirijskim rezultatima. Dana je dobivena korelacija između dimenzija presjeka kanala i ukupnog otpora broda. Saettone et al [21] su usporedili rezultate pokusa vlastitog pogona koristeći nestacionarne i kvazi-stacionarne numeričke simulacije za KVLCC2 brod u naravi. Pokazano je da kvazi-stacionarne simulacije daju zadovoljavajuće rezultate uz manju potrošnju računalnih resursa.

2. MODELSKA ISPITIVANJA

U ovom poglavlju dan je kratki opis modelskih ispitivanja te korištena metoda ekstrapolacije modelskih rezultata na vrijednosti za brod u naravi.

2.1. Pokus otpora broda

Pokus otpora broda (eng. *resistance test*) prikazan na slici 1. provodi se koristeći model broda, kolica i potrebne instrumente u bazenu za ispitivanje modela. Pokus se provodi tegljenjem modela broda kroz bazen pri Froudeovim brojevima interesantnim za brod u naravi. Pri ispitivanju modela broda potrebno je zadovoljiti geometrijsku sličnost, kinematičku sličnost te djelomično dinamičku sličnost tako da se zadovolji jednakost Froudeovih brojeva, a Reynoldsov broj se drži iznad kritične vrijednosti. Cilj pokusa otpora je dobiti krivulju ovisnosti sile ukupnog otpora i brzine modela broda. Dobivene vrijednosti ukupnog otpora za model moguće je potom preračunati na vrijednosti za brod [22]. Postoji nekoliko metoda za preračunavanje otpora s modela na brod, a u ovom radu korištena je metoda ITTC-a 1978 Performance Prediction Method (PPM) [23] za jednovijčane brodove prikazana u poglavlju 2.4.

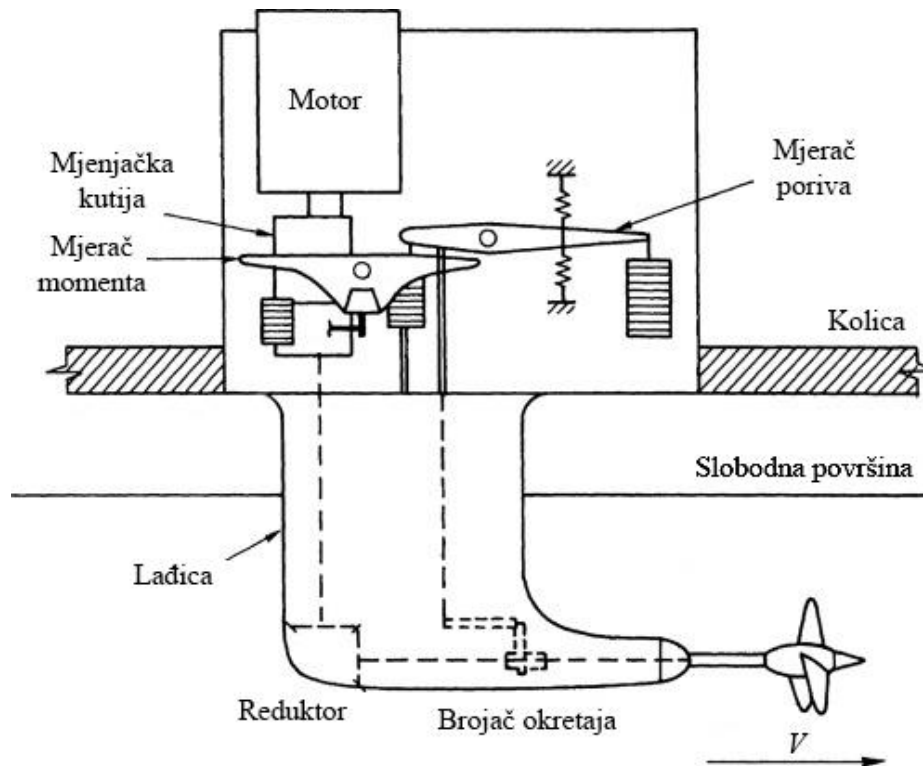


Slika 1. Pokus otpora broda [24]

2.2. Pokus slobodne vožnje vijka

Pokus slobodne vožnje vijka (eng. *open water test*) prikazan na slici 2. provodi se u svrhu određivanja hidrodinamičkih značajki brodskog vijka u homogenom polju brzina. U slučaju takvog strujanja, brzina nastrujavanja vode na brodski vijak jednaka je u svakoj točki brodskog vijka. Rezultati pokusa slobodne vožnje koriste se za proračun komponenta propulzije te kao

osnova za projektiranje broskog vijka za novi brod. Pokus se provodi u bazenu za modelska ispitivanja pomoću uređaja koji se naziva lađica. Prilikom izvođenja pokusa potrebno je ostvariti geometrijsku, kinematičku i djelomično dinamičku sličnost na isti način kao i u pokusu otpora modela broda [22].



Slika 2. Pokus slobodne vožnje vijka [25]

Tijekom pokusa slobodne vožnje vijka mjere se sljedeće veličine na modelu:

- poriv T_M ,
- moment Q_M ,
- broj okretaja n_M ,
- brzina napredovanja broskog vijka v_{AM} .

Koristeći navedene izmjerene veličine računaju se bezdimenzijski hidrodinamički koeficijenti zapisani u općenitom obliku u nastavku.

Koeficijent poriva K_T glasi:

$$K_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4} \quad (1)$$

gdje je T poriv, ρ gustoća fluida, n broj okretaja, a D promjer vijka.

Koeficijent momenta K_Q glasi:

$$K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5} \quad (2)$$

gdje je Q moment.

Koeficijent napredovanja J glasi:

$$J = \frac{v_A}{n \cdot D} \quad (3)$$

gdje je v_A brzina napredovanja broskog vijka.

Stupanj djelovanja vijka u slobodnoj vožnji η_o glasi:

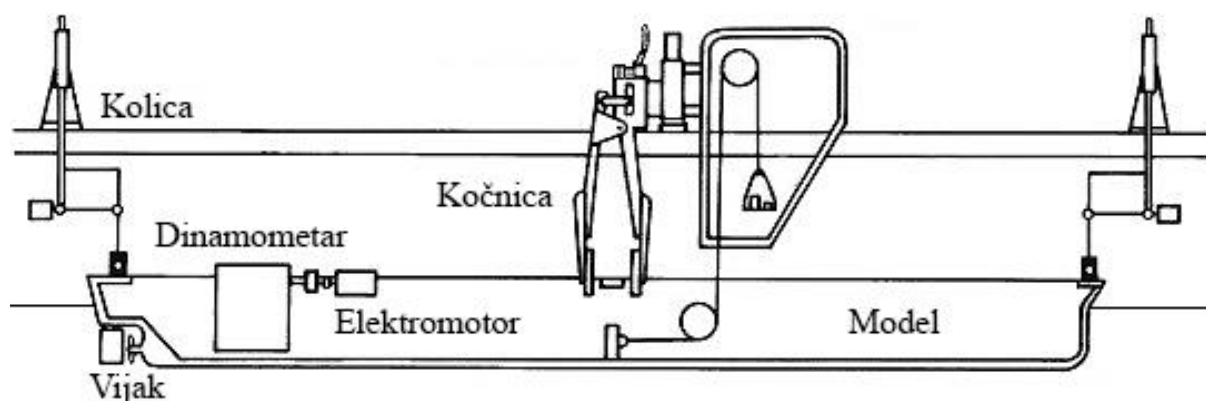
$$\eta_o = \frac{J}{2\pi} \cdot \frac{K_T}{K_Q} \quad (4)$$

Navedeni hidrodinamički koeficijenti, dobiveni kao rezultat pokusa slobodne vožnje vijka, prikazuju se u dijagramu slobodne vožnje.

Dobivene vrijednosti hidrodinamičkih koeficijenta za model nije potrebno preračunavati na vrijednosti za brod u naravi, jer je utjecaj mjerila zanemariv [26].

2.3. Pokus vlastitog pogona

Za provedbu pokusa vlastitog pogona (eng. *self-propulsion test*) prikazanog na slici 3. potreban je model broda opremljen s vijkom, kormilom, uređajima za pogon i instrumentima za mjerenje. Model broda dovodi se na željeni gaz korištenjem utega te se pomoću vodilica, kočnice i dinamometra povezuje s kolicima za tegljenje te se potom tegli u bazenu za modelska ispitivanja [22].



Slika 3. Pokus vlastitog pogona [27]

Tijekom pokusa vlastitog pogona mjere se sljedeće veličine na modelu:

- poriv T_M ,
- moment Q_M ,
- broj okretaja n_M ,
- brzina napredovanja V_M ,
- vučna sila Z .

Vučna sila Z definira se kao razlika otpora R_{TM} i poriva modela broda T_M :

$$Z = R_{TM} - T_M \quad (5)$$

Kada je $Z = 0$, znači da je postignuta točka vlastitog pogona modela.

Zbog razlike u specifičnom otporu trenja za model i brod, potrebno je primijeniti ispravak trenja F_D te tom dodatnom vanjskom silom tegliti model broda u pokusu.

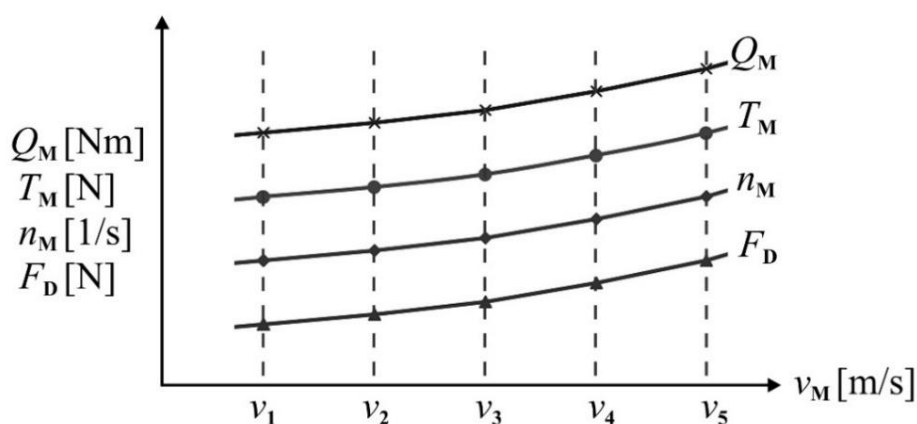
Pokus vlastitog pogona izvodi se kako bi se u kombinaciji s rezultatima dobivenim pokusom slobodne vožnje vijka dobile propulzijske značajke te prognozni dijagram u kojemu se za određeno stanje opterećenja broda definira ovisnost snage motora i broja okretaja vijka o brzini broda.

Postoji nekoliko metoda provedbe pokusa vlastitog pogona. Dvije najznačajnije metode su:

- kontinentalna metoda i
- britanska metoda.

2.3.1. *Kontinentalna metoda*

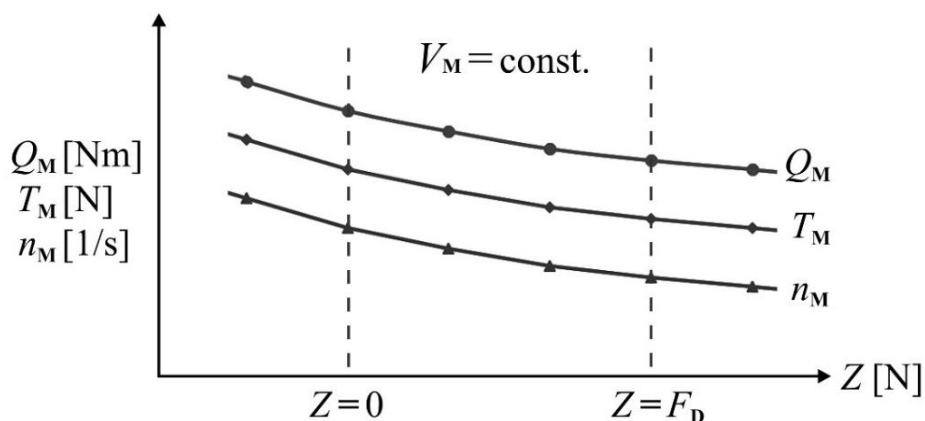
Kontinentalna metoda, ili metoda s konstantnim opterećenjem vijka, provodi se u području interesantnih brzina broda za određeno stanje opterećenja. Kolica se kontinuirano ubrzavaju dok ne postignu zadanu brzinu modela dok se istovremeno povećava i broj okretaja okretaja vijka. Model broda se pritom tegli vanjskom silom ispravka trenja koja se računa posebno za svaku zadanu brzinu. Prilikom povećanja brzine mjere se veličine poriva, momenta, broja okretaja i ispravka trenja. Sila ispravka trenja predstavlja silu kojom je potrebno rasteretiti vijak da se na vijku dobije opterećenje u naravi [22]. Dijagram kontinentalne metode prikazan je na slici 4.



Slika 4. Kontinentalna metoda vlastitog pogona

2.3.2. Britanska metoda

Britanska metoda, ili metoda s variranjem opterećenja vijka, temelji se na mjerenju poriva, momenta i broja okretaja za jednu brzinu pri različitim opterećenjima. Sve veličine mjere se za četiri do pet različitih brzina. Granice opterećenja su točka vlastitog pogona modela $Z = 0$ i točka vlastitog pogona koja odgovara brzini broda $Z = F_D$. Uglavnom se provede i jedno mjerenje iza točke vlastitog pogona modela i jedno mjerenje ispred točke vlastitog pogona broda [22]. Dijagram Britanske metode prikazan je na slici 5.



Slika 5. Britanska metoda vlastitog pogona

Dobiveni rezultati pokusa vlastitog pogona, koristeći odabranu metodu ekstrapolacije, preračunavaju se na vrijednosti za brod u naravi. U ovom radu korištena je metoda ITTC-a 1978 prikazana u poglavlju 2.4. U nastavku je prikazano određivanje snage predane vijku u točki vlastitog pogona za zadanu brzinu te izračun koeficijenata propulzije.

2.3.3. Rezultati pokusa vlastitog pogona

Koristeći rezultate pokusa vlastitog pogona definira se točka vlastitog pogona koja je određena snagom koja je predana vijku i brzinom okretaja vijka za određenu brzinu broda. Pomoću dobivenih rezultata pokusa vlastitog pogona mogu se izračunati i koeficijenti propulzije koji su prikazani u nastavku [22].

Snaga predana vijku (eng. *propeller delivered power*) računa se prema formuli koja glasi:

$$P_D = 2\pi \cdot n \cdot Q \quad (6)$$

Sustrujanje se definira kao razlika između brzine broda v i aksijalne komponente brzine nastrujavanja vode na vijak v_A , a koeficijent sustrujanja dobiva se dijeljenjem te razlike s brzinom broda v . Koeficijent sustrujanja određen iz jednakosti poriva w_T računa se prema:

$$w_T = 1 - \frac{J_T \cdot n \cdot D}{v} \quad (7)$$

pri čemu je J_T koeficijent napredovanja vijka određen iz jednakosti poriva vijka u točki vlastitog pogona.

Smanjenje poriva se definira kao razlika između poriva T i ukupnog otpora broda R_T , a koeficijent smanjenog poriva ili koeficijent upijanja dobiva se dijeljenjem te razlike s porivom T . Pri pokusu vlastitog pogona potrebno je uzeti u obzir silu ispravka trenja. Koeficijent upijanja t računa se prema:

$$t = 1 - \frac{R_T - F_D}{T} \quad (8)$$

Stupanj utjecaja trupa η_H računa se prema sljedećoj formuli:

$$\eta_H = \frac{1-t}{1-w_T} \quad (9)$$

Koeficijent prijelaza η_R računa se prema sljedećem izrazu:

$$\eta_R = \frac{K_Q}{K_{QT}} \quad (10)$$

pri čemu je K_{QT} koeficijent momenta izračunat iz jednakosti poriva u točki vlastitog pogona.

Koeficijent korisnosti kvazi-propulzije η_D računa se kao:

$$\eta_D = \eta_H \cdot \eta_O \cdot \eta_R \quad (11)$$

2.4. Ekstrapolacija rezultata modelskih ispitivanja

Rezultate dobivene iz pokusa otpora i pokusa vlastitog pogona potrebno je ekstrapolirati na vrijednosti za brod u naravi. Postoji nekoliko metoda ekstrapolacije, a u ovom radu korištena je metoda ITTC-a 1978 PPM opisana u nastavku [23].

Prema ITTC-u 1978 PPM, koeficijent ukupnog otpora C_{TS} broda bez ljuljnih kobilica računa se prema sljedećoj jednadžbi [23]:

$$C_{TS} = (1+k) \cdot C_{FS} + \Delta C_F + C_A + C_W + C_{AAS} \quad (12)$$

Koeficijent otpora trenja broda C_{FS} računa se preko korelacijske linije model - brod ITTC 1957 prema sljedećem izrazu:

$$C_{FS} = \frac{0,075}{(\log Rn - 2)^2} \quad (13)$$

pri čemu je Rn Reynoldsov broj.

Koeficijent otpora valova C_W računa se preko koeficijenta ukupnog otpora modela broda C_{TM} dobivenog iz pokusa otpora, koeficijenta otpora trenja modela broda C_{FM} koji se računa preko korelacijske linije model-brod ITTC 1957 te faktora forme k kako slijedi:

$$C_W = C_{TM} - C_{FM} \cdot (1+k) \quad (14)$$

U ovom radu nije modelirana hrapavost vijka te nije modelirano strujanje zraka oko nadgrađa pa se pri ekstrapolaciji rezultata dodatak na hrapavost ΔC_F i koeficijent otpora zraka C_{AAS} zanemaruju.

Korelacijski dodatak C_A se određuje kao:

$$C_A = (5,68 - 0,6 \log Rn) \cdot 10^{-3} \quad (15)$$

Poznavajući vrijednost koeficijenta ukupnog otpora broda moguće je izračunati njegov ukupni otpor R_T pomoću sljedeće jednadžbe:

$$R_T = \frac{1}{2} \cdot C_{TS} \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \quad (16)$$

pri čemu je S je oplakana površina trupa broda.

Koeficijent sustrujanja određen iz jednakosti poriva za brod w_{TS} računa se prema sljedećoj jednadžbi:

$$w_{TS} = (t + 0,04) + (w_{TM} - t - 0,04) \cdot \frac{(1+k) \cdot C_{FS} + \Delta C_F}{(1+k) \cdot C_{FM}} \quad (17)$$

pri čemu je w_{TM} koeficijent sustrujanja određen iz jednakosti poriva za model.

Kako bi se odredila vrijednost koeficijenta napredovanja iz jednakosti poriva te vrijednost koeficijenta momenta iz jednakosti poriva, potrebno je u dijagramu slobodne vožnje ucrtati krivulju dobivenu sljedećom jednadžbom:

$$\frac{K_T}{J^2} = \frac{S}{2D^2} \cdot \frac{C_{TS}}{(1-t) \cdot (1-w_{TS})^2} \quad (18)$$

Broj okretaja broskog vijka računa se prema:

$$n = \frac{(1-w_{TS}) \cdot v}{J_T \cdot D} \quad (19)$$

Snaga predana vijku određena je izrazom:

$$P_D = 2\pi \cdot \rho \cdot D^5 \cdot n^3 \cdot \frac{K_{QT}}{\eta_R} \quad (20)$$

3. RAČUNALNA DINAMIKA FLUIDA

U ovom poglavlju dan je kratki opis pristupa rješavanja problema brodske hidrodinamike koristeći RDF. Prikazan je matematički model strujanja viskoznog nestlačivog fluida te su ukratko opisani korišteni modeli turbulencije. Prikazane su metode korištene u numeričkim simulacijama pokusa otpora, slobodne vožnje vijka i vlastitog pogona.

3.1. Općenito

Svaka simulacija započinje definiranjem problema i izborom odgovarajućeg matematičkog modela. U komercijalnim programskim paketima za RDF već su dostupni matematički modeli te je potrebno odabrati model koji odgovara zadanom problemu. Zatim slijedi numeričko rješavanje postavljenog matematičkog modela. Matematički model rješava se u tri koraka. Prvi korak je diskretizacija područja proračuna. Diskretizacija podrazumijeva podjelu područja proračuna na određeni broj manjih volumena, a svakom volumenu dodjeljuje se jedan ili više čvorova u kojima se računa vrijednost fizikalnih veličina matematičkog modela. Rezultat ovakve podjele naziva se geometrijska mreža. Potom slijedi drugi korak gdje je za dobivenu geometrijsku mrežu potrebno diskretizirati diferencijalne jednačbe uvažavajući rubne uvjete koristeći jednu od metoda (npr. metoda konačnih volumena, metoda konačnih elemenata itd.). Rezultat ovakve diskretizacije je sustav algebarskih jednačbi. Treći korak je rješavanje jednačbi. Nakon što su dobivena rješenja, slijedi analiza rezultata [1].

3.2. Matematički model

Matematički model je matematički zapis fizikalnog modela, a fizikalni model je niz pretpostavki koje aproksimiraju stvarni svijet. Glavne pretpostavke fizikalnog modela su :

- fluid je kontinuum,
- homogenost fluida,
- izotropnost fluida,
- jednokomponentan ili višekomponentan fluid,
- jednofazan ili višefazan fluid,
- jednodimenzijnsko, dvodimenzijnsko ili trodimenzijnsko strujanje fluida,
- stacionarno ili nestacionarno strujanje fluida te
- neviskozno, laminarno ili turbulentno strujanje fluida.

Glavna pretpostavka strujanja fluida je da je fluid kontinuum. Kontinuum je realan fizikalan sustav sastavljen od materije koja u potpunosti ispunjava područje prostora. U tom sustavu vrijede fizikalna svojstva i za slučaj infinitezimalnog malog volumena. Ovo je osnovna pretpostavka strujanja fluida iz koje se zaključuje da je fluid neprekinuta sredina, koja se pod djelovanjem proizvoljno malih tangencijalnih naprezanja neprekidno deformira te se ta deformacija naziva strujanje fluida [28].

Potrebno je uzeti u obzir činjenicu da kontinuum predstavlja idealizaciju koja ne odgovara stvarnosti, ali je za potrebe problema strujanja fluida unutar dovoljno velike domene dovoljno dobra aproksimacija stvarnoga svijeta.

Homogenost podrazumijeva da su fizikalna svojstva fluida ista u svim točkama fluida, a izotropnost podrazumijeva da su fizikalna svojstva jednaka u svim smjerovima. Fluid može biti jednokomponentan ili višekomponentan te jednofazan ili višefazan. Strujanje fluida može se promatrati kao jednodimenzijско, dvodimenzijско ili trodimenzijско te kao stacionarno ili nestacionarno. Po obliku, strujanje fluida se dijeli na viskozno i neviskozno. Viskozno strujanje može biti turbulentno, što je u prirodi najčešći slučaj, ili laminarno, pri jako niskim vrijednostima Reynoldsovog broja. Turbulentno strujanje karakterizira velika fluktuacija određenih fizikalnih veličina te vrlo nepravilna putanja čestica. Laminarno strujanje je pravilno i čestice fluida se gibaju u slojevima. Pri optjecanju tijela može se pojaviti i jedan i drugi tip strujanja [28].

Modeliranje turbulentnog strujanja veliko je područje interesa dinamike fluida. Postoje razne metode, a u ovome radu korištena je metoda temeljena na Reynoldsovim osrednjenim Navier – Stokesovim (eng. *Reynolds Averaged Navier – Stokes*, RANS) jednadžbama te su primijenjeni realizable $k - \varepsilon$ i $k - \omega$ SST modeli turbulencije.

3.3. Osnovne jednadžbe dinamike fluida

Jednadžbe koje opisuju nestlačivo viskozno strujanje fluida su Navier – Stokesove jednadžbe. One se mogu izvesti kombinacijom Eulerove jednadžbe gibanja i konstitutivnih jednadžbi za Newtonski fluid. U nastavku su dane osnovne jednadžbe dinamike fluida [29].

Zakon održanja mase (jednadžba kontinuiteta) glasi da je brzina promjene mase materijalnog volumena jednaka nuli. Za nestlačivi fluid jednadžba glasi:

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (21)$$

Zakon održanja količine gibanja (Eulerova jednadžba gibanja) glasi da je brzina promjene količine gibanja materijalnog volumena jednaka sumi vanjskih masenih i površinskih sila koje djeluju na materijalni volumen te u matematičkom zapisu slijedi:

$$\rho \frac{Dv_i}{Dt} = \rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \rho v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \rho f_i + \frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j} \quad (22)$$

pri čemu je v_i vektor brzine, f_i gustoća masene sile, σ_{ji} tenzor naprezanja, a $\frac{D}{Dt}$ operator materijalne derivacije.

Zakoni posebnih ponašanja fluida (konstitutivne jednadžbe) glase:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \Sigma_{ij} \quad (23)$$

$$p = -\frac{1}{3}\sigma_{kk} \quad (24)$$

$$\Sigma_{ij} = 2\mu D_{ij} - \frac{2}{3}\mu D_{kk}\delta_{ij} \quad (25)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right) \quad (26)$$

pri čemu je p tlak, δ_{ij} Kroneckerov simbol, Σ_{ij} devijatorski dio tenzora naprezanja, μ dinamički koeficijent viskoznosti, a D_{ij} tenzor brzine deformacije.

Koristeći Eulerovu jednadžbu gibanja i konstitutivne jednadžbe te zanemarujući koeficijent volumenske viskoznosti slijede Navier – Stokesove jednadžbe:

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \rho v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \rho f_i - \frac{\partial}{\partial x_i}\left(p + \frac{2}{3}\mu D_{kk}\right) + 2\frac{\partial}{\partial x_j}(\mu D_{ij}) \quad (27)$$

Jednadžba (27) za $\mu = \text{const.}$ glasi:

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \nabla^2 v_i \quad (28)$$

pri čemu kinematički koeficijent viskoznosti ν glasi:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (29)$$

3.4. Reynoldsove osrednjene Navier – Stokesove jednadžbe

Rezultat direktnog rješavanja Navier-Stokesovih jednadžbi bio bi skup numeričkih vrijednosti traženih polja brzina i tlaka u velikom broju prostornih točaka za veliki broj vremenskih trenutaka. Budući da inženjere većinom ne zanimaju pojedine trenutne vrijednosti nego prosječne vrijednosti određenih integralnih veličina, prije rješavanja jednadžbi, sve vrijednosti u jednadžbama mogu se osrednjiti što znatno olakšava numeričko rješavanje jednadžbi. U nastavku slijedi prikaz vremenskog osrednjavanja [1].

Veličina f koja predstavlja određenu vrijednost u turbulentnom strujanju može se zapisati kao zbroj vremenski osrednjene vrijednosti \bar{f} i pulsirajućeg dijela f' :

$$f(x_i, t) = \bar{f}(x_i) + f'(x_i, t) \quad (30)$$

Prosječna vrijednost \bar{f} u određenom periodu osrednjenja T definira se kao:

$$\bar{f}(x_i) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T f(x_i, t) dt \quad (31)$$

Period osrednjenja mora biti dovoljno velik da prosječna vrijednost ne bi ovisila o trenutku u kojem je započeto osrednjavanje. Ovakav način osrednjavanja moguće je primijeniti kod statistički stacionarnih strujanja.

Za dobro odabran period osrednjenja mora vrijediti:

$$\overline{f'} = 0 \quad (32)$$

odnosno, vremenski osrednjena vrijednost pulsirajućeg dijela određene fizikalne veličine mora biti jednaka nuli.

Ako su f i g neke dvije proizvoljne veličine u turbulentnom strujanju, koje se sastoje od vremenski osrednjene vrijednosti i pulsirajućeg dijela, vrijedi sljedeća relacija:

$$\overline{f \cdot g} = \overline{(\bar{f} + f') \cdot (\bar{g} + g')} = \bar{f} \cdot \bar{g} + \overline{f' \cdot g'} \quad (33)$$

Iz jednadžbe (33) vidljivo je da prosječna vrijednost umnoška dvaju pulsirajućih dijelova fizikalnih veličina nije jednaka nuli. Koeficijent korelacije između navedenih veličine glasi:

$$R = \frac{\overline{f' \cdot g'}}{\sqrt{\overline{f' \cdot f'}} \cdot \sqrt{\overline{g' \cdot g'}}} \quad (34)$$

Ukoliko je vrijednost koeficijenta korelacije jednaka nuli, znači da su pulsirajući dijelovi veličina potpuno nezavisni što većinom u turbulentnom strujanju nije slučaj. Kao posljedica ovoga, u jednadžbama u nastavku javlja se Reynoldsovo naprezanje.

U nastavku se razmatra nestlačivo turbulentno strujanje uz zanemarenje masenih sila [1]. Takvo strujanje može se opisati jednadžbama (21) i (28) u kojima su nepoznanice komponente polja brzine v_i i polje tlaka p . Navedene veličine mogu se definirati zbrojem osrednjene vrijednosti i pulsirajućeg dijela. Za brzinu vrijedi:

$$v_i = \bar{v}_i + v_i' \quad (35)$$

pri čemu je \bar{v}_i vremenski osrednjena vrijednost komponente polja brzine, a v_i' pulsirajuća komponenta polja brzine.

Za tlak vrijedi:

$$p_i = \bar{p} + p' \quad (36)$$

pri čemu je \bar{p} vremenski osrednjena vrijednost polja tlaka, a p' pulsirajući tlak.

Uvrštavanjem jednadžbe (35) u jednadžbu (21) slijedi:

$$\frac{\partial(\bar{v}_i + v_i')}{\partial x_i} = 0 \quad (37)$$

Osrednjavanjem jednadžbe (37) dobiva se jednadžba kontinuiteta za osrednjeno strujanje:

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (38)$$

Uvrštavanjem jednadžbi (35) i (36) u jednadžbu (28) uz zanemarenje masene sile ($f_i = 0$) te vremenskim osrednjavanjem dobivaju se Reynoldsove osrednjene Navier – Stokesove jednadžbe koje glase:

$$\frac{\partial(\rho \bar{v}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho v_i v_j} + \overline{\rho v_i' v_j'}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} \quad (39)$$

pri čemu je $\bar{\tau}_{ij}$ osrednjeni tenzor viskoznog naprezanja koji glasi:

$$\bar{\tau}_{ij} = \mu \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) \quad (40)$$

Ranije spomenut Reynoldsov tenzor turbulentnog naprezanja, $\overline{\rho v_i' v_j'}$, simetrični je tenzor drugog reda koji sadrži šest nepoznanica.

Kako bi se zatvorio sustav jednažbi (38) i (39) potrebno je uvesti nove jednažbe što se rješava primjenom jednog od modela turbulencije.

3.5. Modeli turbulencije

Zadatak modela turbulencije je usklađivanje broja jednažbi i broja nepoznatih polja, zaustavljajući se na određenoj korelaciji. Glavni zahtjevi koje bi model turbulencije morao ispuniti su univerzalnost, točnost, mogućnost ekonomičnog rješavanja i jednostavnost. Modeli turbulencije mogu se podijeliti na modele prvoga reda, diferencijalne modele s jednom jednažbom, diferencijalne modele s dvije jednažbe, modele drugoga reda, modele višeg reda te na algebarske modele. Modeli prvog reda su najjednostavniji te se u njima modelira već dvojnja korelacija brzina, odnosno tenzor Reynoldsovih naprezanja i to uglavnom prema Boussinesqovoj hipotezi prema [1]:

$$-\overline{\rho v_i' v_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \bar{k} \delta_{ij} \quad (41)$$

pri čemu je μ_t koeficijent turbulentne viskoznosti, a \bar{k} specifična kinetička energija turbulencije.

Specifična kinetička energija turbulencije glasi:

$$\bar{k} = \frac{\overline{v_i' v_i'}}{2} \quad (42)$$

Koristeći Boussinesqovu hipotezu, šest nepoznatih komponenti tenzora Reynoldsovih naprezanja moguće je zamijeniti jednom nepoznanicom μ_t .

Koeficijent turbulentne viskoznosti moguće je modelirati analogno kinetičkoj teoriji plinova. Prema kinetičkoj teoriji plinova, viskoznost fluida razmjerna je gustoći fluida, slobodnoj putanji molekula te karakterističnoj brzini gibanja molekula. Stoga slijedi da je koeficijent turbulentne viskoznosti:

$$\mu_t = \rho \cdot l_t \cdot v_t \quad (43)$$

pri čemu je l_t duljina puta miješanja čestica fluida u turbulentnom strujanju ili karakteristična duljina turbulencije, a v_t karakteristična brzina turbulentnih pulsacija.

Iz toga slijedi da je koeficijent turbulentne viskoznosti definiran s dvije veličine te navedena jednažba (43) čini osnovu za većinu modela turbulencije.

Turbulentnu viskoznost moguće je modelirati pomoću raznih modela turbulencije, a u ovome radu korišteni su realizable $k - \varepsilon$ i SST $k - \omega$ modeli turbulencije.

U nastavku je dan kratak opis korištenih modela turbulencije.

3.5.1. Realizable $k - \varepsilon$ model turbulencije

U industrijskoj praksi, najčešće primjenjivani model turbulencije je $k - \varepsilon$ [30]. Postoji puno podvrsta $k - \varepsilon$ modela turbulencije, a u ovome radu korišten je realizable $k - \varepsilon$ model turbulencije. Navedeni model pripada diferencijalnim modelima s dvije jednadžbe. Svi diferencijalni modeli turbulencije karakterističnu brzinu turbulentnih pulsacija izjednačavaju s korijenom specifične kinetičke energije turbulencije, a razlikuju se po odabiru druge karakteristične veličine. Koristeći drugu karakterističnu veličinu l_t , potrebno je dobiti dimenziju l_t . Kao drugu karakterističnu veličinu, $k - \varepsilon$ modeli turbulencije koriste vremenski osrednjenu vrijednost brzine disipacije kinetičke energije u unutarnju energiju $\bar{\varepsilon}$ te slijedi:

$$\mu_t = C_\mu \cdot \rho \cdot \frac{\bar{k}^{-2}}{\bar{\varepsilon}} \quad (44)$$

pri čemu je C_μ bezdimenzijski koeficijent modela turbulencije.

Realizable $k - \varepsilon$ model turbulencije u odnosu na standardni $k - \varepsilon$ model turbulencije sadrži točniju jednadžbu za brzinu disipacije kinetičke energije te točniji koeficijent C_μ .

3.5.2. $k - \omega$ SST model turbulencije

$k - \omega$ model turbulencije također spada u diferencijalne modele s dvije jednadžbe. Postoji nekoliko podvrsta navedenog modela turbulencije, a u ovome radu korišten je $k - \omega$ SST model turbulencije. Za razliku od $k - \varepsilon$, druga karakteristična veličina koju $k - \omega$ modeli turbulencije koriste je vremenski osrednjena kutna brzina rotacije čestice fluida $\bar{\omega}$ što se može zapisati preko vremenske skale turbulencije T . Slijedi jednadžba [1]:

$$\mu_t = \rho \cdot k \cdot T \quad (45)$$

Vremenska skala turbulencije za $k - \omega$ SST model turbulencije računa se prema jednadžbi [30]:

$$T = \min \left(\frac{\alpha^*}{\omega}, \frac{a_1}{SF_2} \right) \quad (46)$$

pri čemu su α^* i a_1 koeficijenti modela, a F_2 funkcija miješanja.

Funkcija miješanja određuje se pomoću jednadžbe:

$$F_2 = \tanh \left\{ \left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \cdot \omega \cdot d}, \frac{500\nu}{d^2 \cdot \omega} \right) \right]^2 \right\} \quad (47)$$

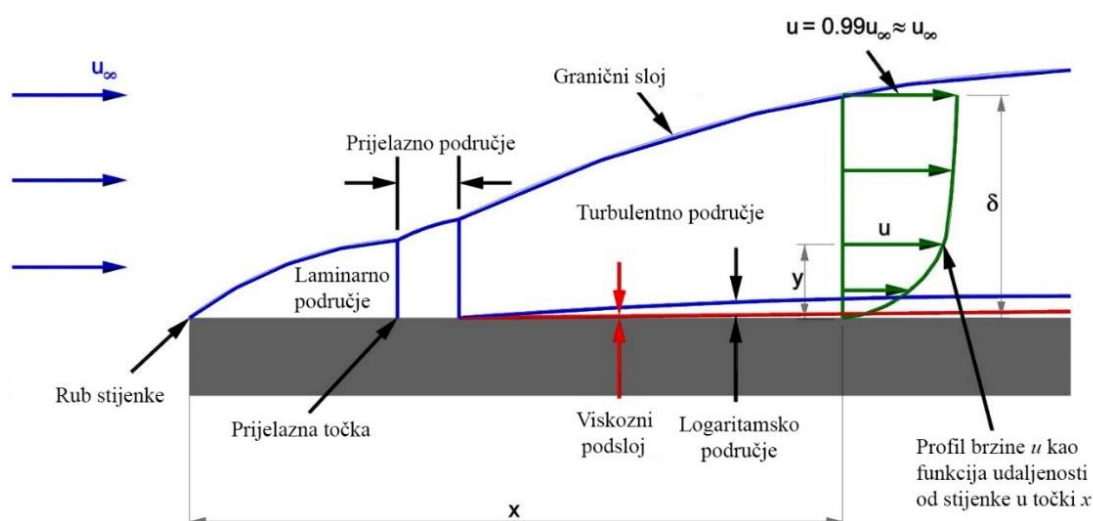
pri čemu je β^* koeficijent modela, a d udaljenost od stijenke.

$k - \omega$ SST model turbulencije je zapravo kombinacija standardnog $k - \varepsilon$ modela turbulencije uslijed slobodnog strujanja fluida i standardnog $k - \omega$ modela turbulencije uslijed strujanja uz čvrstu stijenku. Također, $k - \omega$ SST koristi modificirane linearne konstitutivne jednadžbe [30].

3.6. Zidne funkcije

Prilikom nastajanja viskoznog fluida na stijenku krutog tijela stvara se granični sloj. Područje između ruba stijenke do prijelazne točke unutar graničnog sloja naziva se laminarno područje. Zatim slijedi prijelazno područje u kojemu čestice fluida prestaju strujati u slojevima te dolazi do njihovog miješanja. U određenom trenutku završava prijelazno područje i počinje turbulentno područje. Turbulentni granični sloj može se podijeliti na unutarnji i vanjski sloj, a unutarnji sloj dijeli se na viskozni podsloj (eng. *viscous sublayer*) i logaritamsko područje (eng. *log-law region*). Viskozni podsloj dijeli se na linearni podsloj (eng. *linear sublayer*) i prijelazno područje (eng. *buffer layer*). Na slici 6. prikazan je razvoj graničnog sloja [31].

Budući da primjenjeni modeli turbulencije vrijede za velike vrijednosti Reynoldsovog broja, a u laminarnom i prijelaznom području graničnog sloja kao i u unutarnjem sloju turbulentnog područja graničnog sloja neposredno uz nepropusnu stijenku su male vrijednosti Reynoldsovog broja, potrebno je premostiti ta područja definiranjem rubnih uvjeta na granici na kojoj vrijedi zadani model [1]. U ovom radu korištene su zidne funkcije (eng. *wall functions*).



Slika 6. Razvoj turbulentnog graničnog sloja [31]

Bezdimenzijski profil brzine u^+ može se zapisati kao funkcija koja ovisi o bezdimenzijskoj udaljenosti od stijenke y^+ te slijedi [1]:

$$u^+ = f(y^+) \quad (48)$$

Pri čemu vrijede sljedeće jednadžbe:

$$u^+ = \frac{\bar{u}}{u_\tau} \quad (49)$$

$$y^+ = \frac{\rho \cdot u_\tau \cdot y}{\mu} \quad (50)$$

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (51)$$

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

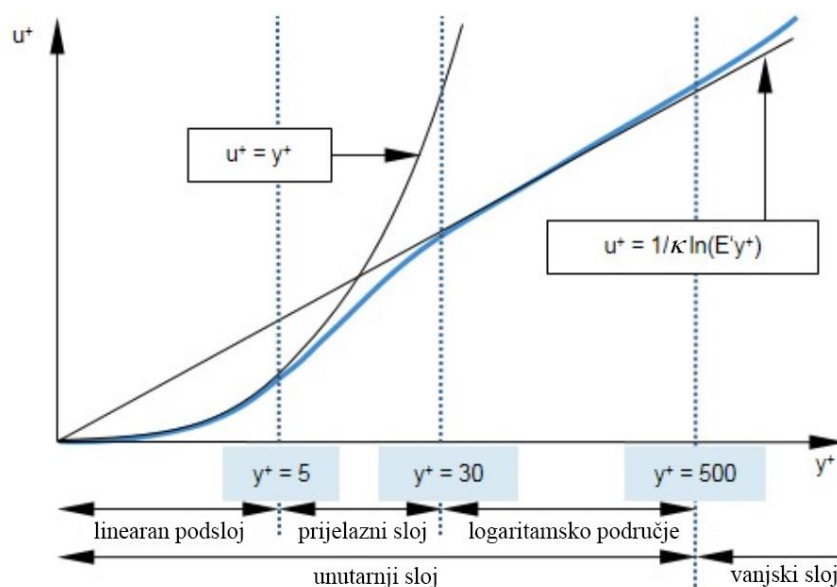
U linearnom podsloju vrijedi jednadžba:

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

U logaritamskom području jednadžba glasi:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B \quad (53)$$

pri čemu je κ von Karmanova konstanta, a B je konstanta integracije.



Slika 7. Profil brzine u turbulentnom graničnom sloju [30]

Na slici 7. krivuljom plave boje prikazan je odnos bezdimenzijske brzine strujanja u^+ i bezdimenzijske udaljenosti od stijenke y^+ . Druge dvije krivulje predstavljaju aproksimirani odnos ove dvije veličine unutar predviđenog raspona y^+ . Prema slici, unutarnji sloj turbulentnog graničnog sloja dijeli se na linearan podsloj za $0 \leq y^+ < 5$, prijelazni podsloj za $5 \leq y^+ < 30$ te na logaritamsko područje za $30 \leq y^+ \leq 500$.

U numeričkim simulacijama potrebno je izbjeći područja prijelaznog podsloja i linearnog podsloja, jer je u tim područjima teško opisati u^+ . Zato je potrebno diskretizirati granični sloj tako da vrijednost parametra y^+ bude unutar logaritamskog područja.

3.7. Numeričke metode

Budući da se sustav jednažbi koje opisuju turbulentno strujanje ne može analitički riješiti, potrebno je koristiti neku od numeričkih metoda. Najčešće upotrebljavane numeričke metode su metoda konačnih volumena, metoda konačnih elemenata i metoda konačnih razlika [1]. Numeričke metode funkcioniraju tako da prevode sustav parcijalnih diferencijalnih jednažbi u sustav algebarskih jednažbi. To podrazumijeva diskretizaciju jednažbi u prostoru i vremenu. Tako diskretizirane jednažbe rješavaju se koristeći algebarski višemrežni rješavač (eng. *algebraic multigrid solver*) pomoću računala [30].

Od odabrane numeričke metode očekuje se konvergentnost, konzistentnost, stabilnost, točnost te efikasnost [1].

Konvergenција numeričkog postupka je svojstvo koje kaže da se smanjivanjem prostornog i vremenskog koraka integracije rezultat mora više približavati egzaktnom rješenju.

Konzistentnost numeričkog postupka podrazumijeva da ukoliko prostorni i vremenski korak integracije teže nuli, diskretizirane jednažbe vraćaju se u početne diferencijalne jednažbe.

Stabilnost numeričkog postupka definira se činjenicom da razlika početno dobivenog numeričkog rješenja u odnosu na točno stacionarno rješenje, za zadani vremenski korak ostaje ograničena pri bilo kojem broju vremenskih koraka. To znači da pogreška mora ostati konačna i za slučaj da broj vremenskih koraka teži u beskonačnost.

Točnost numeričkog postupka definira se kao odstupanje numeričkog rješenja od egzaktnog na zadanoj geometrijskoj mreži, a efikasnost se definira kao broj računskih operacija potrebnih za dobivanje rješenja određene točnosti.

U ovome radu korištena je metoda konačnih volumena opširnije opisana u nastavku.

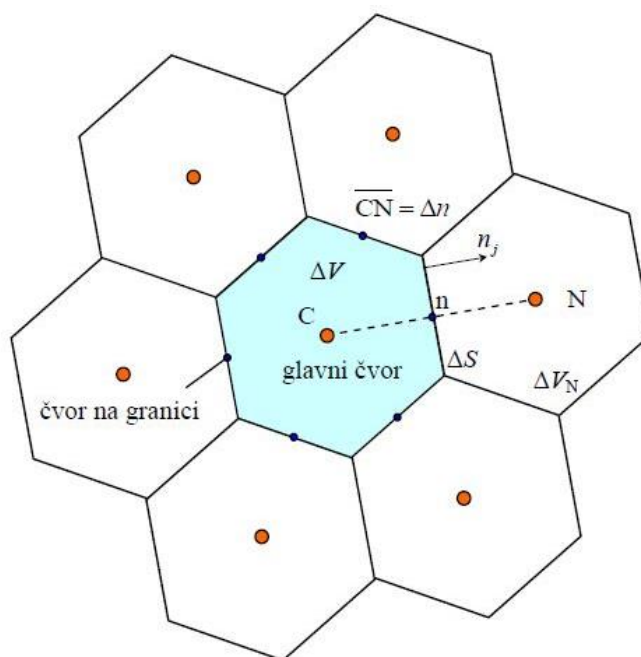
3.8. Metoda konačnih volumena

Metoda konačnih volumena temelji se na prostornoj diskretizaciji pri čemu se proračunska domena dijeli na određeni broj konačnih volumena. Dobiveni konačni volumeni predstavljaju ćelije geometrijske mreže. Broj ćelija zapravo određuje broj nepoznanica u sustavu algebarskih jednažbi. Ukoliko je problem nestacionaran, uvodi se i vremenska diskretizacija koja podrazumijeva podjelu proračunskog vremena koristeći proizvoljni vremenski korak (eng. *time step*) [30].

Metoda konačnih volumena se temelji na integriranju konzervativnog oblika transportnih jednažbi po konačnim volumenima te jednažba glasi [1]:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Delta V} \rho \varphi dV = - \int_{\Sigma \Delta S} (\rho v_j \varphi - \Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x_j}) n_j dS + \int_{\Delta V} S_\varphi dV \quad (54)$$

pri čemu član s lijeve strane jednažbe (54) predstavlja brzinu promjene sadržaja φ razmatranog fizikalnog svojstva u volumenu ΔV , prvi član s desne strane predstavlja konvekcijski i difuzijski protok φ kroz granice, a drugi član član predstavlja izvor φ .



Slika 8. Prikaz diskretizacije dijela područja proračuna [30]

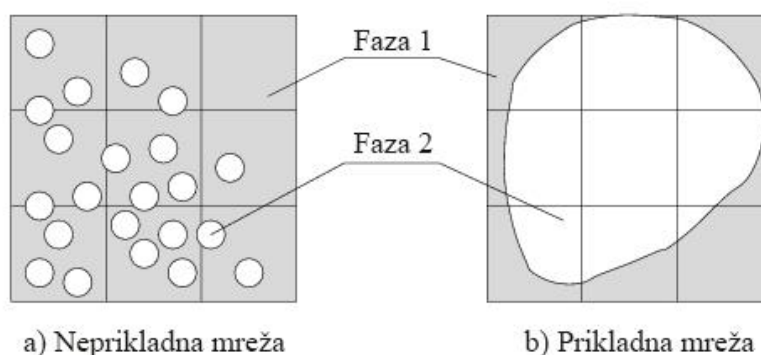
Na slici 8., obojana plavom bojom, prikazana je jedna ćelija diskretiziranog volumena, njen glavni čvor i okolne ćelije u dodiru s njom te njihovi čvorovi.

Skup konačnih volumena koji se međusobno dodiruju, a ne preklapaju te u potpunosti ispunjavaju područje proračuna naziva se geometrijska mreža [1].

3.9. Metoda udjela fluida u volumenu

Metoda udjela fluida u volumenu (eng. *Volume of Fluid*, VOF) je jednostavna višefazna metoda koja se koristi za modeliranje strujanja dvaju ili više fluida koji se ne miješaju homogeno. Model funkcionira tako da sve faze na zajedničkoj granici imaju definirano isto polje brzina, tlaka i temperature te ne treba posebno modelirati njihovu međusobnu interakciju. Zbog numeričke točnosti, VOF metoda prikladna je za situacije strujanja fluida gdje svaka faza fluida čini veliku cjelinu, a područje gdje su faze međusobno u kontaktu je relativno malo [30].

Na slici 9. pod a) je prikazana neprikladna mreža, a pod b) prikladna mreža za dvofazni model strujanja koristeći VOF metodu.



Slika 9. Prikaz dvofaznog fluida u konačnom volumenu [30]

Osnovne jednačbe VOF modela proizlaze iz ekvivalentnog fluida čija su fizikalna svojstva funkcije fizikalnih svojstava njegovih komponenti i njihovih volumnih udjela te slijedi [30]:

$$\rho = \sum_i \rho_i \cdot \alpha_i \quad (55)$$

$$\mu = \sum_i \mu_i \cdot \alpha_i \quad (56)$$

$$\alpha_i = \frac{V_i}{V} \quad (57)$$

pri čemu je α_i volumni udio pojedine faze fluida V_i unutar kontrolnog volumena V pri čemu vrijedi ($0 < \alpha_i < 1$), ρ_i je gustoća pojedine faze fluida unutar kontrolnog volumena, a μ_i dinamički koeficijent viskoznosti pojedine faze fluida unutar kontrolnog volumena.

U ovome radu za modeliranje slobodne površine korištena je VOF metoda.

3.10. Metoda višestrukih referentnih koordinatnih sustava

Primjenom RDF-a moguće je modelirati strujanje fluida koje podrazumijeva rotirajuće elemente kao što je u ovom radu riječ o brodskom vijku pri pokusu slobodne vožnje. Jedan od načina za modeliranje takvog strujanja temelji se na definiranju višestrukih referentnih koordinatnih sustava (eng. *Moving Reference Frame*, MRF). Metoda podrazumijeva podjelu proračunske domene na stacionarni i rotirajući dio [30].

Postoji i metoda jednog referentnog koordinatnog sustava (eng. *Single Reference Frame*, SRF) u kojem cijela domena rotira. SRF se koristi za neke jednostavnije probleme u kojima se promatra samo jedan izolirani dio rotirajućeg elementa (npr. jedno krilo brodskog vijka). Budući da se u ovom radu simuliran pokus slobodne vožnje s cijelim brodskim vijkom korišten je MRF.

MRF se većinom se koristi za rješavanje stacionarnih strujanja. Budući da se pokus slobodne vožnje provodi uz konstantan broj okretaja vrtanje vijka te konstantnu brzinu napredovanja vijka za određeni koeficijent napredovanja, a izmjerene veličine poriva i momenta osrednjuju se u vremenu, problem se može definirati kao stacionaran.

RANS jednadžbe za stacionarni dio proračunske domene rješavaju se koristeći apsolutnu brzinu, a RANS jednadžbe koje obuhvaćaju ćelije u rotirajućem dijelu proračunske domene rješavaju se koristeći relativnu brzinu rotacijskog elementa. Stoga je potrebno modificirati korištene RANS jednadžbe te dodati članove ubrzanja – centrifugalnu i Coriolisovu silu.

Gledano iz nepomične točke, apsolutna i relativna brzina povezane su jednadžbom [30]:

$$v_i^R = v_i^I - \varepsilon_{ijk} \Omega_j r_k \quad (58)$$

pri čemu je Ω_i vektor kutne brzine, r_k je vektor udaljenosti, a nadindeksi I i R označavaju inercijski te relativni koordinatni sustav.

3.11. Metoda virtualnog diska

Metoda virtualnog diska temelji se na principu modeliranja broskog vijka kao pogonskog diska. Takav način modeliranja broskog vijka praktičan je u situacijama kada se poznaju njegove karakteristike, a traži se njegov utjecaj na okolinu [30].

Unutar programskog paketa STAR-CCM+ trenutno postoje četiri metode koje se mogu primijeniti za virtualni disk:

- „Body force“ metoda,
- „Blade element“ metoda,
- „1D momentum“ metoda te
- korisnički definirana metoda.

Virtualni disk potrebno je postaviti na mjesto gdje se nalazi broski vijak te definirati njegove dimenzije u skladu s broskim vijkom. Virtualni disk zapravo predstavlja cilindar kroz koji struji fluid te unutar kojeg dolazi do prirasta tlaka pri čemu se troši snaga. U ovome radu korištena je „Body force“ metoda opisana u nastavku.

3.12. „Body force“ metoda

„Body force“ metoda služi za modeliranje rada broskog vijka iza trupa broda. Metoda modelira učinke polja sustrujanja, koji nastaje u interakciji trupa broda i broskog vijka, tako da modelira silu poriva kao jednu od sila koje djeluju na brod. Prednosti ove metode su mogućnost primjene manjeg broja ćelija proračunske mreže te jednostavnija priprema numeričkih simulacija u kojoj broski vijak fizički ne rotira. Proračunsko vrijeme je tako manje nego kod numeričkih simulacija u kojima je broski vijak diskretiziran. Potrebno je uzeti u obzir kako je ova metoda dobra za analizu propulzijskih značajki, ali ne daje uvid u strujanje oko vijka [30].

Za korištenje „Body Force“ metode, potrebni su sljedeći podaci:

- definicija položaja virtualnog diska i smjer u kojem djeluje poriv,
- dijagram slobodne vožnje broskog vijka (K_T , K_Q , J , η_o),
- radna točka broskog vijka,
- položaj presjeka na kojem se računa srednja brzina nastrojavanja fluida na vijak.

Iz navedenih podataka se računa sila ovisna o radijusu uzrokovana radom broskog vijka u aksijalnom i tangencijalnom smjeru koja djeluje na protok fluida kroz virtualni disk. Integracija navedenih sila po disku vijka daje poriv i moment vijka.

3.13. Verifikacija rezultata

Za određivanje vrste konvergencije rezultata te za računanje pogreške i nesigurnosti numeričke simulacije potrebno je provesti verifikaciju rezultata. U ovom radu verifikacija rezultata provedena je za tri geometrijske mreže i tri vremenska koraka primjenom dva modela turbulencije. Razlike između rezultata $\varepsilon_{i,21}$ i $\varepsilon_{i,32}$ računaju se prema [32]:

$$\varepsilon_{i,21} = \hat{S}_{i,2} - \hat{S}_{i,1} \quad (59)$$

$$\varepsilon_{i,32} = \hat{S}_{i,3} - \hat{S}_{i,2} \quad (60)$$

pri čemu je $\hat{S}_{i,1}$ rezultat dobiven finom diskretizacijom, $\hat{S}_{i,2}$ srednjom, a $\hat{S}_{i,3}$ grubom.

Omjer konvergencije R_i definira se kao:

$$R_i = \frac{\varepsilon_{i,21}}{\varepsilon_{i,32}} \quad (61)$$

Po izračunatom omjeru konvergencije određuje se vrsta konvergencije. Konvergencija može biti:

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

Postupak određivanja nesigurnosti U_i ovisno o tipu konvergencije prikazan je u nastavku.

Nesigurnost \bar{U}_i izražena postotkom računa se kako slijedi:

$$\bar{U}_i, \% = \frac{U_i}{\hat{S}_{i,1}} \cdot 100 \quad (62)$$

Ukupna nesigurnost numeričke simulacije računa se pomoću sljedećeg izraza:

$$\bar{U}_{SN} = \sqrt{\bar{U}_G^2 + \bar{U}_T^2} \quad (63)$$

pri čemu je \bar{U}_{SN} ukupna nesigurnost numeričke simulacije, \bar{U}_G je nesigurnost gustoće geometrijske mreže, a \bar{U}_T je nesigurnost vremenskog koraka.

3.13.1. Monotona konvergencija

Ukoliko dobiveni omjer konvergencije ukazuje na monotonu konvergenciju, pogreška i nesigurnost određuju se metodom Richardsonove ekstrapolacije. Greška $\delta_{RE_{i,1}}^{*(1)}$ određuje se sljedećim izrazom [32]:

$$\delta_{RE_{i,1}}^{*(1)} = \frac{\mathcal{E}_{i,21}}{r_i^{p_i} - 1} \quad (64)$$

pri čemu je r_i ujednačeni omjer profinjenja, a i se odnosi na ulazni parametar, tj. gustoću geometrijske mreže ili veličinu vremenskog koraka.

Red točnosti p_i računa se kao:

$$p_i = \frac{\ln(\mathcal{E}_{i,32} / \mathcal{E}_{i,21})}{\ln(r_i)} \quad (65)$$

Koristeći dobivenu grešku može se izračunati nesigurnost numeričke simulacije za slučaj monotone konvergencije pomoću izraza:

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

pri čemu je F_S faktor sigurnosti koji prema [32] iznosi 1,25.

3.13.2. Oscilatorna konvergencija

Ukoliko je riječ o oscilatornoj konvergenciji nesigurnost se računa prema izrazu [32]:

$$U_i = \frac{1}{2}(S_U - S_L) \quad (67)$$

pri čemu je S_U najveći, a S_L najmanji rezultat numeričke simulacije.

3.13.3. Divergencija

U slučaju divergencije nesigurnost se računa prema sljedećoj formuli [32]:

$$U_i = F_S |S_U - S_L| \quad (68)$$

3.14. Validacija rezultata

U ovome radu validacija rezultata provodi se uspoređujući rezultate dobivene numeričkim simulacijama s eksperimentalno dobivenim rezultatima:

$$RD, \% = \frac{\varphi_{RDF} - \varphi_{EKSP}}{\varphi_{EKSP}} \cdot 100 \quad (69)$$

gdje je RD relativno odstupanje, φ_{RDF} predstavlja rješenje dobiveno primjenom numeričke simulacije, a φ_{EKSP} predstavlja rješenje dobiveno eksperimentalnim putem.

4. PRIPREMA NUMERIČKIH SIMULACIJA

Priprema numeričke simulacije podrazumijeva unos modela (npr. broda ili broskog vijka) u odabrani programski paket. Zatim je potrebno kreirati domenu unutar koje se nalazi model na čijim granicama je potrebno definirati rubne uvjete numeričke simulacije. Potom je potrebno diskretizirati domenu. Diskretizacija podrazumijeva podjelu domene na određeni broj konačnih volumena odnosno ćelija koje tvore geometrijsku mrežu. Temeljna postavka diskretizacije je osnovna veličina ćelije. Što je geometrijska mreža finija to su potrebni veći računalni resursi te je zbog toga potrebno dobro procijeniti kako i gdje profiniti mrežu. Profinjenja geometrijske mreže vrše se koristeći volumetrijske kontrole. U ovom radu, volumetrijske kontrole postavljene su u skladu s preporukama [30]. Nadalje, potrebno je postaviti fizikalni model koji opisuje strujanje fluida te se konačno postavljaju parametri rješavača.

4.1. Numeričke simulacije pokusa slobodne vožnje vijka

U ovom poglavlju prikazana je priprema numeričkih simulacija pokusa slobodne vožnje vijka. Dan je korišten model, kreirana je domena, provedena je diskretizacija, postavljeni su rubni uvjeti, odabran je fizikalni model te su definirani parametri rješavača.

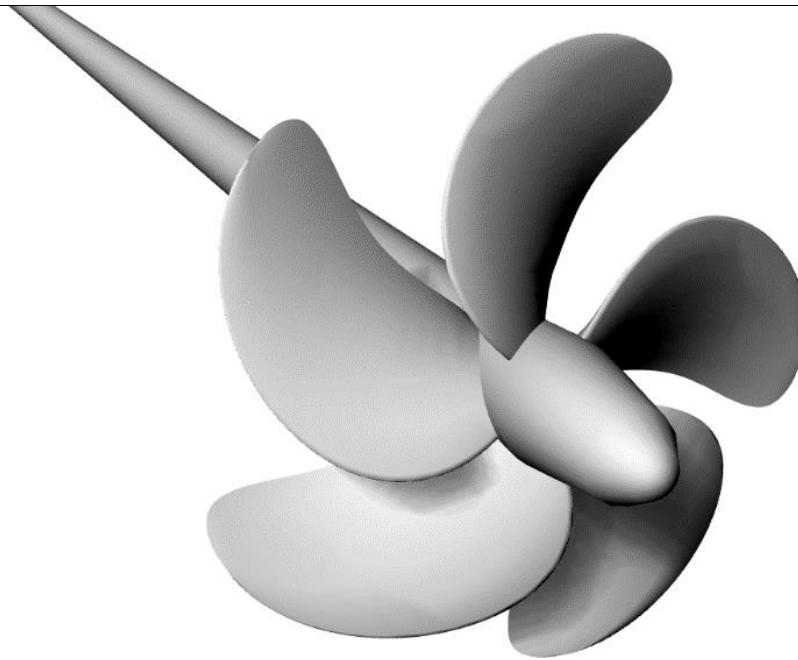
4.1.1. Ulaz u STAR-CCM+

U tablici 1. prikazane su glavne značajke desnokretnog broskog vijka pri čemu je Z broj krila vijka, A_E raširena površina vijka, A_0 površina diska vijka, P uspon vijka, a d je promjer glavine.

Tablica 1. Glavne značajke broskog vijka

Značajka	Vrijednost
Z	5
D	8,911 m
A_E/A_0	0,8
P/D	0,959
d/D	0,176

Na slici 10. prikazan je brodski vijak modeliran u računalnom programu Rhinoceros. Model vijka DTC broda dostupan je u literaturi u modelskoj veličini. Dostupnom modelu broskog vijka nadodana je hidrodinamička kapa i vratilo te je skaliran na veličinu u naravi. Koristeći Rhinoceros, datoteka se sprema u obliku prilagođenom za programski paket STAR-CCM+ te se unosi pomoću naredbe unosa površinske diskretizirane mreže (eng. *import surface mesh*).

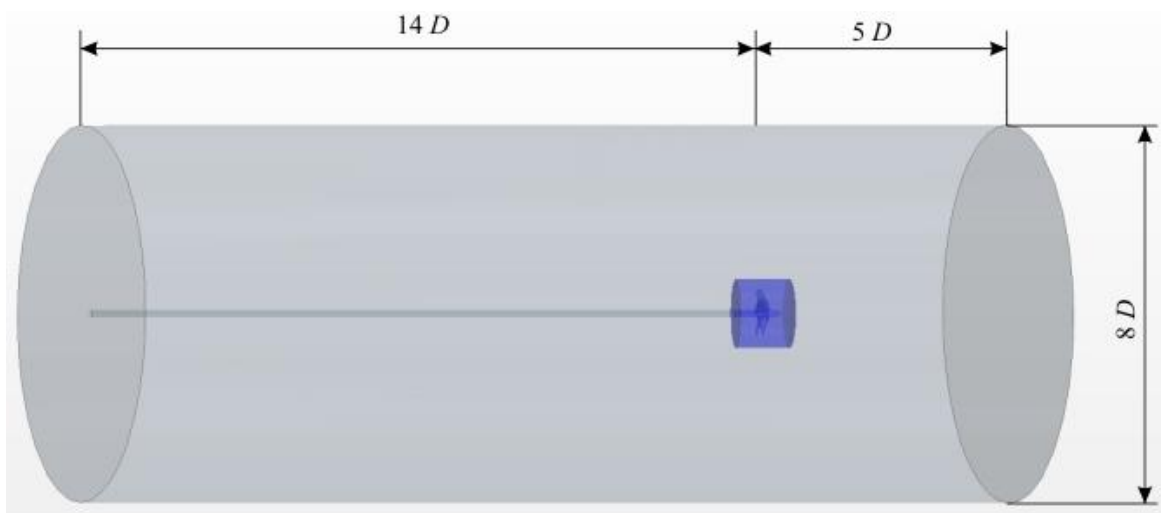


Slika 10. Model vijka DTC broda

4.1.2. Kreiranje domene

Za potrebe numeričkih simulacija potrebno je kreirati domenu unutar koje se nalazi model brodskog vijka. Domena se kreira tako da se prvo napravi dio (eng. *part*) u geometrijskom obliku cilindra od kojeg se potom naredbom boolean oduzimanja (eng. *boolean subtract*) oduzima uneseni dio brodskog vijka i vratila. Dobiveni dio predstavlja domenu unutar koje se modelira strujanje fluida. Domenu je potrebno diskretizirati te postaviti rubne uvjete što je opisano u sljedećim poglavljima.

Na slici 11. prikazana je proračunska domena za numeričku simulaciju pokusa slobodne vožnje vijka te njezine dimenzije.



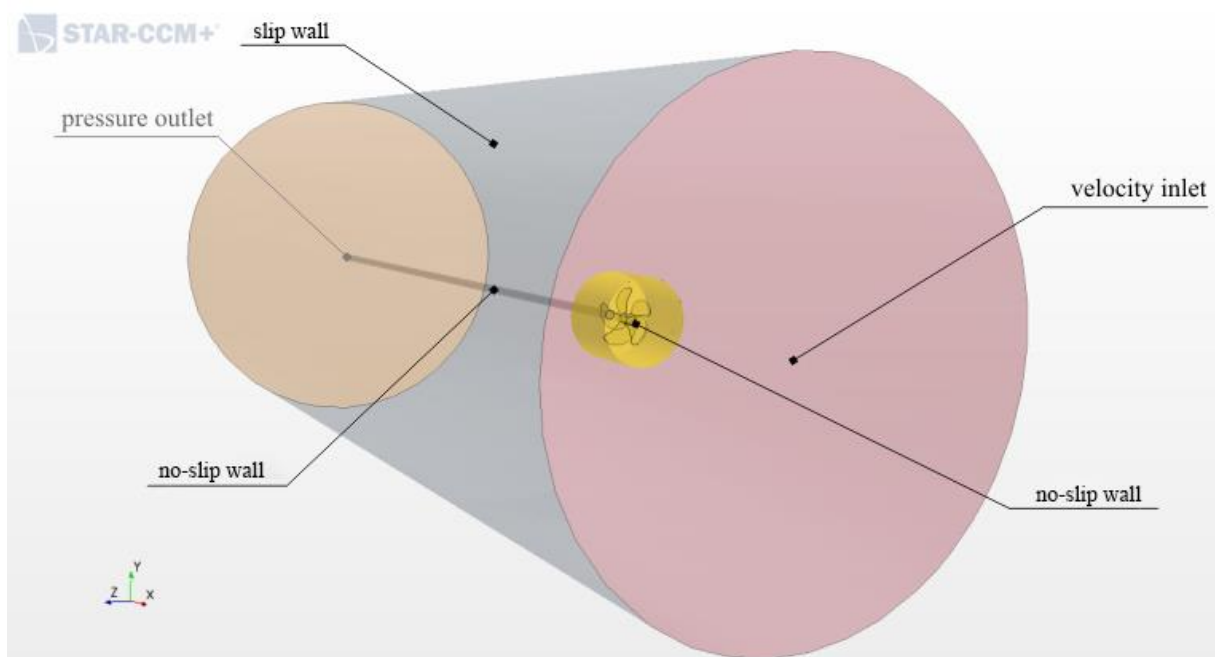
Slika 11. Dimenzije domene numeričkih simulacija pokusa slobodne vožnje vijka

Domena je oblika cilindra promjera $8D$. Ispred vijka cilindar je dug $5D$, a iza vijka $14D$. Dimenzije su odabrane u skladu s preporukama [30].

Domena se dijeli na stacionarni i rotirajući dio zbog upotrebe metode višestrukih referentnih sustava (MRF). Rotirajući dio domene označen je plavom bojom na slici 11. Ostatak domene označen sivom bojom predstavlja stacionarni dio domene.

4.1.3. Rubni uvjeti

Prije diskretizacije geometrijske mreže, potrebno je domenu podijeliti na površine (eng. *regions*). Za svaku površinu potrebno je odrediti njen rubni uvjet. Na slici 12. prikazane su površine i odabrani rubni uvjeti. Na broskom vijku te na vratilu je postavljen rubni uvjet zida na čijoj je stijenci brzina jednaka nuli (eng. *no-slip wall*). Na plaštu cilindra domene postavljen je uvjet zida na čijoj stijenci brzina nije jednaka nuli (eng. *slip wall*). Na ulaznoj granici domene, iz koje nastrojava fluid na vijak, postavljen je rubni uvjet temeljen na brzini strujanja na ulazu (eng. *velocity inlet*), a na izlaznoj granici postavljen je rubni uvjet temeljen na tlaku na izlazu (eng. *pressure outlet*). Kao početni uvjet postavljena je brzina strujanja na ulazu definirana preko v_A koja je definirana kao umnožak J i konstantnih vrijednosti n i D . Koeficijent napredovanja definiran je tako da se numerička simulacija provodi od $J = 0,1$ do $J = 0,8$ s korakom $0,1$. Za svaki koeficijent napredovanja provedeno je 3000 iteracija. Ovako veliki broj iteracija za svaki koeficijent napredovanja odabran je za postizanje povoljne konvergencije rezultata.



Slika 12. Rubni uvjeti u numeričkim simulacijama pokusa slobodne vožnje vijka

4.1.4. Diskretizacija geometrijske mreže

Geometrijska mreža generirana je koristeći automatski diskretizator domene (eng. *automated mesh*) dostupan u programskom paketu STAR-CCM+. Korišteni su sljedeći alati za diskretizaciju domene:

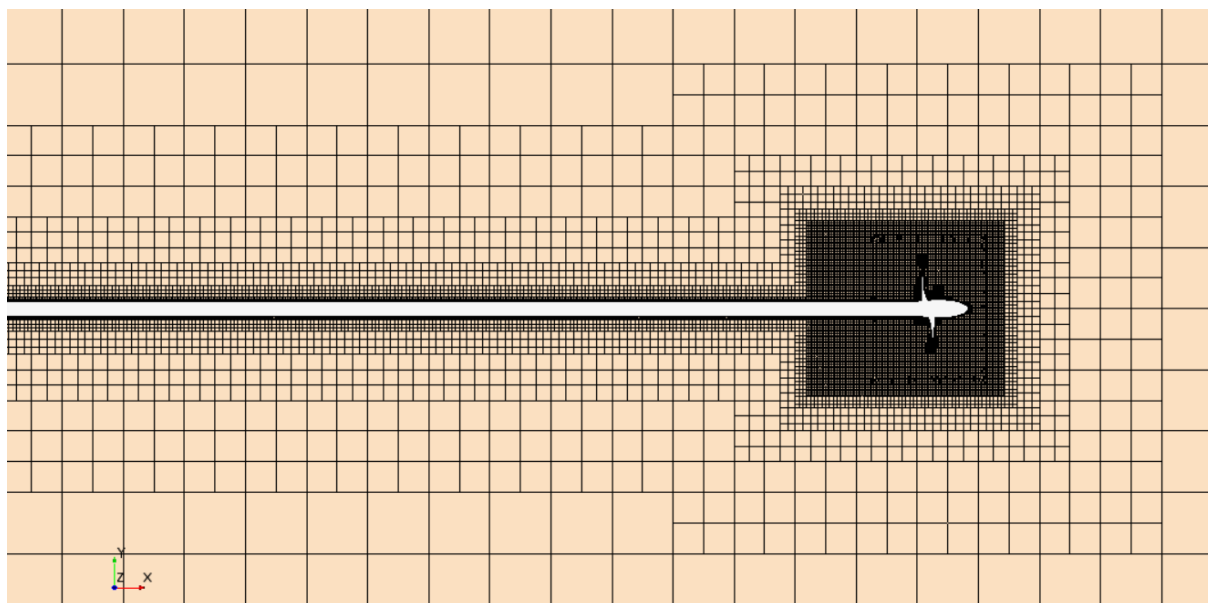
- diskretizator površine (eng. *surface remesher*),
- diskretizator slojeva prizmi (eng. *prism layer mesher*),
- diskretizator izrezanih ćelija (eng. *trimmed cell mesher*),
- automatski popravak površine (eng. *automatic surface repair*).

U tablici 2. prikazane su detaljnije odabrane postavke diskretizacije u skladu s preporukama [30].

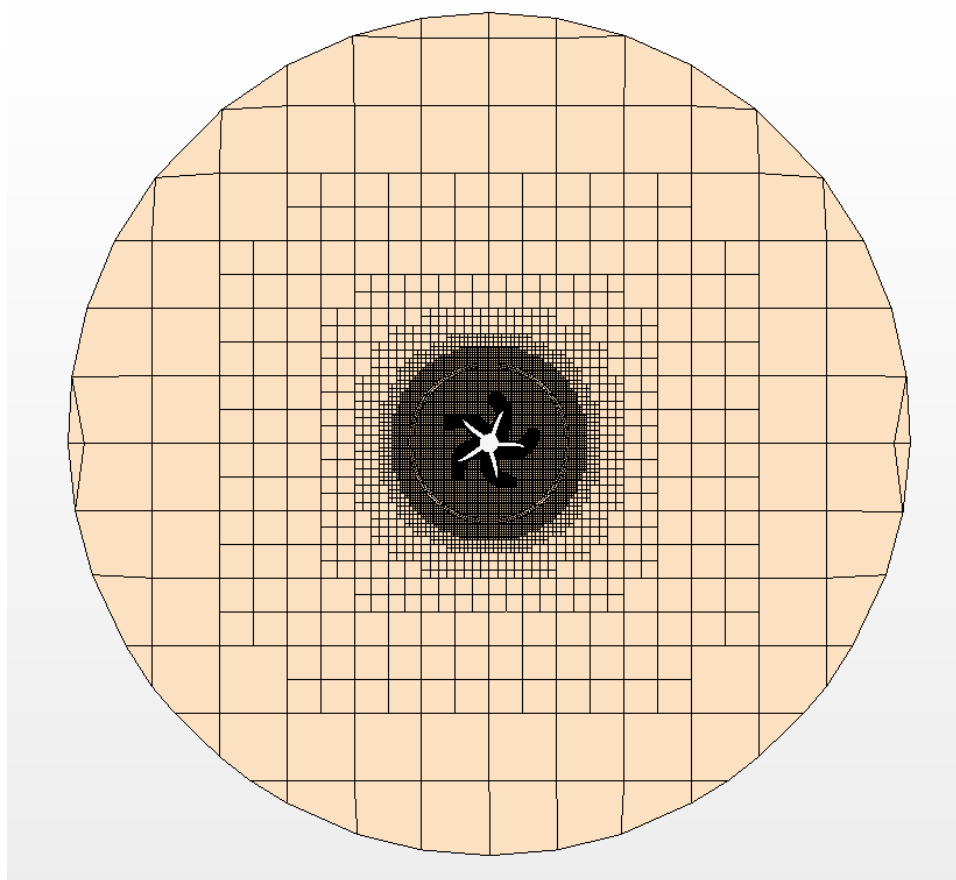
Tablica 2. Postavke diskretizacije numeričkih simulacija pokusa slobodne vožnje vijka

Svojstvo	Opcija	Vrijednost
Osnovna veličina (eng. <i>base size</i>)	Vrijednost	0,35 m
Automatsko popravljnje površine	Minimalna neposredna blizina	0,05
Maksimalna veličina ćelije	Postotak osnovne veličine	10000%
Broj slojeva graničnog sloja	Broj	10
Rastezanje graničnog sloja	Koeficijent	1,5
Ukupna debljina graničnog sloja	Postotak osnovne veličine	20%
Zakrivljenost površine	Broj točaka u krugu	36
Minimalna veličina površine	Postotak osnovne veličine	0,5%
Ciljana veličina površine	Postotak osnovne veličine	100%
Stopa rasta	Zadana stopa rasta	Srednje
Stopa rasta	Stopa rasta granice	Isključeno

Nakon što su zadane postavke diskretizacije geometrijske mreže u programskom paketu STAR-CCM+, odabire se naredba generiranja geometrijske mreže (eng. *generate volume mesh*). Što su postavke geometrijske mreže finije, to je više vremena potrebno računalu za izvršiti naredbu. Na slici 13. prikazan je rezultat diskretizacije domene kao presjek geometrijske mreže na $z = 0$ m, a na slici 14. kao presjek na $x = 1,5$ m pri čemu je ishodište koordinatnog sustava postavljeno u središtu vijka. Na slikama je vidljiv veliki broj malih ćelija neposredno uz vijak te postepeno povećavanje ćelija što je veća udaljenost od vijka.

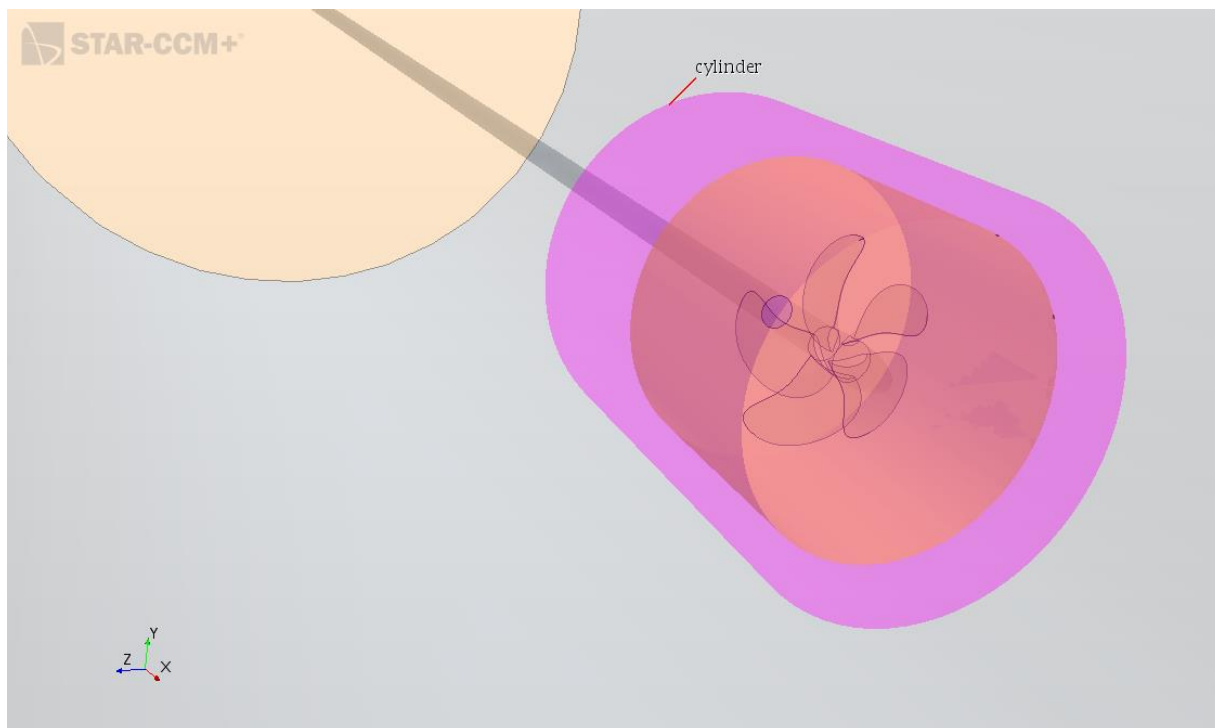


Slika 13. Presjek geometrijske mreže numeričkih simulacija pokusa slobodne vožnje vijka na $z = 0$ m



Slika 14. Presjek geometrijske mreže numeričkih simulacija pokusa slobodne vožnje vijka na $x = 1,5$ m

Na slici 15. prikazana je volumetrijska kontrola profinjenja korištena u ovoj numeričkoj simulaciji. Oko broskog vijka napravljen je cilindar dovoljno velik da obujmi rotirajući dio domene. Kao postavka volumetrijske kontrole veličina ćelije definirana je kao 50% osnovne veličine ćelije.



Slika 15. Volumetrijska kontrola oko broskog vijka

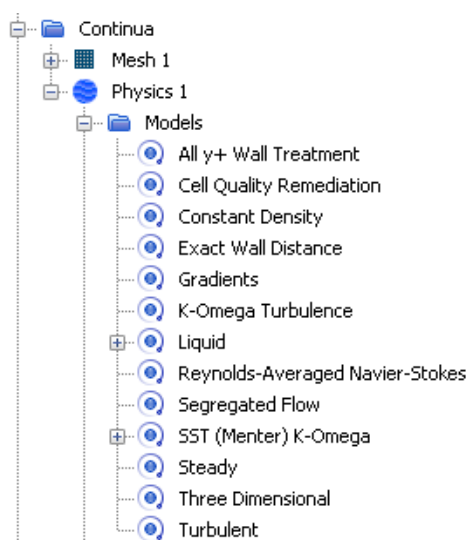
U tablici 3. dan je broj ukupan ćelija dobiven diskretizacijom proračunske domene te broj ćelija u statičkom i rotirajućem dijelu domene.

Tablica 3. Broj ćelija u statičkom i rotirajućem dijelu domene

Geometrijska mreža	Broj ćelija
Ukupan broj ćelija	3567252
Statički dio	821194
Rotirajući dio	2746058

4.1.5. Unos fizikalnog modela

Na slici 16. prikazan je odabrani fizikalni model numeričkih simulacija pokusa slobodne vožnje unutar programskog paketa. Trodimenzijsko, viskozno strujanje fluida konstantne gustoće modelirano je RANS jednadžbama primjenom dva modela turbulencije. Na istoj slici je prikazan odabrani $k-\omega$ SST model turbulencije, a numeričke simulacije su provedene koristeći taj model i realizable $k-\varepsilon$ model. Odabran je „All $y+$ Wall Treatment“ model te odvojeni rješavač za brzinu i tlak (eng. *segregated flow*) koji rješava jednadžbe strujanja za svaku komponentu brzine i tlaka pojedinačno [30]. Također je odabrana metoda ispravljanja kvalitete ćelija (eng. *cell quality remediation*), koja omogućava dobivanje točnijeg konačnog rješenja, jer ne uzima u obzir rezultate dobivene za određeni broj nekvalitetno diskretiziranih ćelija [30]. Numeričke simulacije pokusa slobodne vožnje vijka postavljene su kao stacionarne.



Slika 16. Odabran fizikalni model za pokus slobodne vožnje

4.1.6. Postavljanje parametara rješavača

Prije pokretanja numeričke simulacije potrebno je postaviti parametre rješavača. Kao kriterij završetka numeričke simulacije odabran je maksimalan broj koraka simulacije koji je postavljen na 24000, jer je za jedan koeficijent napredovanja potrebno provesti 3000 iteracija, a simulacije se provode od $J = 0,1$ do $J = 0,8$ s korakom 0,1. Podrelaksacijski faktor (eng. *under-relaxation factor*) za brzinu postavljen je kao 0,5, a za tlak kao 0,1. Podrelaksacijski faktor za model turbulencije postavljen je kao 0,8, a za turbulentnu viskoznost kao 1,0. Maksimalni omjer turbulentne viskoznosti postavljen je na 5 milijuna. Podrelaksacijski faktori odabrani su variranjem različitih vrijednosti te odabirom onih koji daju najbolju konvergenciju rezultata.

4.2. Numeričke simulacije pokusa otpora

U ovom poglavlju prikazana je priprema numeričkih simulacija pokusa otpora. Dan je korišteni model, kreirana je domena, provedena je diskretizacija, postavljeni su rubni uvjeti, odabran je fizikalni model te su definirani parametri rješavača.

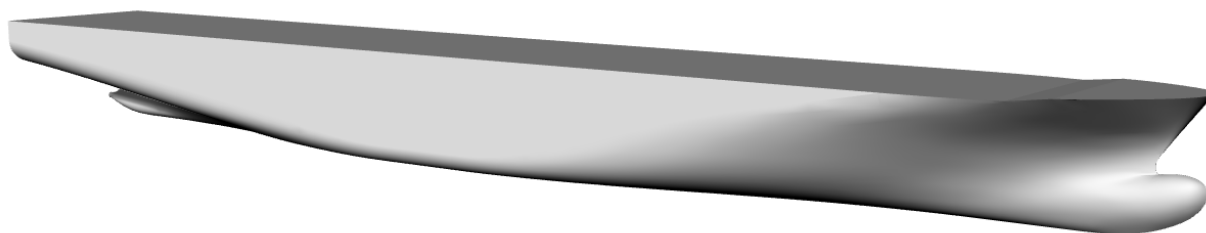
4.2.1. Ulaz u STAR-CCM+

U tablici 4. prikazane su glavne značajke DTC broda u naravi pri čemu je B širina broda, L_{pp} duljina između okomica, T gaz, Δ istisnina, C_B koeficijent punoće, a S oplakana površina trupa.

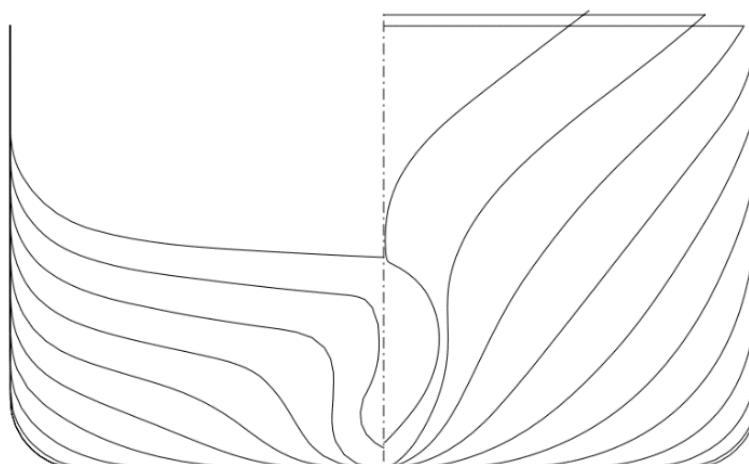
Tablica 4. Glavne značajke DTC broda

Značajka	Vrijednost
L_{pp}	355 m
B	51 m
T	14,5 m
Δ	177866 t
C_B	0,661
S	22032 m ²

Kao kod modela brodskog vijka, DTC model broda skaliran je na stvarnu veličinu primjenom programa Rhinoceros. Na slici 17. prikazan je DTC model broda, a na slici 18. dan je njegov nacrt rebara.



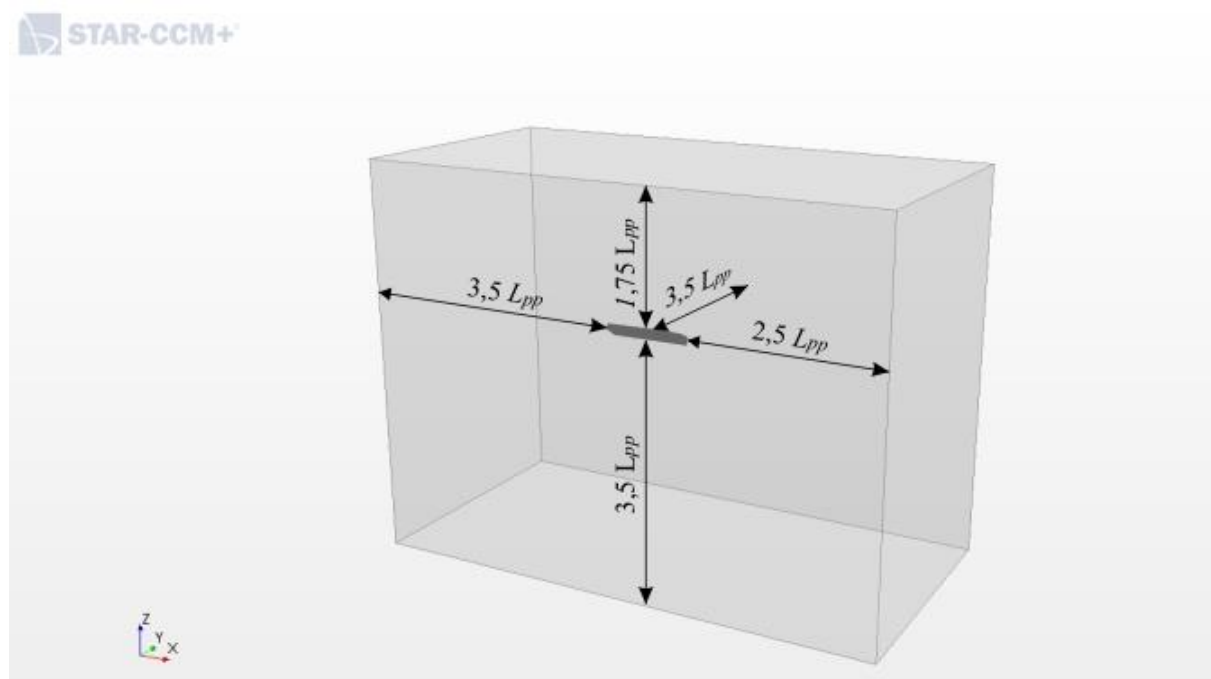
Slika 17. DTC model broda



Slika 18. Nacrt rebara DTC broda [33]

4.2.2. Kreiranje domene

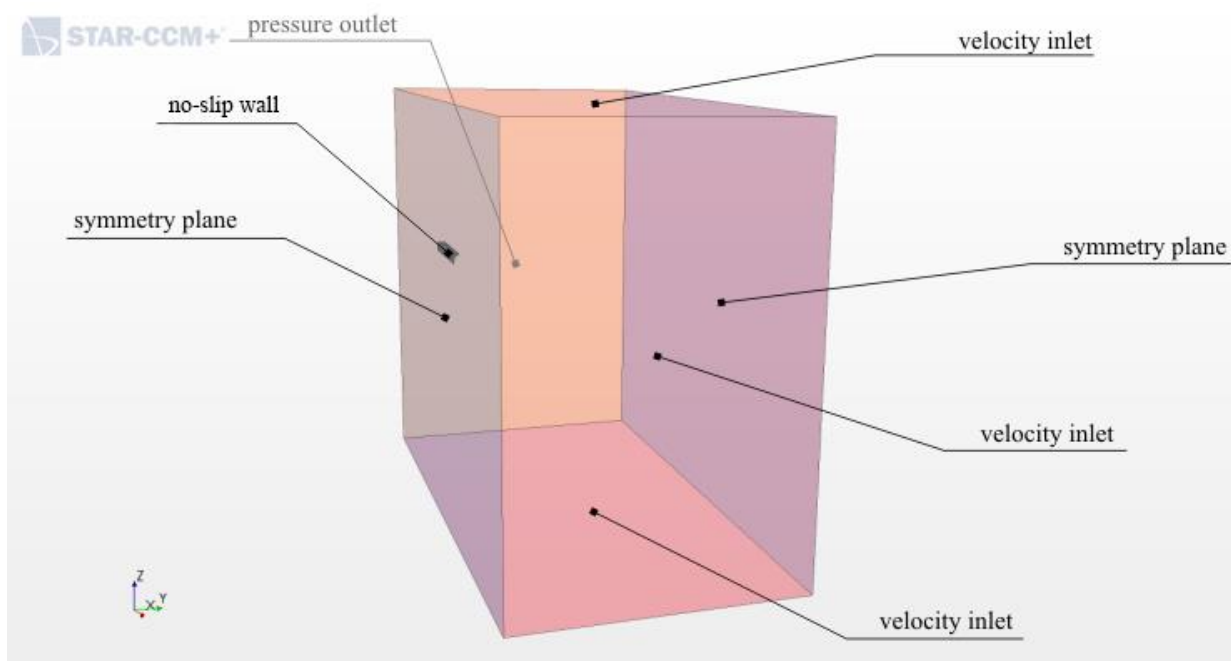
Numeričke simulacije pokusa otpora provedene su uz primjenu uvjeta simetrije te je stoga modelirana samo polovica proračunske domene. Na slici 19. prikazana je domena i njene dimenzije postavljene u skladu s preporukama [30]. Ulazna granica domene postavljena je $2,5L_{pp}$ ispred broda, izlazna granica $3,5L_{pp}$ iza broda, gornja granica $1,75L_{pp}$ iznad broda, donja granica $3,5L_{pp}$ ispod broda, a bočna granica $3,5L_{pp}$ bočno od broda. Svakoj pojedinoj stranici domene potrebno je zadati rubni uvjet što je opisano u nastavku.



Slika 19. Dimenzije domene numeričkih simulacija pokusa otpora

4.2.3. Rubni uvjeti

Odabrani rubni uvjeti numeričkih simulacija pokusa otpora prikazani su na slici 20. Na trupu broda postavljen je rubni uvjet zida na čijoj je stijenci brzina jednaka nuli (eng. *no-slip wall*). Na ulaznoj granici domene, iz koje je postavljeno da fluid nastrujava na brod, postavljen je rubni uvjet temeljen na brzini strujanja na ulazu (eng. *velocity inlet*). Isti rubni uvjet postavljen je i na gornjoj te na donjoj granici domene. Na izlaznoj stranici domene postavljen je rubni uvjet temeljen na tlaku na izlazu (eng. *pressure outlet*). Na uzdužnoj ravnini broda i bočnoj stranici domene postavljen je rubni uvjet simetrije (eng. *symmetry plane*). Prije početka simulacije, nema nikakvog strujanja fluida u domeni. U trenutku pokretanja simulacije, kroz ulaznu granicu domene počinje nastrujavati fluid na brod. Zadana brzina predstavlja početni uvjet numeričkih simulacija. Numeričke simulacije pokusa otpora provedene su za dva Froudeova broja, $Fn = 0,174$ i $Fn = 0,218$.



Slika 20. Rubni uvjeti u numeričkim simulacijama pokusa otpora

4.2.4. Diskretizacija geometrijske mreže

Za provedbu verifikacije rezultata dobivenih numeričkim simulacijama pokusa otpora korištene su tri geometrijske mreže različitih gustoća. Verifikacija geometrijske mreže provedena je pri $Fn = 0,218$. Sve postavke diskretizacije su iste za sve tri geometrijske mreže osim osnovne veličine ćelije. U tablici 5. su prikazane postavke diskretizacije za finu geometrijsku mrežu.

Tablica 5. Postavke diskretizacije numeričkih simulacija pokusa otpora za finu mrežu

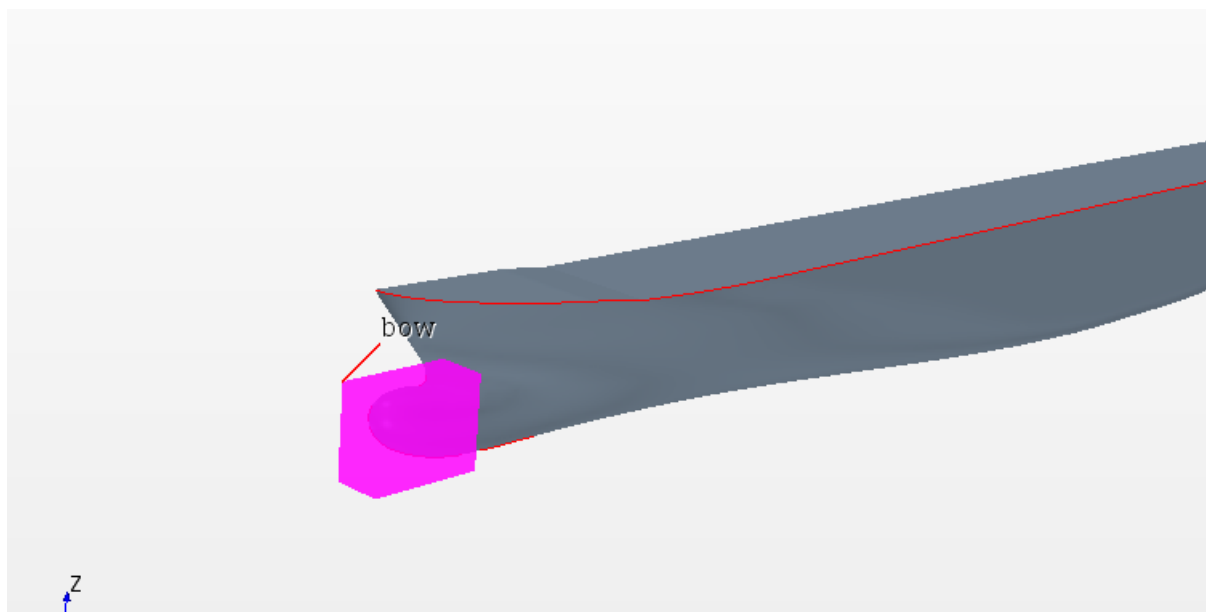
Svojtvo	Opcija	Vrijednost
Osnovna veličina (eng. <i>base size</i>)	Vrijednost	3,35 m
Automatsko popravljanje površine	Minimalna neposredna blizina	0,001
Maksimalna veličina ćelije	Postotak osnovne veličine	1600%
Broj slojeva graničnog sloja	Broj	12
Rastezanje graničnog sloja	Koeficijent	1,8
Ukupna debljina graničnog sloja	Postotak osnovne veličine	22%
Zakrivljenost površine	Broj točaka u krugu	36
Minimalna veličina površine	Postotak osnovne veličine	6,25%
Ciljana veličina površine	Postotak osnovne veličine	50%
Stopa rasta	Zadana stopa rasta	Sporo
Stopa rasta	Stopa rasta granice	Sporo

U tablici 6. su prikazane odabrane vrijednosti osnovne veličine ćelije za tri mreže različitih gustoća.

Tablica 6. Osnovna veličina ćelija za tri mreže različitih gustoća

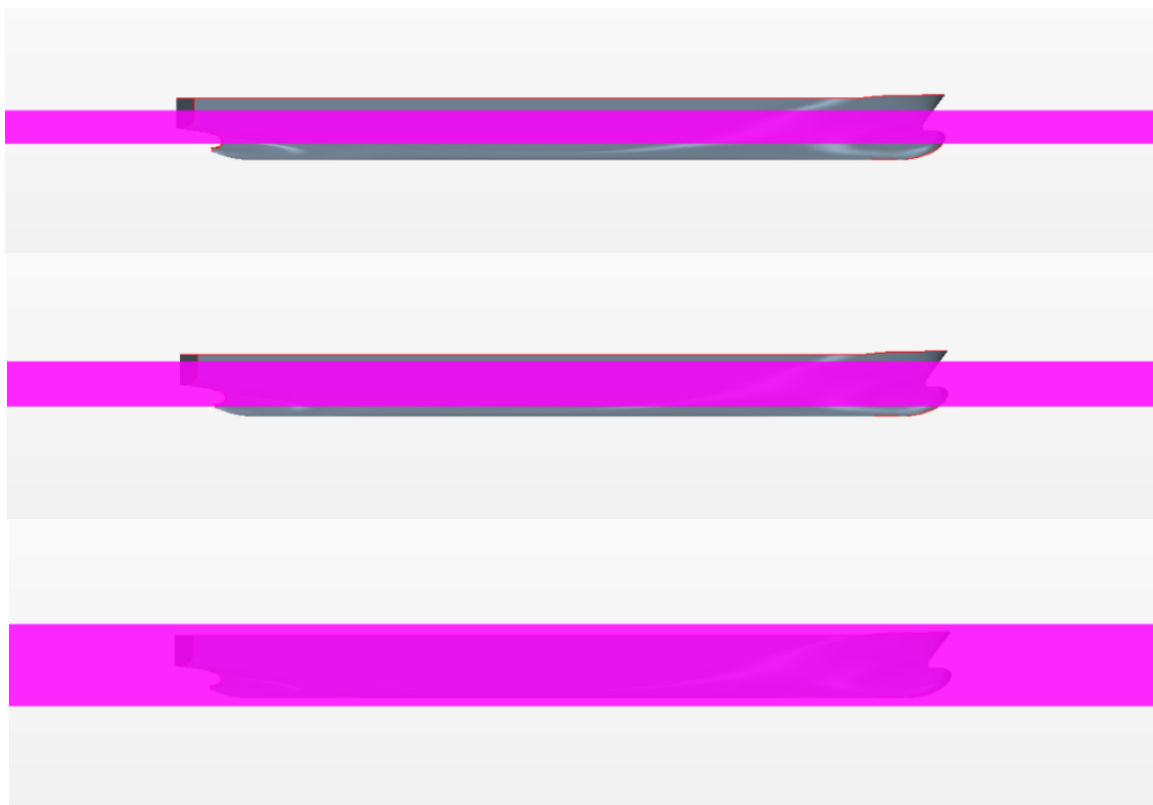
Mreža	Gruba mreža	Srednja mreža	Fina mreža
Osnovna veličina ćelije	6,50 m	4,61 m	3,35 m

Za što točnije opisivanje strujanja oko broda potrebno je geometrijsku mrežu ispravno diskretizirati. Tako je na određenim područjima domene potrebno profiniti mrežu, što se radi primjenom volumetrijskih kontrola. Profinjenja se uglavnom vrše na područjima velikih gradijenata brzine ili tlaka. U nastavku je dan pregled primijenjenih volumetrijskih kontrola prema preporukama [30].



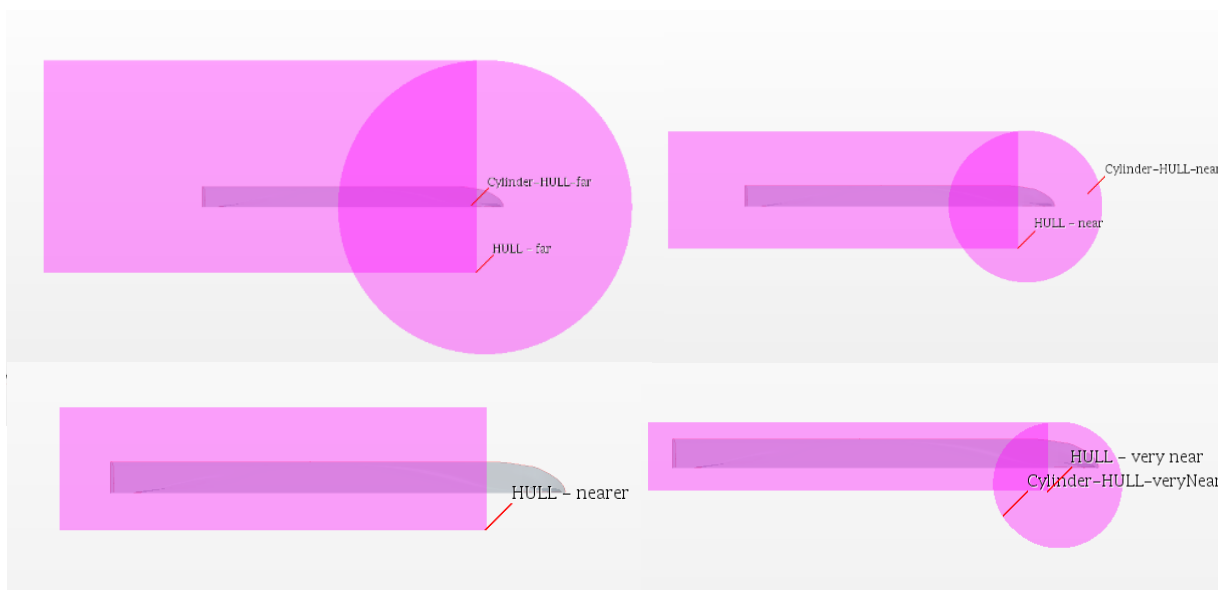
Slika 21. Volumetrijske kontrole na pramcu broda

Na slici 21. je prikazana volumetrijska kontrola postavljena na pramcu modela broda. Navedeno područje potrebno je profiniti zbog zakrivljenosti trupa broda na koji nastrujava fluid. Veličina ćelije u tom području postavljena je kao 12,5% osnovne veličine ćelije.



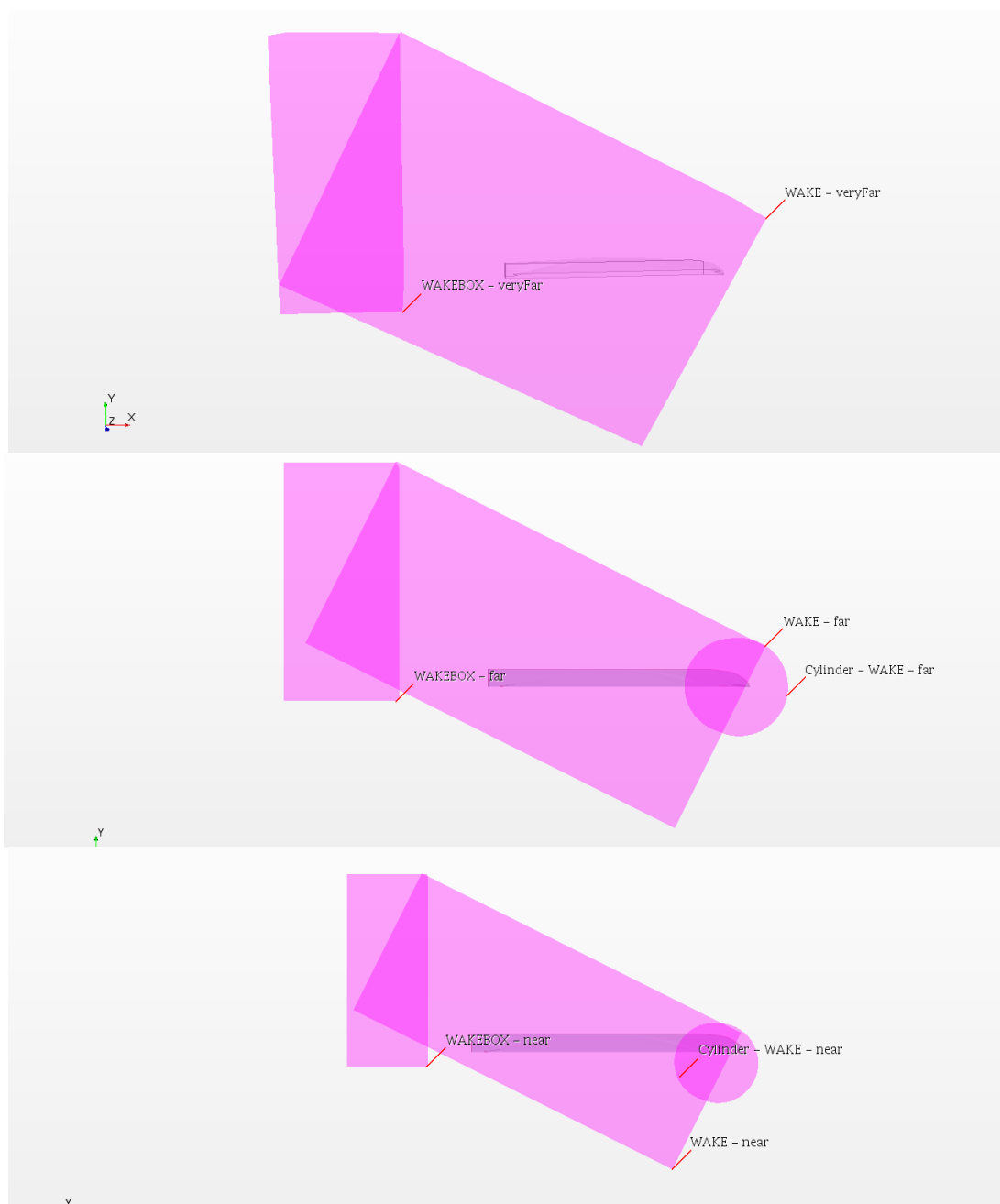
Slika 22. Volumetrijske kontrole na slobodnoj površini

Na slici 22. prikazane su tri različite volumetrijske kontrole postavljene s ciljem profinjnja mreže u području očekivane slobodne površine. Najvećoj volumetrijskoj kontroli zadana je veličina ćelije u vertikalnom smjeru kao 50% osnovne veličine ćelije, srednjoj volumetrijskoj kontroli kao 25% osnovne veličine ćelije, a najmanjoj volumetrijskoj kontroli kao 12,5% osnovne veličine ćelije. Sve tri volumetrijske kontrole imaju zadanu veličinu ćelije u horizontalnom smjeru kao 800% osnovne veličine ćelije.



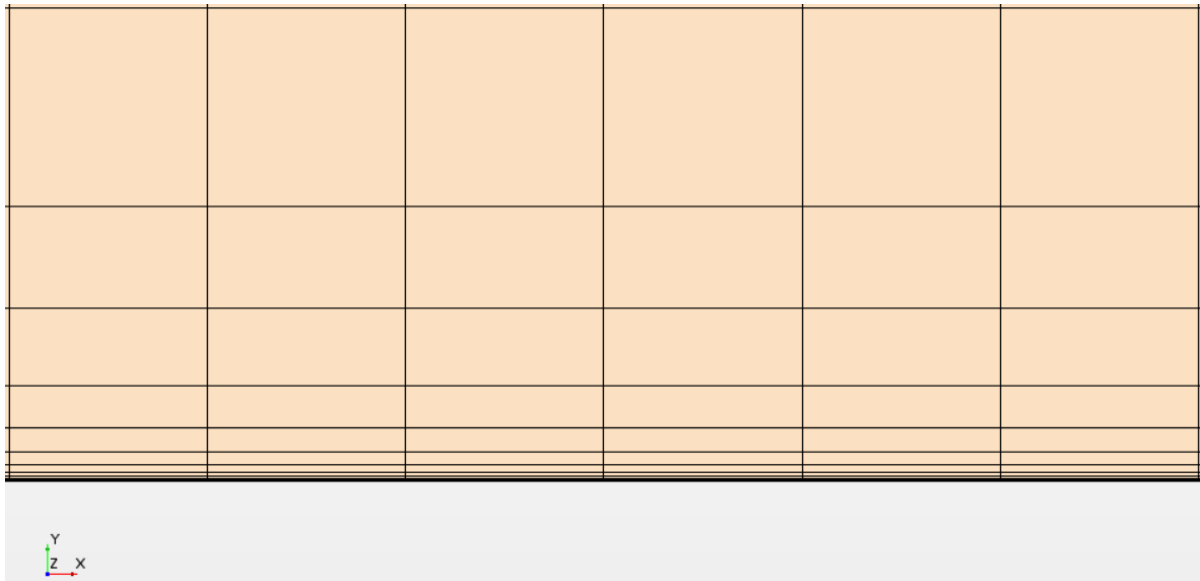
Slika 23. Volumetrijske kontrole oko trupa broda

Na slici 23. prikazane su volumetrijske kontrole oko trupa broda postavljene zbog velikih gradijenata brzine i tlaka u tom području. Najvećoj volumetrijskoj kontroli zadana je veličina ćelije u vertikalnom smjeru kao 200% osnovne veličine ćelije te kao 400% osnovne veličine ćelije u horizontalnom smjeru. Sljedećoj volumetrijskoj kontroli po veličini zadana je veličina ćelije kao 100% osnovne veličine ćelije u vertikalnom smjeru te kao 200% osnovne veličine ćelije u horizontalnom smjeru. Slijedi volumetrijska kontrola kojoj je zadana veličina ćelije kao 50% osnovne veličine ćelije u vertikalnom smjeru te kao 100% osnovne veličine ćelije u horizontalnom smjeru. Najmanjoj volumetrijskoj kontroli sve stranice ćelije postavljene se kao 50% osnovne veličine ćelije.



Slika 24. Volumetrijske kontrole za obuhvaćanje Kelvinovog kuta

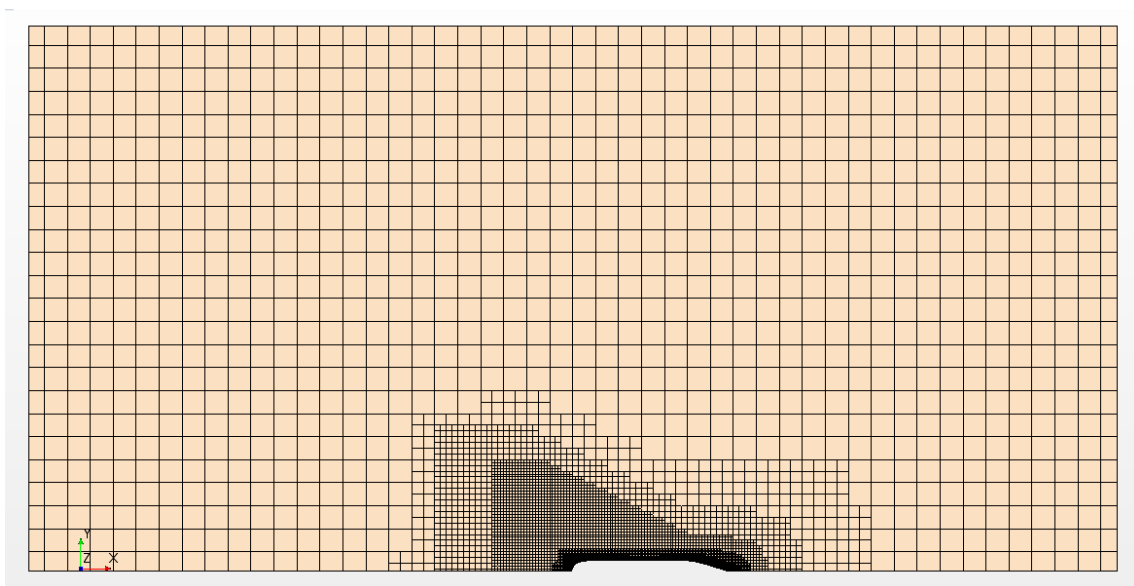
Na slici 24. prikazane su volumetrijske kontrole namijenjene profinjenju geometrijske mreže s ciljem obuhvaćanja Kelvinovog kuta. Veličina ćelije za najveću volumetrijsku kontrolu postavljena je kao 400% osnovne veličine ćelije. Sljedećoj po veličini volumetrijskoj kontroli zadana je veličina ćelije kao 200% osnovne veličine ćelije. Najmanjoj volumetrijskoj kontroli zadana je veličina ćelije kao 100% osnovne veličine ćelije.



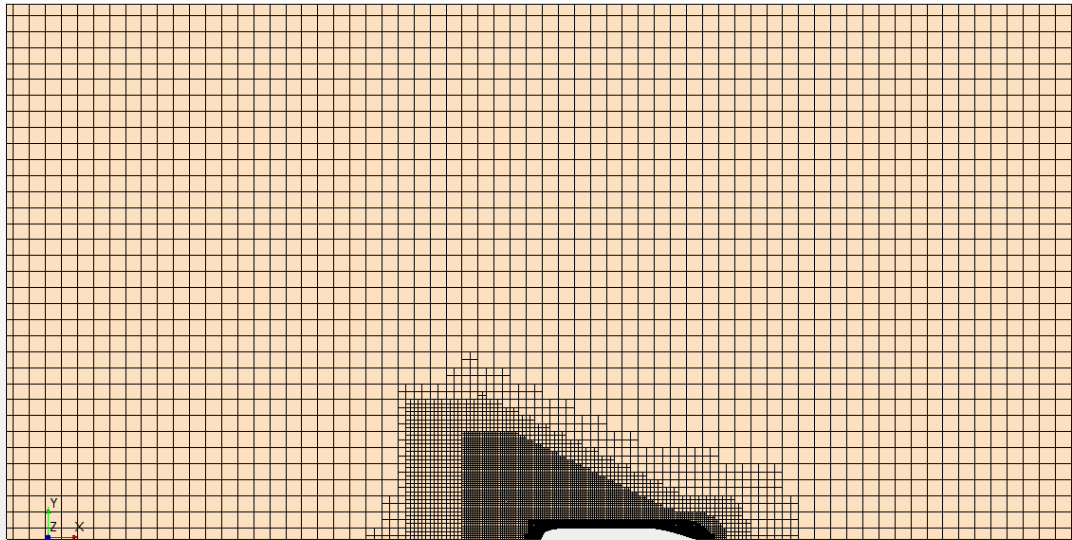
Slika 25. Diskretizacija graničnog sloja na trupu broda dobivena primjenom fine geometrijske mreže

Na slici 25. prikazan je rezultat diskretizacije graničnog sloja uz trup modela broda koristeći finu geometrijsku mrežu. Na slici je vidljivo da je zadovoljen uvjet prema preporuci [30], koji nalaže da ćelije trebaju postepeno rasti od manjih prema većima.

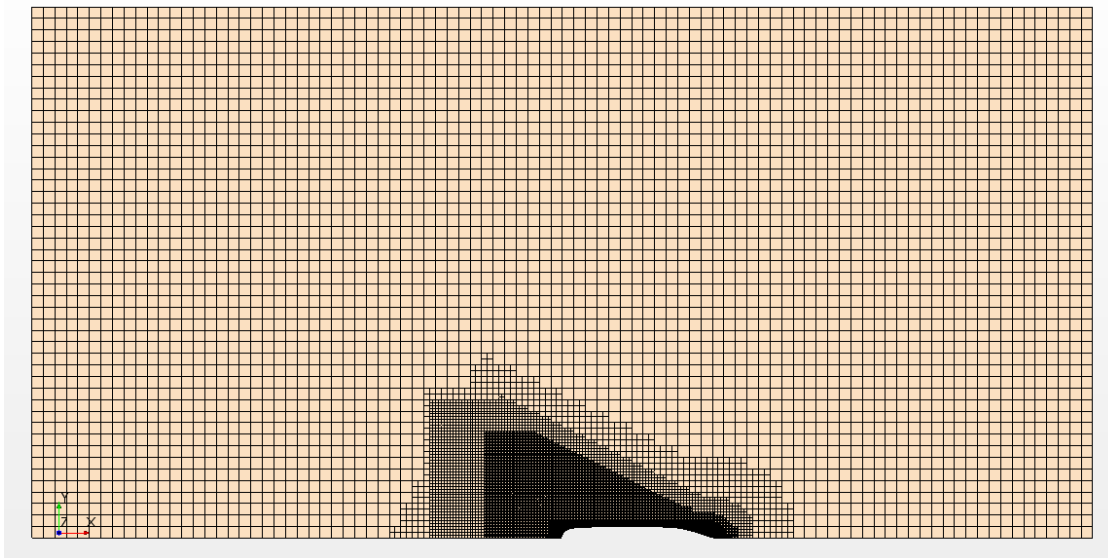
Na slikama 26. do 28. prikazani su presjeci dobivenih geometrijskih mreža na $z = 0$ m, pri čemu je ishodište koordinatnog sustava postavljeno na krmenoj okomici na slobodnoj površini. Na slici 26. je prikazana gruba geometrijska mreža, na slici 27. srednja geometrijska mreža, a na slici 28. fina geometrijska mreža.



Slika 26. Presjek grube geometrijske mreže na $z = 0$ m



Slika 27. Presjek srednje geometrijske mreže na $z = 0$ m



Slika 28. Presjek fine geometrijske mreže na $z = 0$ m

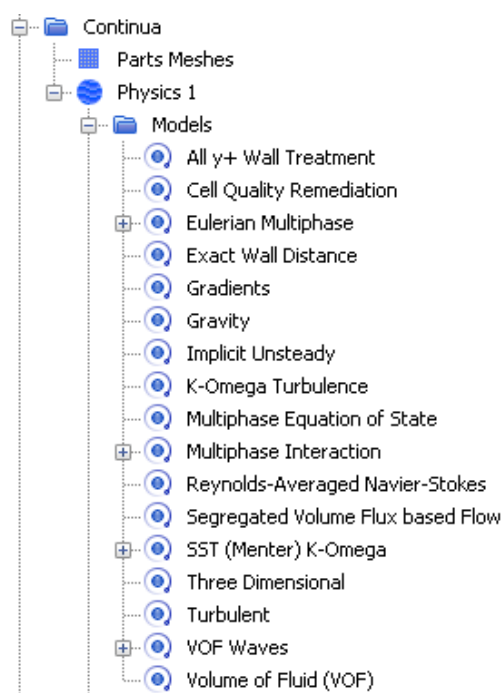
U tablici 7. prikazan je dobiveni broj ćelija diskretizacijom domene koristeći tri različite osnovne veličine ćelija. Broj ćelija grube mreže približno je dvostruko veći od broja ćelija srednje mreže, a broj ćelija fine mreže približno je dvostruko veći od broja ćelija srednje mreže.

Tablica 7. Broj ćelija koristeći različite gustoće mreža

Geometrijska mreža	Broj ćelija
Gruba mreža	531695
Srednja mreža	1044969
Fina mreža	2093342

4.2.5. Unos fizikalnog modela

Na slici 29. prikazan je odabrani fizikalni model numeričkih simulacija pokusa otpora unutar programskog paketa STAR-CCM+. Na slici je prikazan $k-\omega$ SST model turbulencije, a numeričke simulacije su provedene primjenom $k-\omega$ SST i realizable $k-\varepsilon$ modela turbulencije. Odabrani fizikalni model uključuje metodu udjela volumena u fluidu (VOF), Eulerov višefazni model (eng. *eulerian multiphase*), unutar kojeg su definirane dvije faze, voda i zrak, te model VOF valova koji podrazumijeva utjecaj gravitacije. Pod modelom VOF valova, definirana je brzina strujanja vode i zraka koja je postavljena pri $Fn = 0,218$ i $Fn = 0,174$. Također, potrebno je postaviti duljinu prigušenja VOF vala (eng. *wave damping length*) te definirati za koje granice vrijedi. Prema [2] za vrijednost duljine prigušenja odabrana je duljina broda između okomica $L_{pp} = 355$ m. Za provedbu prigušenja odabrane su ulazna, izlazna i bočna granica domene. Numeričke simulacije pokusa otpora postavljene su kao nestacionarne. Ostali odabrani modeli odgovaraju već opisanim modelima iz numeričkih simulacija pokusa slobodne vožnje vijka u poglavlju 4.1.5.



Slika 29. Odabran fizikalni model pokusa otpora

4.2.6. Postavljanje parametara rješavača

Zbog nestacionarnosti numeričke simulacije pokusa otpora potrebno je definirati ukupno fizikalno vrijeme, vremenski korak te broj iteracija po jednom vremenskom koraku. Fizikalno vrijeme odabrano je kao $15T$, pri čemu je T period, odnosno vrijeme potrebno da čestica fluida prođe put jednak duljini broda, te se definira kao:

$$T = \frac{L_{pp}}{V} \quad (70)$$

U cilju verifikacije vremenskog koraka, koja je provedena pri $Fn = 0,218$, korištena su tri vremenska koraka pri čemu je grubi vremenski korak definiran kao $T/50$, srednji kao $T/100$, a fini kao $T/200$. Dobivene vrijednosti prikazane su u tablici 8.

Tablica 8. Odabrani vremenski koraci pri $Fn = 0,218$

Vremenski korak	Grubi korak	Srednji korak	Fini korak
Vrijednost	0,552 s	0,276 s	0,138 s

Za numeričku simulaciju pokusa otpora pri $Fn = 0,174$ korišten je fini vremenski korak definiran kao $T/200$ te iznosi 0,17 s.

Odabrani broj iteracija po jednom vremenskom koraku postavljen je na 5. Podrelaksacijski faktor za brzinu postavljen je kao 0,7, a za tlak kao 0,3. Podrelaksacijski faktor za model turbulencije postavljen je kao 0,6, a za turbulentnu viskoznost kao 0,8. Maksimalni omjer turbulentne viskoznosti postavljen je na 5 milijuna.

4.3. Numeričke simulacije pokusa vlastitog pogona

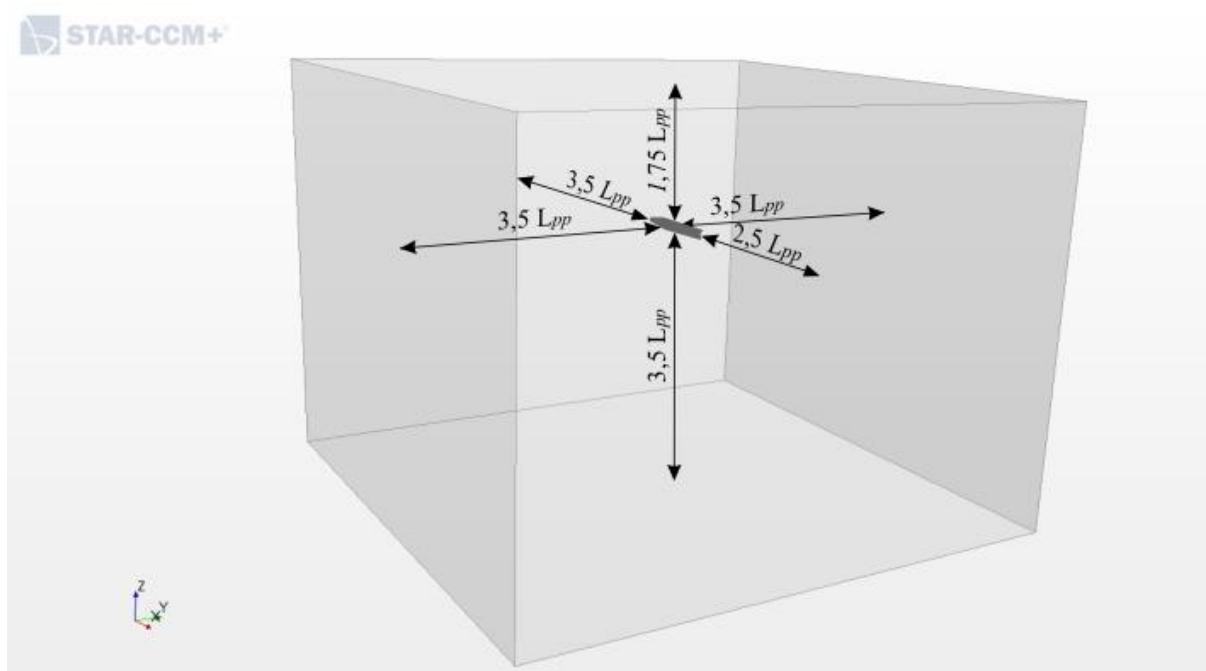
U ovom poglavlju prikazana je priprema numeričkih simulacija pokusa vlastitog pogona. Dan je korišteni model, kreirana je domena, provedena je diskretizacija, postavljeni su rubni uvjeti, odabran je fizikalni model te su definirani parametri rješavača.

4.3.1. Ulaz u STAR-CCM+

Numeričke simulacije pokusa vlastitog pogona provedene su za DTC brod koji je prikazan u poglavlju 4.2.1.

4.3.2. Kreiranje domene

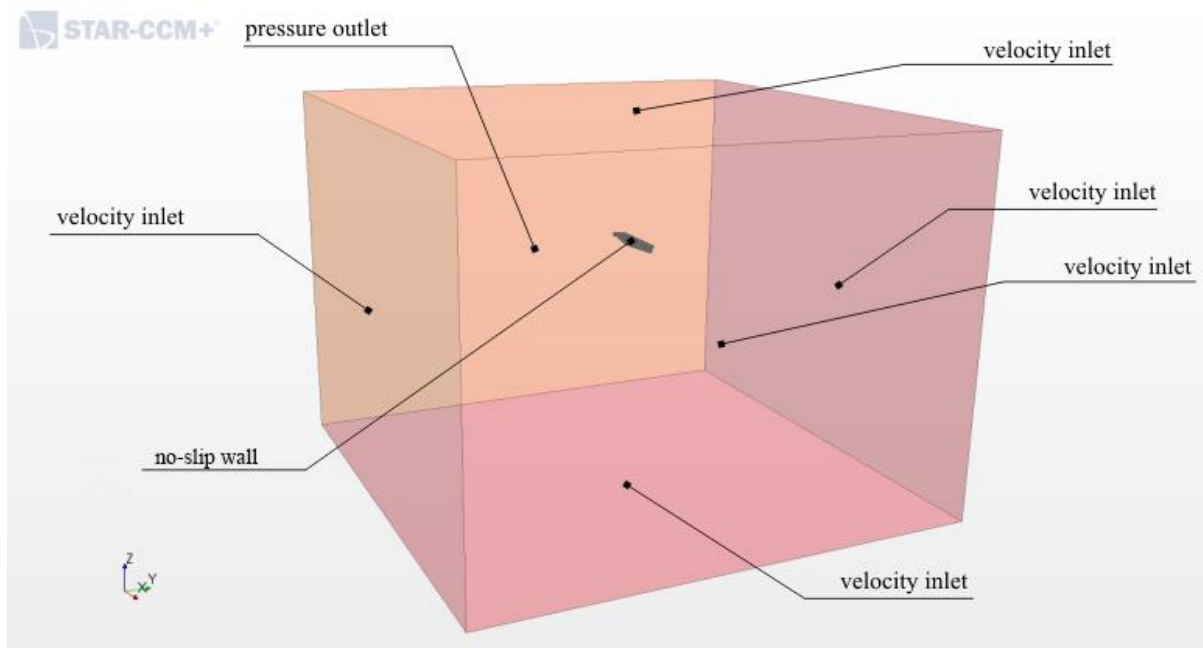
Za razliku od domene korištene u numeričkim simulacijama pokusa otpora prikazane u poglavlju 4.2.2., za potrebe numeričkih simulacija pokusa vlastitog pogona zbog uporabe virtualnog diska potrebno je razmatrati cijeli brod, a ne samo polovicu. Stoga je kreirana cijela domena koja ima sve iste dimenzije kao i u poglavlju 4.2.2. Na slici 30. je prikazana kreirana domena i njezine dimenzije.



Slika 30. Dimenzije domene numeričkih simulacija pokusa vlastitog pogona

4.3.3. Rubni uvjeti

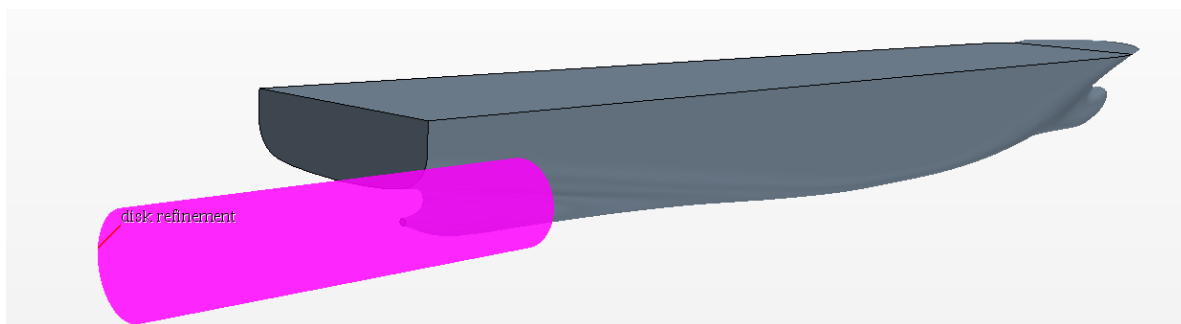
Rubni uvjeti u numeričkim simulacijama pokusa vlastitog pogona postavljeni su na isti način kao i rubni uvjeti u numeričkim simulacijama pokusa otpora prikazani u poglavlju 4.2.3., osim što je na bočnim stranicama domene postavljen rubni uvjeti temeljen na brzini na ulazu (eng. *velocity inlet*). Na slici 31. su prikazane površine i odabrani rubni uvjeti.



Slika 31. Rubni uvjeti u numeričkim simulacijama pokusa vlastitog pogona

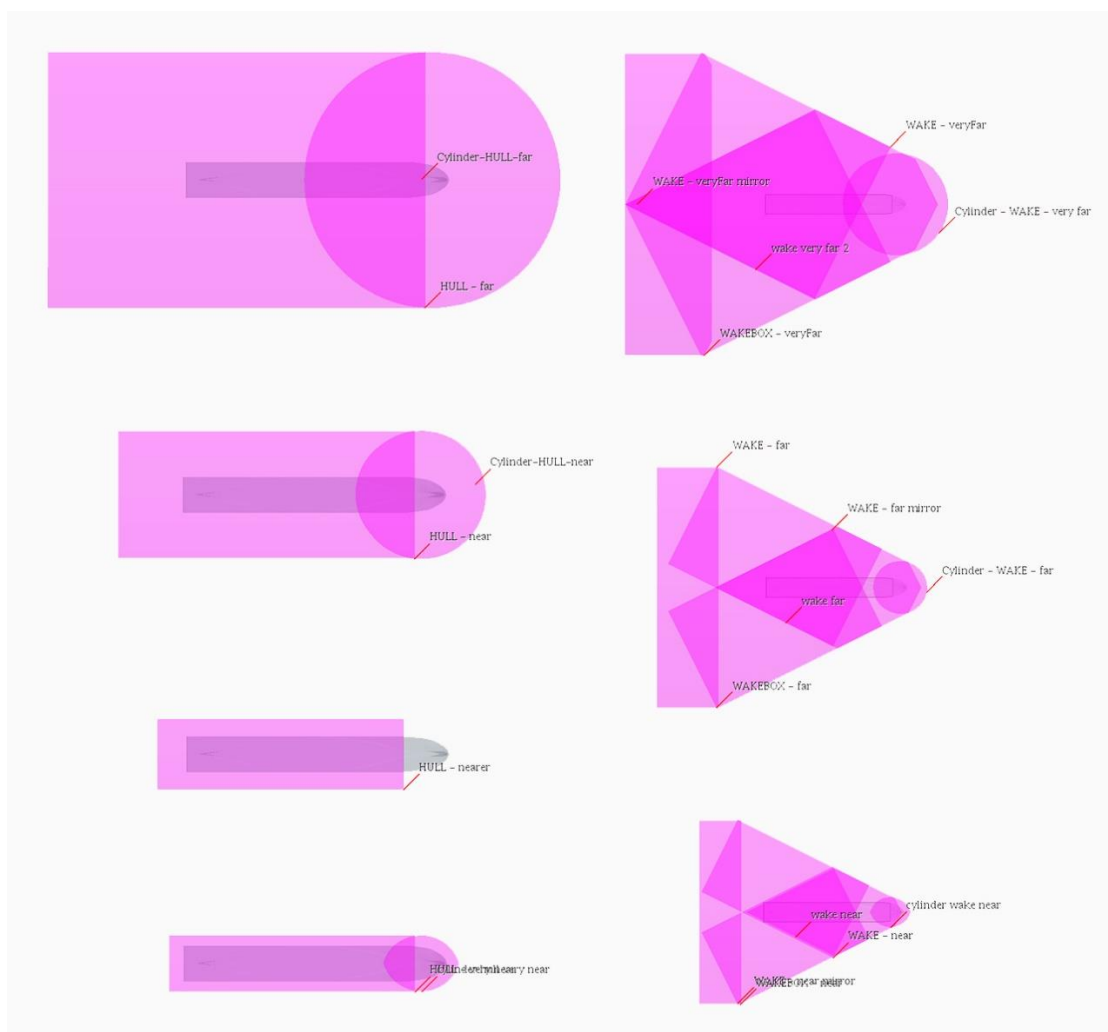
4.3.4. Diskretizacija geometrijske mreže

Domena numeričkih simulacija pokusa vlastitog pogona diskretizirana je na isti način kao i domena za numeričke simulacije pokusa otpora s dodatnom volumetrijskom kontrolom. Na slici 32. prikazana je volumetrijska kontrola za profinjenje područja oko brodskog vijka. Cilindar je radijusa $1,15D$, dužine $4D$ ispred i $7D$ iza brodskog vijka. U navedenom području odabrana je veličina ćelija kao 10% osnovne veličine ćelije.



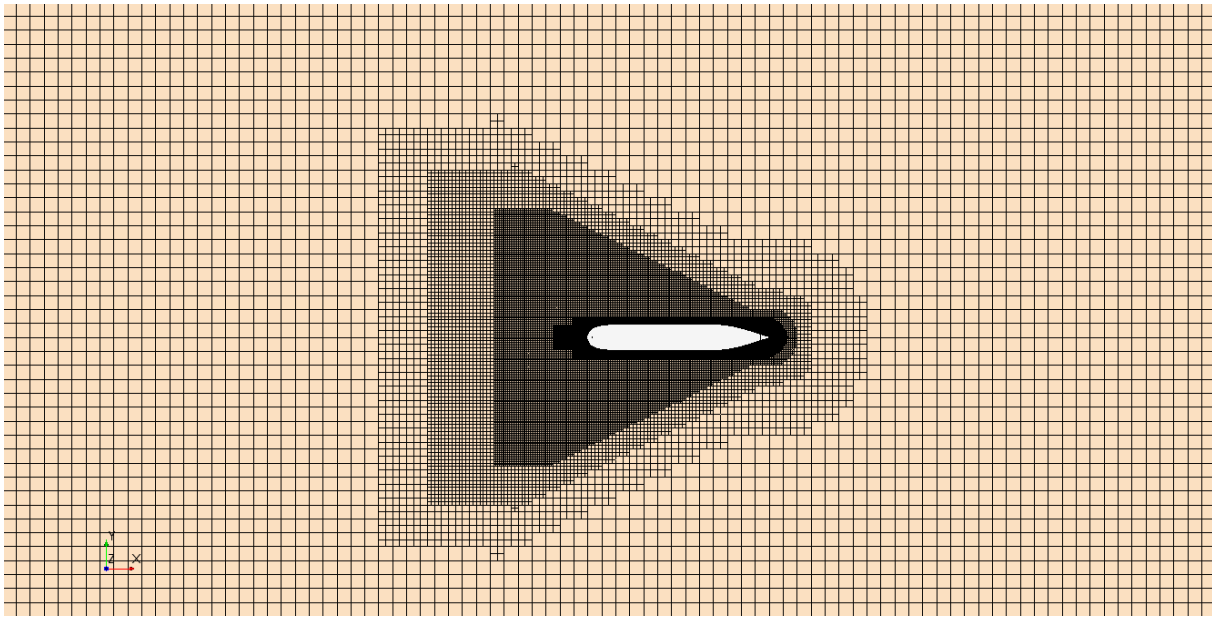
Slika 32. Volumetrijska kontrola u području oko brodskog vijka

Volumetrijske kontrole numeričkih simulacija pokusa vlastitog pogona postavljene su na isti način kao i za numeričku simulaciju pokusa otpora. Određene volumetrijske kontrole su zrcaljane s obzirom na uzdužnu simetralnu ravnine broda. Nove zrcaljane volumetrijske kontrole prikazane su na slici 33. Volumetrijske kontrole na pramcu i na slobodnoj površine iste su kao one u poglavlju 4.2.4. osim što se prostiru kroz cijelu domenu.



Slika 33. Volumetrijske kontrole za numeričke simulacije pokusa vlastitog pogona

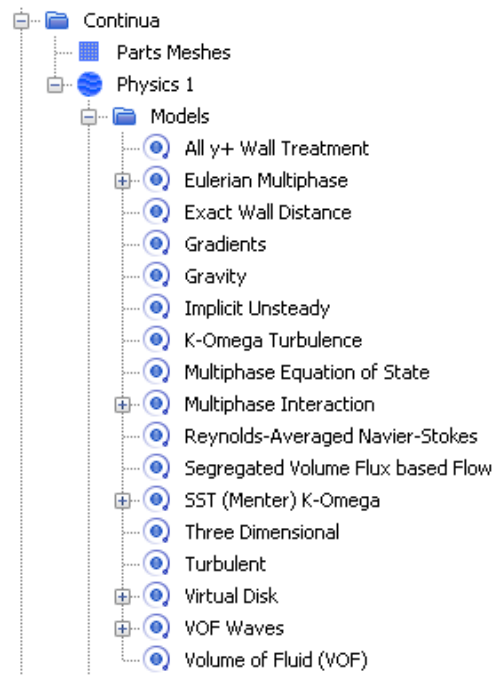
Na slici 34. prikazan je presjek diskretizirane domene na $z = 0$ m. Ukupan broj ćelija geometrijske mreže primijenjene u numeričkim simulacijama pokusa vlastitog pogona iznosi 7,5 milijuna.



Slika 34. Presjek geometrijske mreže na $z = 0$ m

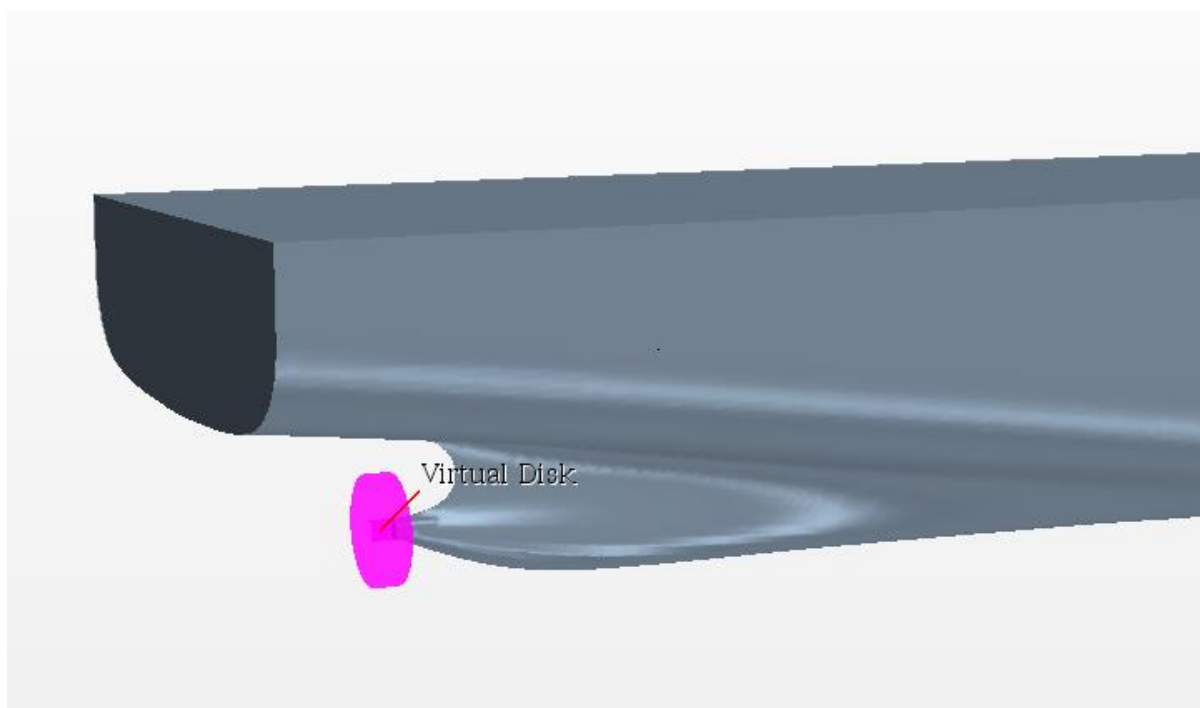
4.3.5. Unos fizikalnog modela

Na slici 35. prikazan je odabrani fizikalni model numeričkih simulacija pokusa vlastitog pogona unutar programskog paketa STAR-CCM+. Odabran fizikalni model isti je kao onaj u poglavlju 4.2.5. osim što je dodan model virtualnog diska.



Slika 35. Odabran fizikalni model pokusa vlastitog pogona

Prilikom postavljanja fizikalnog modela virtualnog diska potrebno je zadati određene ulazne podatke. Najprije, potrebno je definirati metodu virtualnog diska. Odabrana je „Body Force“ metoda. Potom je potrebno unijeti tablicu s ulaznim podacima J , K_T , K_Q i η_o iz dijagrama slobodne vožnje. Zatim je potrebno definirati unutarnji i vanjski radijus broskog vijka, njegovu debljinu te položaj u koordinatnom sustavu. Za opis poriva i momenta odabrana je metoda Goldsteinove optimalne raspodjele. Slijedi postavljenje presjeka na kojem se računa srednja brzina nastrujavanja fluida na virtualan disk (eng. *inflow velocity plane*). Radijus presjeka je definiran kao 10% veći od radijusa virtualnog diska, a presjek je postavljen ispred virtualnog diska na udaljenosti koja odgovara 10% većoj vrijednosti od njegovog promjera. Zaključno je za ulazni podatak radne točke (eng. *operation point input*) odabran poriv. Model virtualnog diska prikazan je na slici 36.



Slika 36. Model virtualnog diska

4.3.6. Postavljanje parametara rješavača

Numerička simulacija pokusa vlastitog pogona provedena je pri dva Froudeova broja te je korišten fini vremenski korak koji pri $Fn = 0,218$ iznosi 0,138 sekundi, a pri $Fn = 0,174$ iznosi 0,17 s.

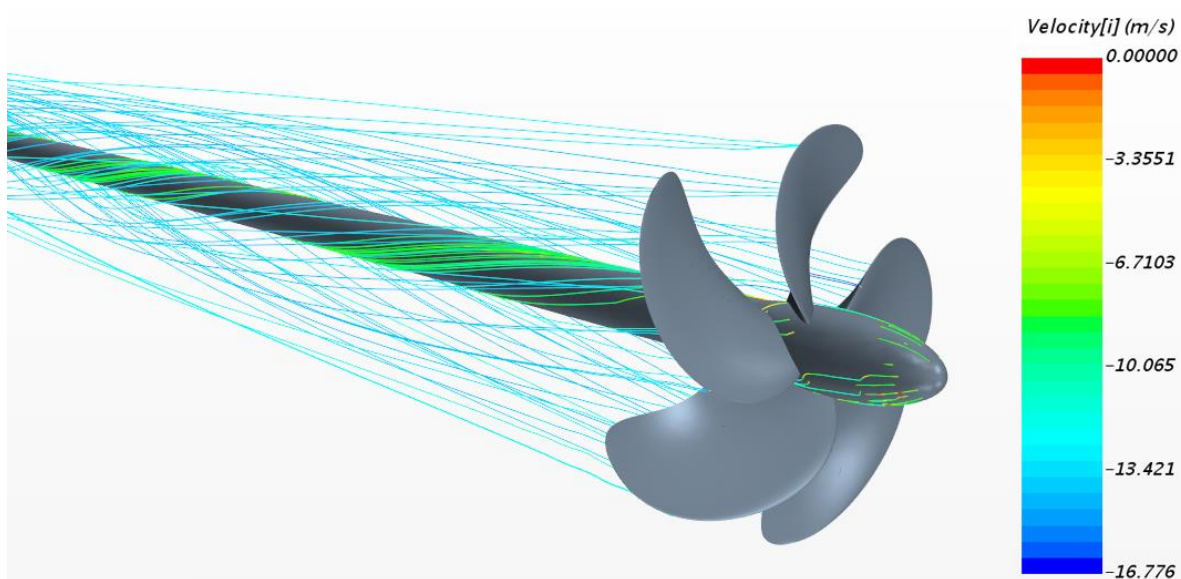
Sve ostale postavke iste su kao i one opisane u poglavlju 4.2.6.

5. REZULTATI

U ovom poglavlju prikazani su rezultati provedenih numeričkih simulacija pokusa otpora, slobodne vožnje vijka i vlastitog pogona. Numeričke simulacije provedene su koristeći dva modela turbulencije, realizable $k-\varepsilon$ i $k-\omega$ SST. Numeričke simulacije pokusa otpora i vlastitog pogona provedene su za dva Froudeova broja, $Fn = 0,218$ i $Fn = 0,174$, dok su numeričke simulacije pokusa slobodne vožnje provedene za koeficijente napredovanja od $J = 0,1$ do $J = 0,8$ s korakom 0,1. Provedena je validacija svih rezultata koristeći rezultate eksperimentalnih ispitivanja ekstrapoliranih na stvarnu veličinu. Verifikacija rezultata provedena je za rezultate numeričkih simulacija pokusa otpora pri $Fn = 0,218$, pri čemu je ispitan utjecaj gustoće geometrijske mreže i veličine vremenskog koraka.

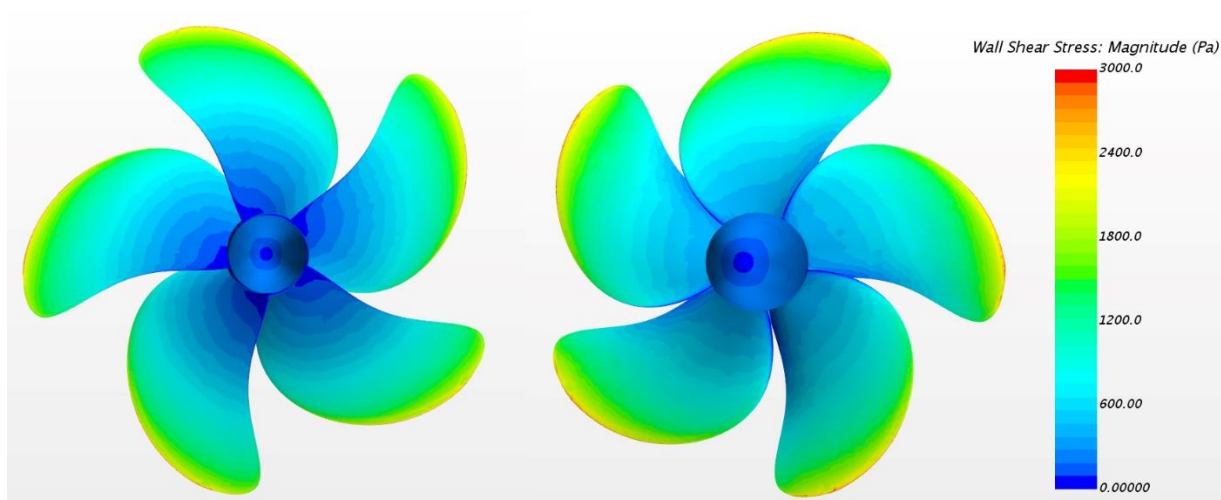
5.1. Rezultati numeričkih simulacija pokusa slobodne vožnje vijka

U ovom poglavlju prikazani su rezultati numeričkih simulacija pokusa slobodne vožnje vijka. Sve slike u ovom poglavlju prikazane su za $J = 0,8$ primjenom $k-\omega$ SST modela turbulencije, budući da su rezultati dobiveni primjenom različitih modela turbulencije međusobno slični.



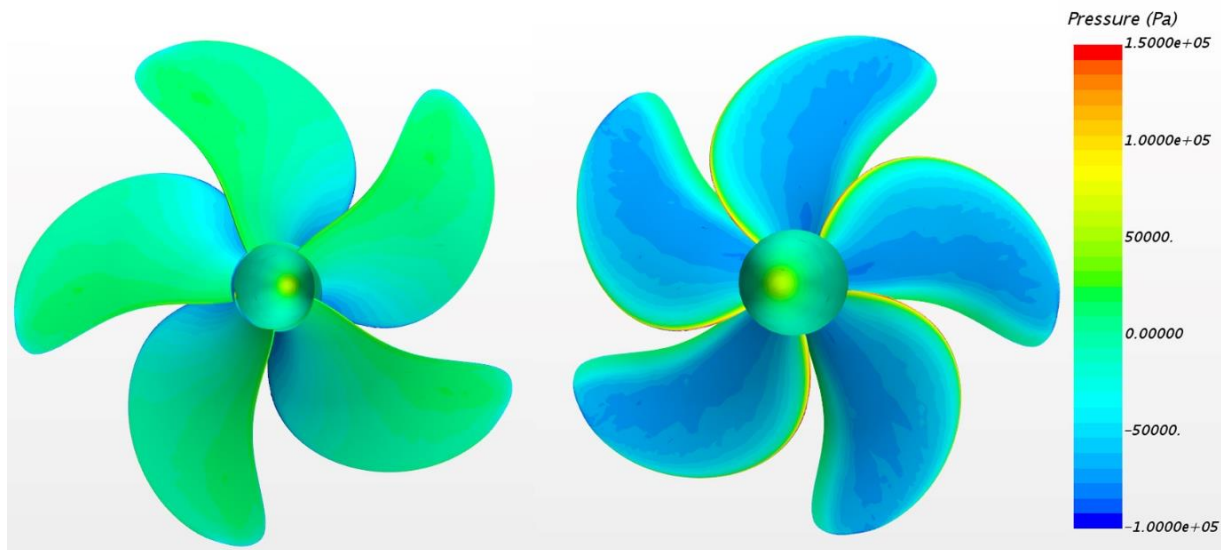
Slika 37. Prikaz strujnica uslijed nastrojavanja fluida na brodski vijak pri numeričkoj simulaciji pokusa slobodne vožnje

Na slici 37. su prikazane strujnice uslijed nastrojavanja fluida na brodski vijak pri numeričkoj simulaciji pokusa slobodne vožnje. Na slici je vidljivo da se brzina smanjuje u blizini vratila te da je brzina jednaka nuli na stijenkama broskog vijka. Također se može zamijetiti vrtloženje strujnica uslijed rotacije broskog vijka.



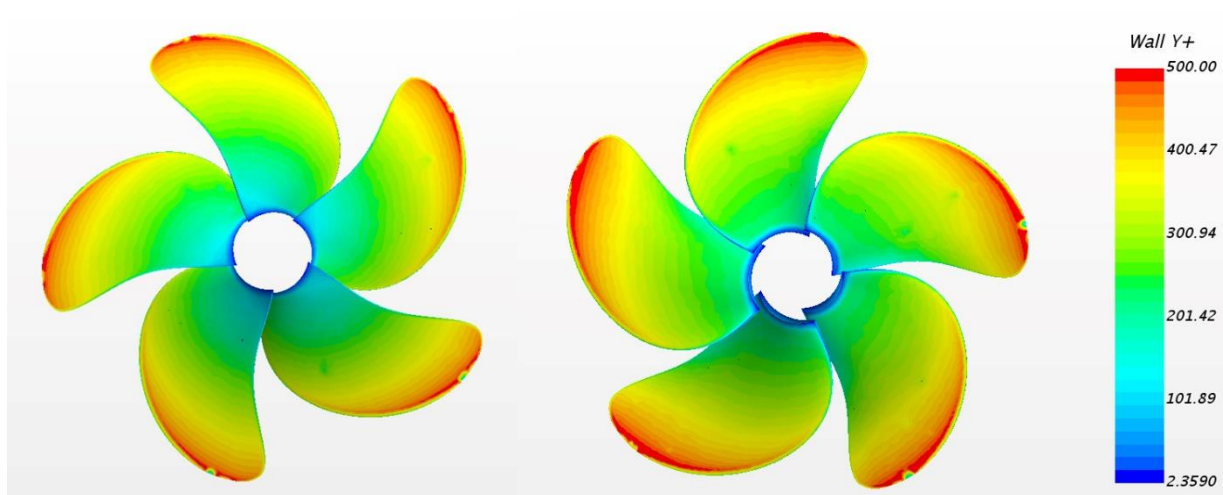
Slika 38. Vrijednost tangencijalnog napreznja na tlačnoj (lijevo) i podtlačnoj (desno) strani brodskog vijka

Na slici 38. je prikazana vrijednost tangencijalnog napreznja na površini (stijenci) brodskog vijka. Iz slike je vidljivo da su najveće vrijednosti tangencijalnog napreznja na rubovima krila vijka, a najmanje na krilima blizu glavine te na samoj glavini.



Slika 39. Vrijednost tlaka na tlačnoj (lijevo) i podtlačnoj (desno) strani brodskog vijka

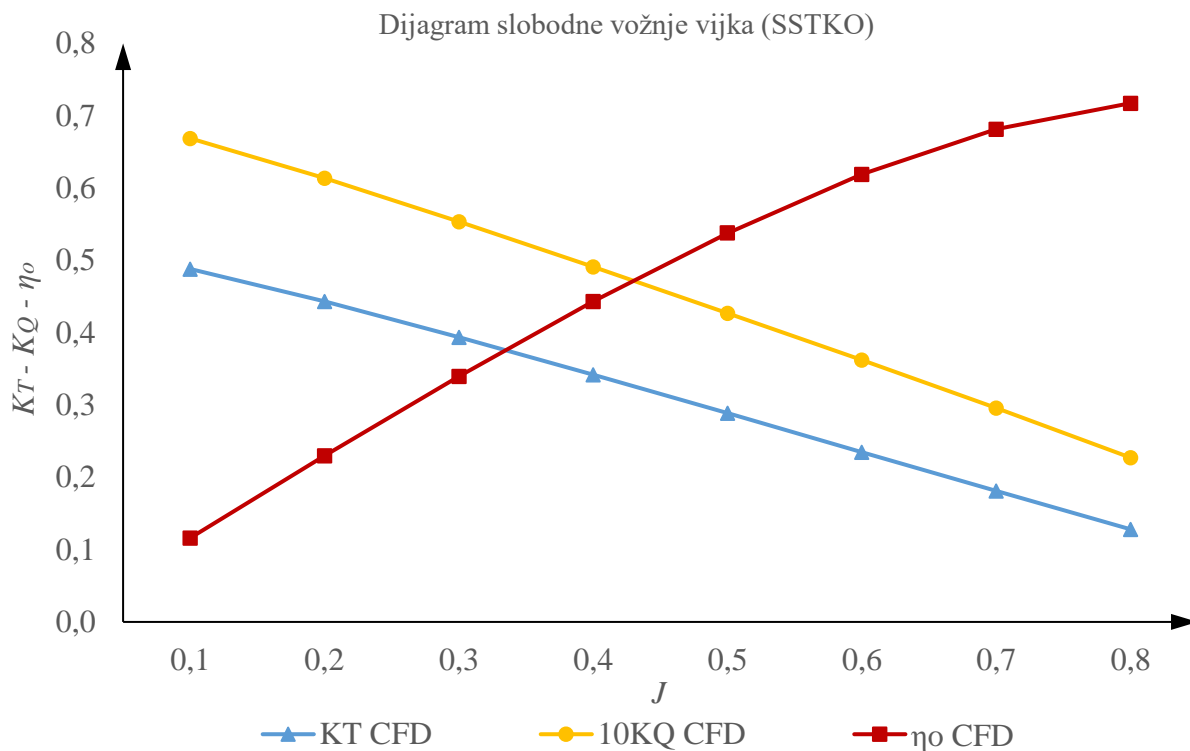
Na slici 39. prikazana je vrijednost tlaka na krilima brodskog vijka. Najveće vrijednosti tlaka nalaze se na podtlačnoj strani na ulaznim bridovima krila vijka, a najmanje vrijednosti na tlačnoj strani krila blizu glavine.



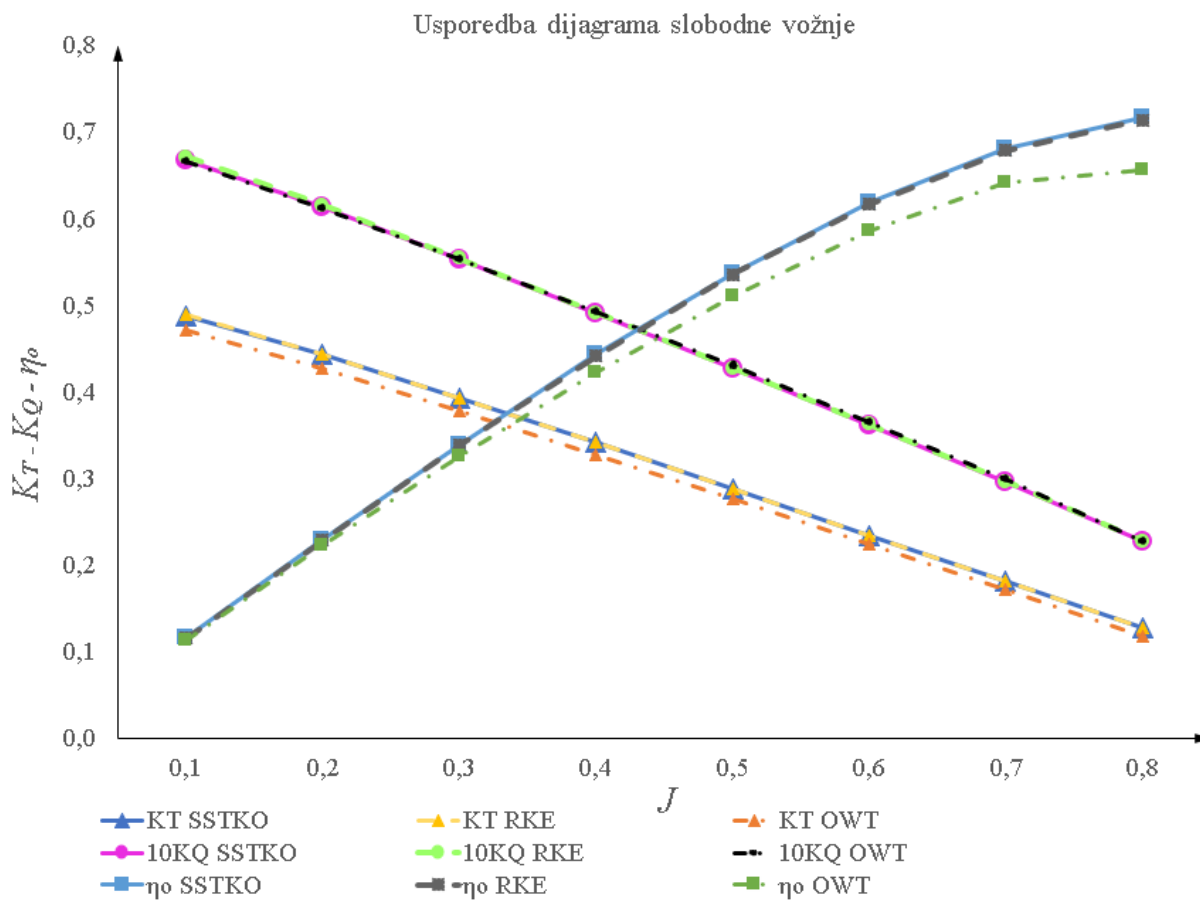
Slika 40. Vrijednost parametra y^+ na tlačnoj (lijevo) i podtlačnoj (desno) strani brodskog vijka

Prilikom definiranja postavki za diskretizaciju graničnog sloja u numeričkim simulacijama pokusa slobodne vožnje vijka bilo je potrebno zadovoljiti uvjet koji nalaže da prosječna vrijednost parametra y^+ na stijenci vijka mora biti ispod 300 [31]. Navedeni uvjet je provjeren određivanjem srednje vrijednosti parametra y^+ na krilima vijka. Dobivena prosječna vrijednost parametra y^+ na površini vijka iznosi 290. Na slici 40. je prikazana vrijednost parametra y^+ na krilima brodskog vijka .

Na slici 41. prikazan je dobiveni dijagram slobodne vožnje brodskog vijka dobiven primjenom $k - \omega$ SST model turbulencije, a na slici 42. prikazana je usporedba dijagrama slobodne vožnje vijka dobivenih primjenom oba modela turbulencije i eksperimentalnim ispitivanjem u bazenu.



Slika 41. Dijagram slobodne vožnje vijka dobiven $k - \omega$ SST modelom turbulencije



Slika 42. Usporedba dijagrama slobodne vožnje dobivenih RDF-om i eksperimentalno

Na slici 42. punom linijom označeni su rezultati dobiveni numeričkom simulacijom pokusa slobodne vožnje vijka primjenom $k-\omega$ SST modela turbulencije, isprekidanom linijom numeričkom simulacijom primjenom realizable $k-\varepsilon$ modela turbulencije, a linijom crta-točka-crta eksperimentalni rezultati. Iz dijagrama se može vidjeti da su najveća relativna odstupanja rezultata dobivena za stupanj djelovanja broskog vijka u slobodnoj vožnji pri velikim vrijednostima koeficijenta napredovanja, a najmanja za vrijednosti koeficijenta momenta.

U tablicama 9. do 11. prikazane su dobivene vrijednosti koeficijenta poriva, koeficijenta momenta i stupnja djelovanja vijka u slobodnoj vožnji za različite koeficijente napredovanja primjenom dva različita modela turbulencije te je dana validacija rezultata koristeći eksperimentalne rezultate [33].

Tablica 9. Validacija koeficijenta poriva

J	K_T			Relativno odstupanje	
	EKSP [33]	RDF, R_{KE}	RDF, S_{TKO}	$RD, R_{KE}, \%$	$RD, S_{TKO}, \%$
0,1	0,472	0,489	0,488	3,63	3,39
0,2	0,427	0,444	0,443	3,92	3,79
0,3	0,378	0,394	0,394	4,16	4,17
0,4	0,327	0,342	0,342	4,46	4,55
0,5	0,276	0,289	0,289	4,53	4,58
0,6	0,225	0,235	0,235	4,39	4,34
0,7	0,172	0,181	0,181	5,41	5,27
0,8	0,118	0,128	0,128	8,46	8,49

Tablica 10. Validacija koeficijenta momenta

J	$10K_Q$			Relativno odstupanje	
	EKSP [33]	RDF, R_{KE}	RDF, S_{STKO}	$RD, R_{KE}, \%$	$RD, S_{STKO}, \%$
0,1	0,667	0,672	0,669	0,68	0,25
0,2	0,613	0,616	0,614	0,45	0,10
0,3	0,554	0,555	0,554	0,15	-0,08
0,4	0,493	0,492	0,491	-0,23	-0,41
0,5	0,430	0,428	0,427	-0,47	-0,69
0,6	0,366	0,363	0,362	-0,76	-1,09
0,7	0,299	0,297	0,296	-0,62	-1,05
0,8	0,228	0,228	0,227	-0,02	-0,37

Tablica 11. Validacija stupnja djelovanja vijka u slobodnoj vožnji

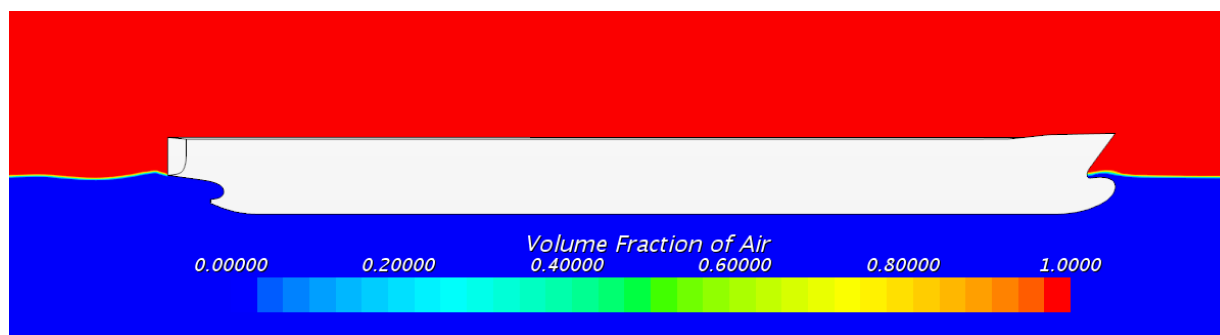
J	η_o			Relativno odstupanje	
	EKSP [33]	RDF, R_{KE}	RDF, S_{STKO}	$RD, R_{KE}, \%$	$RD, S_{STKO}, \%$
0,1	0,113	0,116	0,116	2,55	2,75
0,2	0,222	0,229	0,230	3,28	3,52
0,3	0,326	0,339	0,340	3,89	4,14
0,4	0,423	0,442	0,443	4,48	4,75
0,5	0,511	0,536	0,538	4,94	5,22
0,6	0,586	0,617	0,619	5,34	5,64
0,7	0,642	0,680	0,682	5,84	6,15
0,8	0,656	0,715	0,717	8,92	9,34

Iz priloženih tablica vidljivo je da su relativna odstupanja svih rezultata ispod 10%. Najveće relativno odstupanje iznosi 9,34% te je dobiveno za stupanj djelovanja vijka u slobodnoj vožnji za $J = 0,8$ primjenom $k - \omega$ SST modela turbulencije. Također je vidljivo da relativno odstupanje stupnja djelovanja vijka u slobodnoj vožnji raste s povećanjem koeficijenta napredovanja. Vrijednost relativnog odstupanja koeficijenta poriva također raste s povećanjem koeficijenta napredovanja te najveće odstupanje iznosi 8,49% za $J = 0,8$ primjenom $k - \omega$ SST modela turbulencije. Dobivene vrijednosti relativnog odstupanja za koeficijent momenta su najmanje te iznose oko 1%. Najveće relativno odstupanje za koeficijent momenta iznosi -1,09% za $J = 0,6$ primjenom $k - \omega$ SST model turbulencije. Koeficijent napredovanja za točku vlastitog pogona pri $Fn = 0,174$ iznosi 0,686, a pri $Fn = 0,218$ iznosi 0,676. Pri ovim vrijednostima koeficijenta napredovanja, relativno odstupanje za koeficijent poriva iznosi oko 5%, za koeficijent momenta iznosi oko 1%, a za stupanj djelovanja vijka u slobodnoj vožnji iznosi oko 6%. Iz dobivenih relativnih odstupanja rezultata može se zaključiti da su rezultati numeričkih simulacija pokusa slobodne vožnje zadovoljavajuće točnosti.

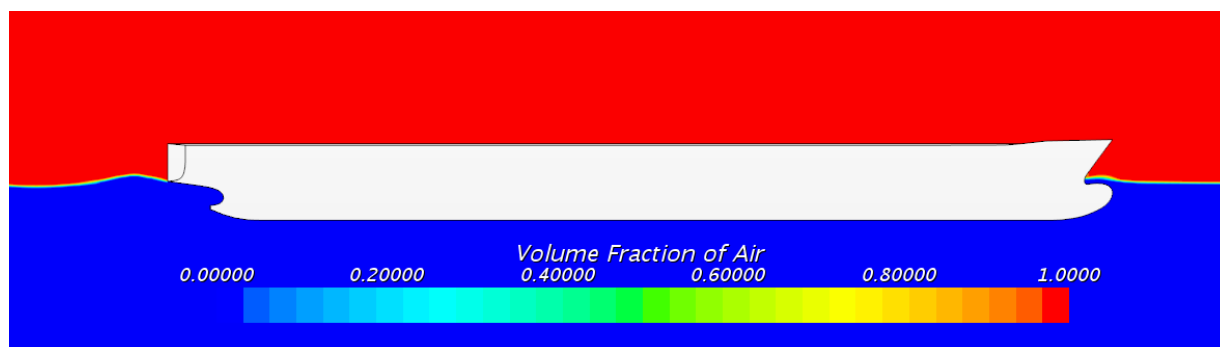
Rezultati dobiveni numeričkim simulacijama pokusa slobodne vožnje koriste se kao jedan od ulaznih podataka za numeričke simulacije pokusa vlastitog pogona prikazane u poglavlju 5.3. U nastavku slijedi prikaz rezultata dobivenih numeričkim simulacijama pokusa otpora.

5.2. Rezultati numeričkih simulacija pokusa otpora

U ovom poglavlju prikazani su rezultati numeričkih simulacija pokusa otpora. Svi rezultati dobiveni numeričkim simulacijama pomnoženi su s dva, jer su numeričke simulacije provedene koristeći polovicu domene zbog korištenja uvjeta simetrije. Sve slike prikazuju rezultate dobivene primjenom fine geometrijske mreže i finog vremenskog koraka te primjenom $k - \omega$ SST modela turbulencije.



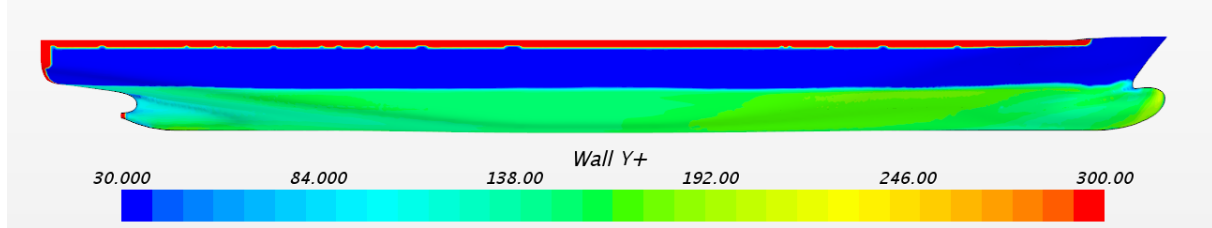
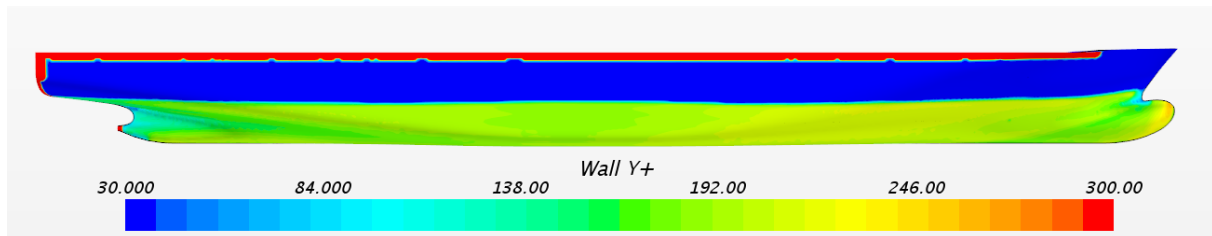
a) $Fn = 0,174$



b) $Fn = 0,218$

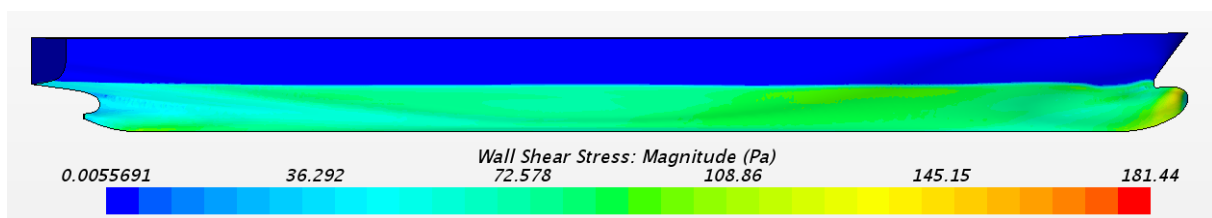
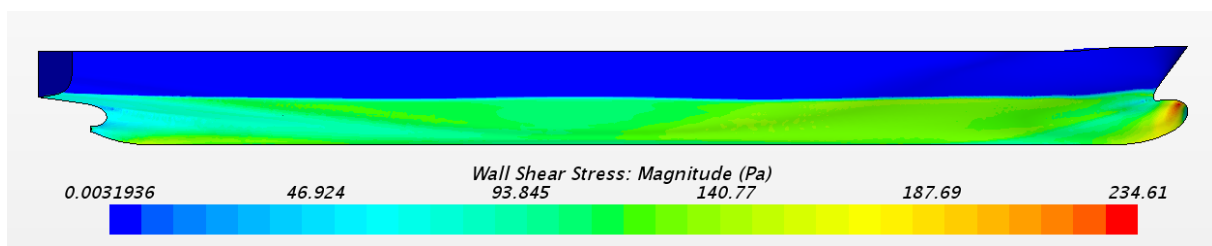
Slika 43. Prikaz slobodne površine dobivene numeričkim simulacijama pokusa otpora pri različitim vrijednostima Froudeovog broja

Na slici 43. prikazana je dobivena slobodna površina kao volumni udio zraka u ćeliji domene pri $Fn = 0,174$ i $Fn = 0,218$. Na slici je vidljivo da su ispred pramca i iza krme broda generirani najveći valovi uslijed nasmrujanja fluida na trup brod. Također je vidljivo da je valna elevacija viša pri $Fn = 0,218$ nego pri $Fn = 0,174$.

a) $Fn = 0,174$ b) $Fn = 0,218$

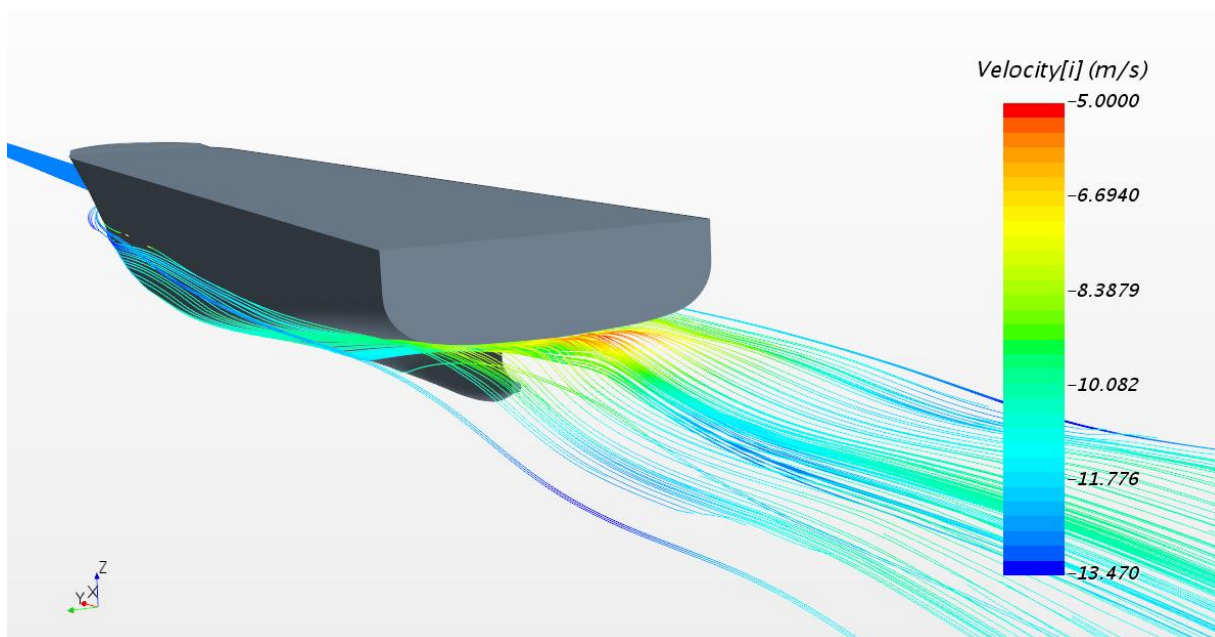
Slika 44. Vrijednost parametra y^+ duž trupa broda pri različitim vrijednostima Froudeovog broja

Kao i kod numeričkih simulacija pokusa slobodne vožnje vijka, vrijednost parametra y^+ potrebno je držati unutar logaritamskog područja kako bi se mogle primijeniti zidne funkcije. Na slici 44. vidljivo je da je na uronjenom dijelu trupa broda zadovoljen uvjet $30 \leq y^+ \leq 300$ pri oba Froudeova broja.

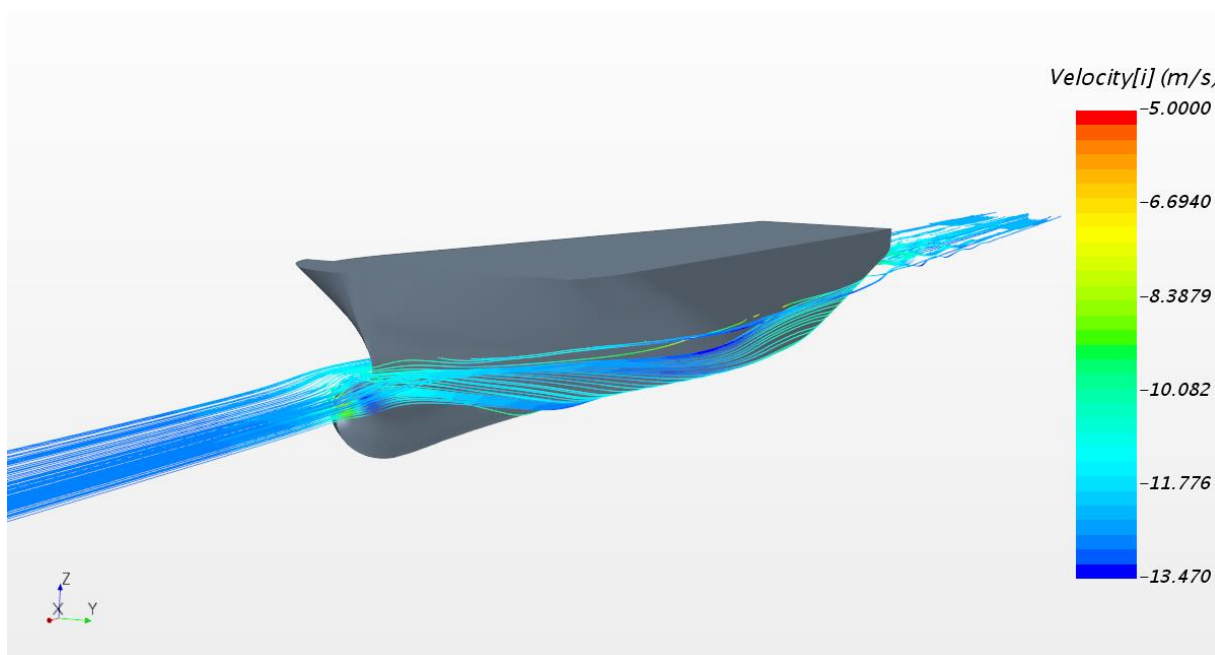
a) $Fn = 0,174$ b) $Fn = 0,218$

Slika 45. Vrijednost tangencijalnog naprezanje duž trupa broda pri različitim vrijednostima Froudeovog broja

Na slici 45. prikazane su vrijednosti tangencijalnog naprezanja duž trupa broda. Vidljivo je da su pri većoj vrijednosti Froudeovog broja veće i vrijednosti tangencijalnog naprezanja. Može se zamijetiti da je najveća vrijednost tangencijalnog naprezanja na bulbu broda pri $Fn = 0,218$.



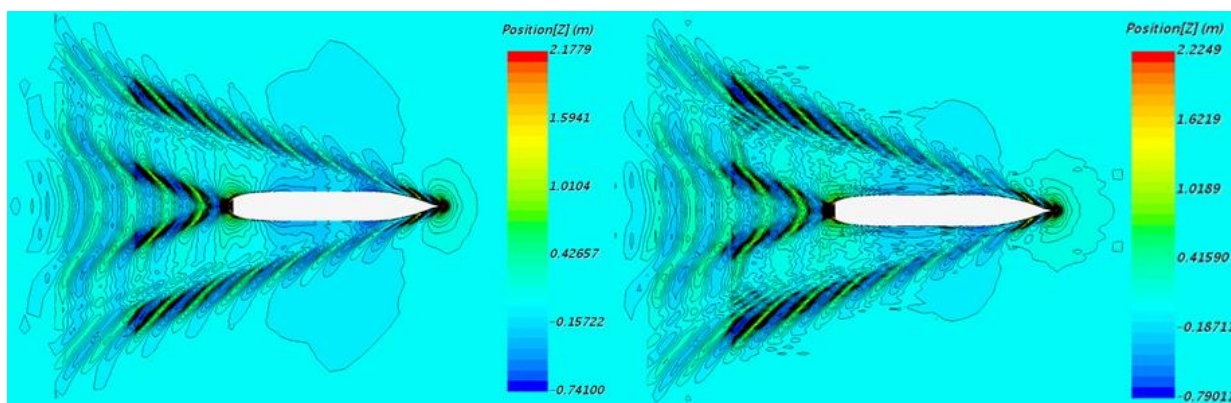
Slika 46. Prikaz strujnica na slobodnoj površini iza krme broda pri $Fn = 0,218$



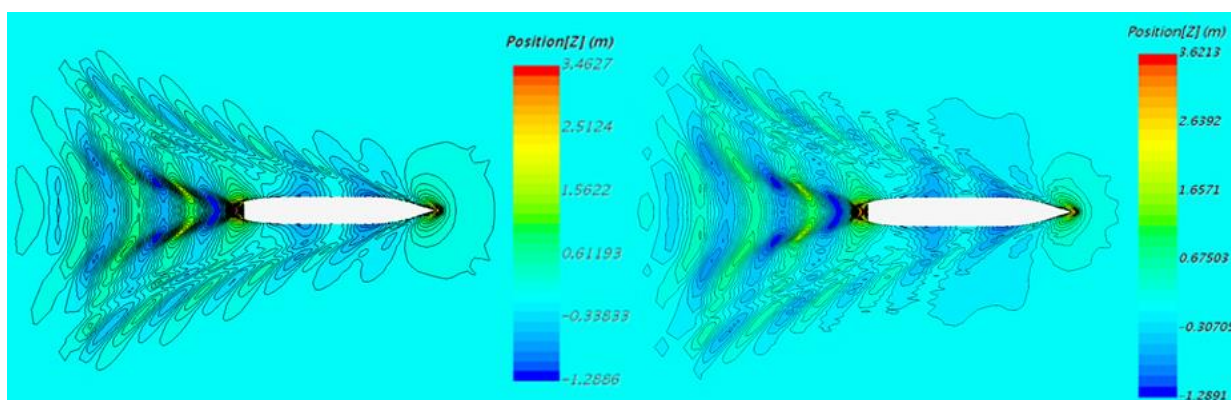
Slika 47. Prikaz strujnica na slobodnoj površini ispred pramca broda pri $Fn = 0,218$

Na slikama 46. i 47. su prikazane strujnice na slobodnoj površini pri $Fn = 0,218$. Na slici je vidljivo usporavanje strujanja pri nailasku na trup broda te duž trupa i iza krme broda.

U nastavku su na slikama 48. i 49. prikazane slike valova dobivene numeričkim simulacijama primjenom različitih modela turbulencije. Na slikama valova može se zamijetiti kut razilaženja pramčanih valova, koji odgovara Kelvinovom kutu od $19^{\circ}28'$. Također je vidljivo da se najveće vrijednosti valne elevacije nalaze ispred pramca i iza krme broda. Dobivene apsolutne maksimalne i minimalne vrijednosti valnih elevacija veće su pri $Fn = 0,218$ nego pri $Fn = 0,174$. Postoji i razlika u apsolutnoj maksimalnoj i minimalnoj dobivenoj valnoj elevaciji ovisno o primijenjenom modelu turbulencije te je vidljivo da su primjenom $k-\omega$ SST modela turbulencije dobivene nešto više valne elevacije.

a) realizable $k-\epsilon$ b) $k-\omega$ SST

Slika 48. Slike valova dobivene numeričkim simulacijama pokusa otpora primjenom različitih modela turbulencije pri $Fn = 0,174$

a) realizable $k-\epsilon$ b) $k-\omega$ SST

Slika 49. Slike valova dobivene numeričkim simulacijama pokusa otpora primjenom različitih modela turbulencije pri $Fn = 0,218$

Prilikom analize dobivenih rezultata, promatrano je zadnjih 20% fizikalnog vremena te je uzeta srednja vrijednost rezultata unutar odabranog intervala. Na ovaj način izbjegava se uzimanje u obzir rezultata dobivenih na početku numeričke simulacije kada vrijednost sile ukupnog otpora nije konvergirala.

U nastavku je provedena verifikacija rezultata za različite gustoće geometrijske mreže i različite veličine vremenskog koraka pri $Fn = 0,218$ primjenom oba modela turbulencije. Verifikacija je prikazana u tablicama 12. i 13.

Tablica 12. Verifikacija rezultata za gustoću geometrijske mreže

Model turbulencije	$\hat{S}_{i,3}, N$	$\hat{S}_{i,2}, N$	$\hat{S}_{i,1}, N$	$\varepsilon_{i,21}, N$	$\varepsilon_{i,32}, N$	R_i	U_i, N	$\bar{U}_G, \%$
$k - \omega$ SST	3338,8	3228,9	3181,6	47,26	109,93	0,43	44,55	1,40
Realizable $k - \varepsilon$	3298,87	3263,21	3204,5	58,71	35,66	1,65	117,96	3,68

Tablica 13. Verifikacija rezultata za veličinu vremenskog koraka

Model turbulencije	$\hat{S}_{i,3}, N$	$\hat{S}_{i,2}, N$	$\hat{S}_{i,1}, N$	$\varepsilon_{i,21}, N$	$\varepsilon_{i,32}, N$	R_i	U_i, N	$\bar{U}_T, \%$
$k - \omega$ SST	3420,0	3236,8	3181,6	55,23	183,17	0,30	29,80	0,94
Realizable $k - \varepsilon$	3474,67	3274,22	3204,5	69,72	200,45	0,35	46,48	1,45

Ukupna nesigurnost računa se prema jednadžbi (63) te za numeričku simulaciju pokusa otpora primjenom $k - \omega$ SST modela turbulencije iznosi 1,69%, a za numeričku simulaciju pokusa otpora primjenom realizable $k - \varepsilon$ modela turbulencije iznosi 3,96%.

Slijedi prikaz te validacija rezultata numeričkih simulacija pokusa otpora za dva Froudeova broja primjenom dva modela turbulencije. Svi prikazani rezultati dobiveni su primjenom fine geometrijske mreže i finog vremenskog korak. Validacija je provedena koristeći rezultate dostupne u [33], koji su ekstrapolirani na brod u naravi pomoću jednadžbi prikazanih u poglavlju 2.4. Pri ekstrapolaciji rezultata primijenjeni su faktori forme dani u radu [33] koji iznose $k = 0,094$ za model i $k = 0,145$ za brod.

Tablica 14. Validacija ukupnog otpora broda

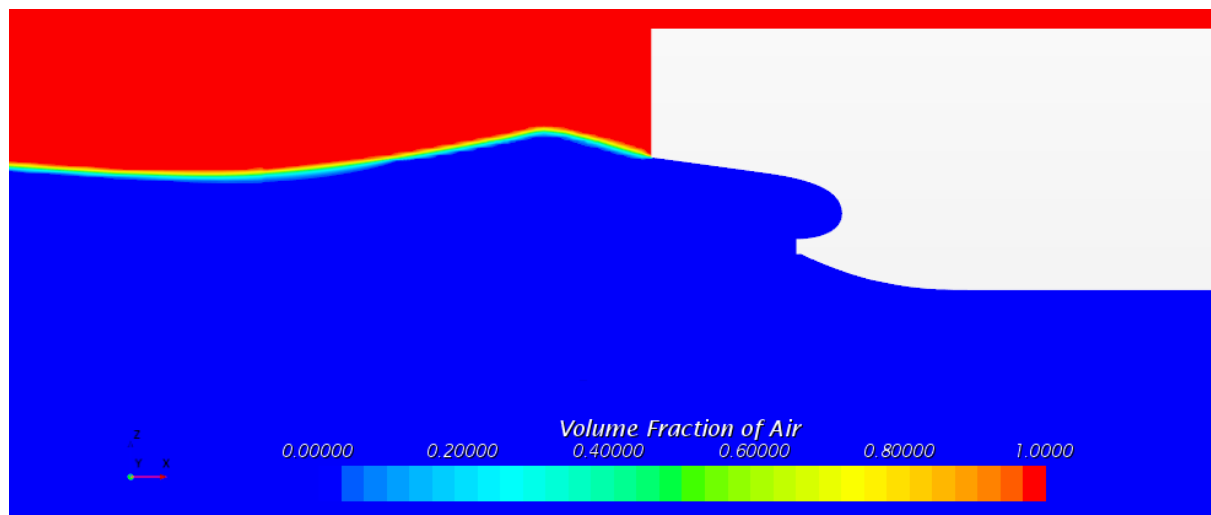
F_n	R_T , kN			Relativno odstupanje	
	EKST [33]	RDF, R_{KE}	RDF, $SSTKO$	RD , R_{KE} , %	RD , $SSTKO$, %
0,174	1950,19	2000,14	1973,04	2,56	1,17
0,218	3131,49	3204,50	3181,61	2,33	1,60

U tablici 14. je prikazana validacija rezultata ukupnog otpora broda dobivenih numeričkim simulacijama primjenom realizable $k-\varepsilon$ i $k-\omega$ SST modela turbulencije pri $F_n = 0,174$ te pri $F_n = 0,218$. Iz tablice je vidljivo da su manja relativna odstupanja dobivena primjenom $k-\omega$ SST modela turbulencije. Relativna odstupanja pri $F_n = 0,174$ iznose 2,56% primjenom realizable $k-\varepsilon$ modela turbulencije te 1,17% primjenom $k-\omega$ SST modela turbulencije. Relativna odstupanja pri $F_n = 0,218$ iznose 2,33% primjenom realizable $k-\varepsilon$ modela turbulencije te 1,60% primjenom $k-\omega$ SST modela turbulencije. Validacija je pokazala valjanost rezultata numeričkih simulacija pokusa otpora broda.

5.3. Rezultati numeričkih simulacija pokusa vlastitog pogona

U ovom poglavlju prikazani su rezultati numeričkih simulacija pokusa vlastitog pogona.

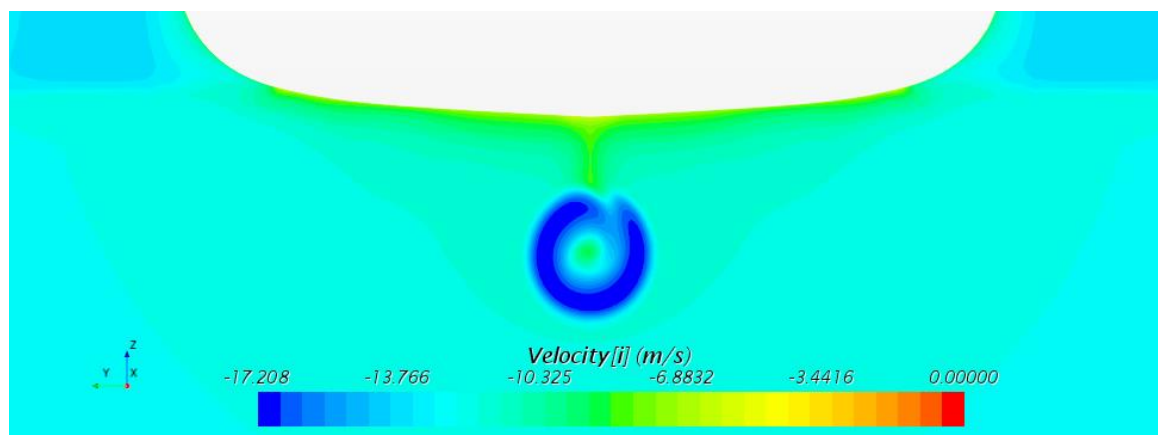
U slikama u nastavku prikazani su rezultati numeričkih simulacija pokusa vlastitog pogona dobiveni primjenom $k - \omega$ SST modela turbulencije.



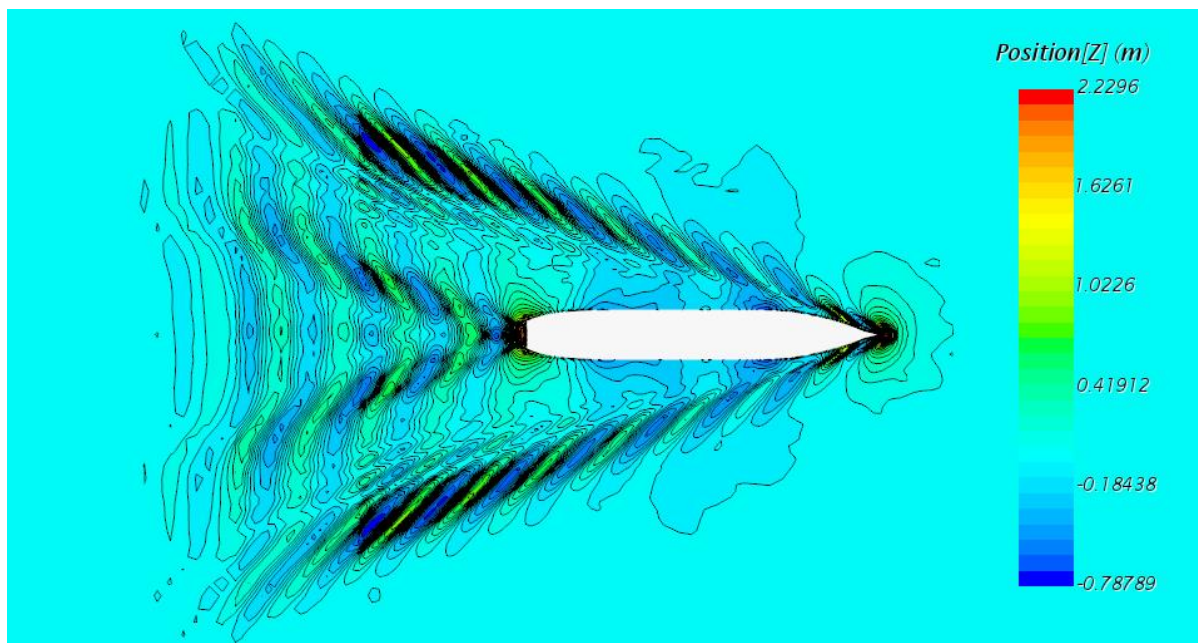
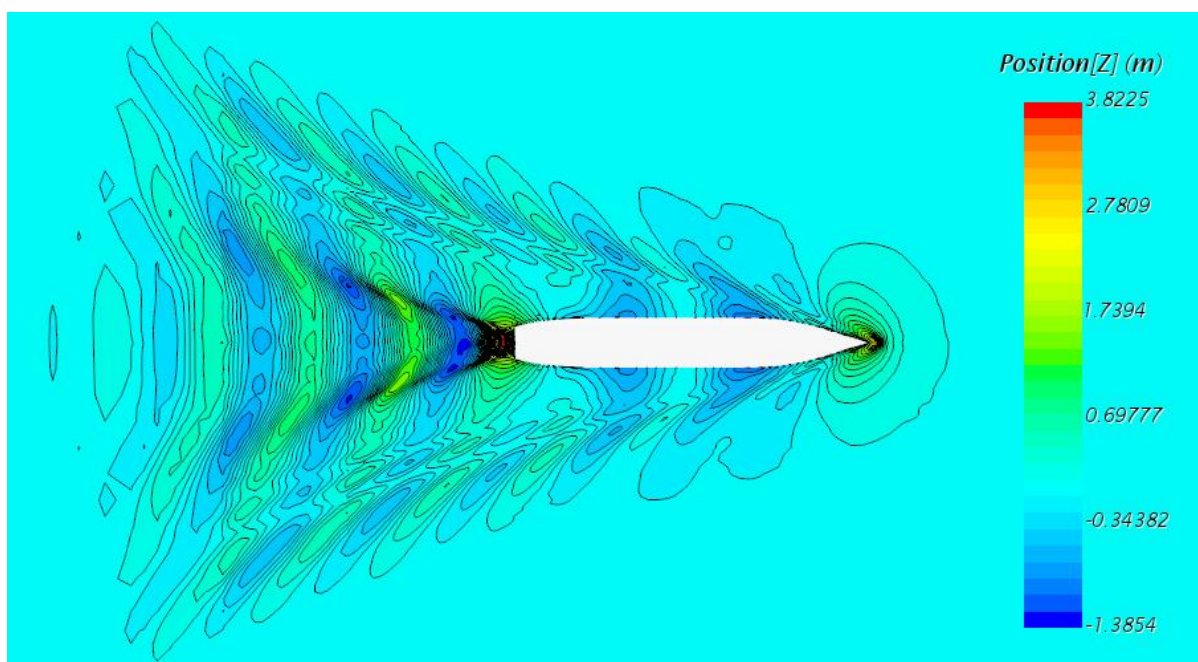
Slika 50. Slobodna površina iza krme broda dobivena numeričkom simulacijom pokusa vlastitog pogona pri $Fn = 0,218$

Na slici 50. je prikazana slobodna površina iza krme broda. U odnosu na sliku 43. b) na kojoj je prikazana slobodna površina dobivena numeričkom simulacijom pokusa otpora, na slici 50. je moguće uočiti višu valnu elevaciju iza krme broda, što je uzrokovano djelovanjem vijka.

Na slici 51. prikazana je aksijalna komponenta brzine strujanja fluida u području ispred virtualnog diska. Na trupu broda je vidljivo da je brzina jednaka nuli zbog zadanog uvjeta zida te da se brzina postepeno povećava s udaljenosti od trupa broda. Na mjestu gdje se na brodu nalazi brodski vijak može se uočiti nagli skok u brzini.



Slika 51. Aksijalna komponenta brzine ispred virtualnog diska pri $Fn = 0,218$

a) $Fn = 0,174$ a) $Fn = 0,218$

Slika 52. Slike valova dobivene numeričkim simulacijama pokusa vlastitog pogona pri različitim vrijednostima Froudeovog broja

Uspoređujući slike valova dobivene numeričkim simulacijama pokusa vlastitog pogona na slici 52. i numeričkim simulacijama pokusa otpora na slikama 48. b) i 49. b)., može se zamijetiti da su apsolutne maksimalne i minimalne vrijednosti elevacije vala veće pri pokusu vlastitog pogona. Ovo se može pripisati djelovanju brodskog vijka.

U tablicama 15. i 16. prikazane su dobivene značajke točke vlastitog pogona te njihova usporedba s ekstrapoliranim eksperimentalnim rezultatima pri $Fn = 0,174$ i $Fn = 0,218$ te primjenom realizable $k-\varepsilon$ i $k-\omega$ SST modela turbulencije. Validacija je provedena koristeći rezultate dostupne u [34], koji su ekstrapolirani na brod u naravi pomoću jednadžbi prikazanih u poglavlju 2.4.

Tablica 15. Validacija točke vlastitog pogona pri $Fn = 0,174$

Značajka	EKST [34]	RDF, RKE	RDF, $SSTKO$	RD , RKE , %	RD , $SSTKO$, %
n , o/min	82,70	83,09	82,62	0,47	-0,10
P_D , MW	28,52	30,31	29,58	6,28	3,72

Tablica 16. Validacija točke vlastitog pogona pri $Fn = 0,218$

Značajka	EKST [34]	RDF, RKE	RDF, $SSTKO$	RD , RKE , %	RD , $SSTKO$, %
n , o/min	104,14	103,44	103,84	-0,67	-0,29
P_D , MW	58,06	58,08	59,22	0,03	2,00

Pri $Fn = 0,174$, dobivena vrijednost relativnog odstupanja za broj okretaja vijka primjenom realizable $k-\varepsilon$ modela turbulencije iznosi 0,47%, dok je primjenom $k-\omega$ SST modela turbulencije dobivena manja vrijednost te ona iznosi -0,10%. Vrijednost dobivenog relativnog odstupanja za snagu predanu vijku primjenom realizable $k-\varepsilon$ modela turbulencije iznosi 6,28%, a primjenom $k-\omega$ SST modela turbulencije ona iznosi 3,72%.

Pri $Fn = 0,218$, dobivena vrijednost relativnog odstupanja za broj okretaja vijka primjenom realizable $k-\varepsilon$ modela turbulencije iznosi -0,67%, dok je primjenom $k-\omega$ SST modela turbulencije dobivena manja vrijednost te ona iznosi -0,29%. Vrijednost dobivenog relativnog odstupanja za snagu predanu vijku primjenom realizable $k-\varepsilon$ modela turbulencije iznosi 0,03%, a primjenom $k-\omega$ SST modela turbulencije ona iznosi 2,00%.

Vidljivo je da su dobivene vrijednosti relativnog odstupanja za broj okretaja vijka pri oba Froudeova broja te primjenom oba modela turbulencije ispod 1%, dok su vrijednosti relativnog odstupanja za snagu predanu vijku malo veće. Najveća dobivena vrijednost odstupanja iznosi 6,28% pri $Fn = 0,174$ primjenom realizable $k-\varepsilon$ modela turbulencije.

Prikazane vrijednosti relativnog odstupanja za točku vlastitog pogona ukazuju na zadovoljavajuće rezultate numeričkih simulacija pokusa vlastitog pogona.

U tablicama 17. i 18. prikazana je validacija koeficijenta propulzije dobivenih numeričkim simulacijama s ekstrapoliranim rezultatima eksperimentalnih ispitivanja [33].

Tablica 17. Validacija komponenata propulzije pri $Fn = 0,174$

Značajka	EKST [33]	RDF, RKE	RDF, $SSTKO$	RD , RKE , %	RD , $SSTKO$, %
$1-t$	0,919	0,818	0,835	-10,99	-9,14
$1-w_T$	0,819	0,790	0,792	-3,54	-3,30
η_H	1,112	1,035	1,054	-6,92	-5,22
η_R	0,997	1,000	0,995	0,30	-0,20
η_O	0,635	0,657	0,662	3,46	4,25
η_D	0,704	0,680	0,694	-3,41	-1,42
J	0,686	0,659	0,664	-3,94	-3,21

Tablica 18. Validacija komponenata propulzije pri $Fn = 0,218$

Značajka	EKST [33]	RDF, RKE	RDF, $SSTKO$	RD , RKE , %	RD , $SSTKO$, %
$1-t$	0,910	0,843	0,838	-7,36	-7,91
$1-w_T$	0,813	0,816	0,790	0,37	-2,83
η_H	1,119	1,033	1,061	-7,69	-5,18
η_R	0,999	0,999	0,996	0,00	-0,30
η_O	0,629	0,660	0,657	4,93	4,45
η_D	0,704	0,681	0,694	-3,27	-1,42
J	0,676	0,664	0,659	-1,78	-2,51

Najveće dobivene vrijednost relativnog odstupanja komponenata propulzije su za značajku $1-t$, gdje pri $Fn = 0,174$ odstupanje iznosi -10,99% primjenom realizable $k-\varepsilon$ modela turbulencije te -9,14% primjenom $k-\omega$ SST modela turbulencije. Pri $Fn = 0,218$ dobivena su manja odstupanja za značajku $1-t$ te ona iznose -7,36% primjenom realizable $k-\varepsilon$ modela turbulencije i -7,91% primjenom $k-\omega$ SST modela turbulencije. Velike dobivene vrijednosti

relativnog odstupanja za značajku $1-t$ slične su vrijednostima dobivenim u radu [35], gdje je pri $Fn = 0,218$ primjenom realizable $k-\varepsilon$ modela turbulencije dobivena vrijednost relativnog odstupanja od 8,68%. Ovakva odstupanja uzrokovana su korištenjem „Body force“ metode koja ne može dovoljno točno opisati interakciju trupa broda i broskog vijka [30]. Dobivene vrijednosti relativnog odstupanja za ostale komponente propulzije su manje. Vrijednost relativnog odstupanja za koeficijent napredovanja pri $Fn = 0,174$ iznosi -3,94% primjenom realizable $k-\varepsilon$ modela turbulencije te -3,21% primjenom $k-\omega$ SST modela turbulencije. Pri $Fn = 0,218$, dobivena je vrijednost od -1,78% primjenom realizable $k-\varepsilon$ modela turbulencije te -2,51% primjenom $k-\omega$ SST modela turbulencije. Relativna odstupanja značajke $1-w_T$ te koeficijenta kvazi-propulzije pri oba Froudeova broja te primjenom oba modela turbulencije su ispod 4%.

Iz navedenih vrijednosti relativnog odstupanja može se zaključiti da su komponente propulzije dobivene numeričkim simulacijama zadovoljavajuće točnosti.

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu provedene su numeričke simulacije pokusa otpora, pokusa slobodne vožnje vijka i pokusa vlastitog pogona za DTC brod i brodski vijak u naravi koristeći komercijalni programski paket STAR-CCM+ za RDF. Sve numeričke simulacije provedene su primjenom $k-\omega$ SST i realizable $k-\varepsilon$ modela turbulencije. Pokus otpora i pokus vlastitog pogona provedeni su za dva Froudeova broja, $Fn = 0,218$ i $Fn = 0,174$, a pokus slobodne vožnje proveden je za koeficijente napredovanja od $J = 0,1$ do $J = 0,8$ s korakom 0,1. Provedena je verifikacija rezultata numeričke simulacije pokusa otpora, pri čemu je ispitan utjecaj gustoće geometrijske mreže i veličine vremenskog koraka za dva modela turbulencije pri $Fn = 0,218$. Izračunata je ukupna nesigurnost numeričke simulacije koja za $k-\omega$ SST model turbulencije iznosi 1,69%, a za realizable $k-\varepsilon$ model turbulencije iznosi 3,96%. Rezultati dobiveni numeričkim simulacijama pokusa otpora i vlastitog pogona validirani su ekstrapoliranim eksperimentalnim rezultatima, a rezultati pokusa slobodne vožnje validirani su bez ekstrapolacije. Za pokus slobodne vožnje najveće relativno odstupanje rezultata iznosi 9,34% i to za stupanj djelovanja vijka u slobodnoj vožnji pri $J = 0,8$ primjenom $k-\omega$ SST modela turbulencije. Numeričkim simulacijama pokusa vlastitog pogona određeni su koeficijenti napredovanja u točki vlastitog pogona te primjenom $k-\omega$ SST modela turbulencije oni iznose $J = 0,664$ pri $Fn = 0,174$ te $J = 0,659$ pri $Fn = 0,218$. Za ove koeficijente napredovanja, relativna odstupanja koeficijenata poriva, momenta i stupnja djelovanja vijka u slobodnoj vožnji za oba modela turbulencije su ispod 6%. Za pokus slobodne vožnje, rezultati dobiveni primjenom različitih modela turbulencije su slični. Za pokus otpora, relativno odstupanje ukupnog otpora primjenom realizable $k-\varepsilon$ modela turbulencije pri $Fn = 0,174$ iznosi 2,56%, a pri $Fn = 0,218$ iznosi 2,33%. Primjenom $k-\omega$ SST modela turbulencije, odstupanje pri $Fn = 0,174$ iznosi 1,17%, a pri $Fn = 0,218$ iznosi 1,60%. Iako su relativna odstupanja u pokusu otpora zadovoljavajuća primjenom oba modela turbulencije, manja odstupanja dobivena su primjenom $k-\omega$ SST modela turbulencije. Točka vlastitog pogona dobivena pokusom vlastitog pogona također daje zadovoljavajuća rješenja. Relativno odstupanje broja okretaja pri $Fn = 0,174$ iznosi 0,47% primjenom realizable $k-\varepsilon$ modela turbulencije te -0,10% primjenom $k-\omega$ SST modela turbulencije. Pri $Fn = 0,218$, relativno odstupanje iznosi -0,67% primjenom realizable $k-\varepsilon$ modela turbulencije te -0,29% primjenom $k-\omega$ SST modela turbulencije. Relativna odstupanja za snagu predanu vijku nešto su veća. Pri $Fn = 0,174$, relativno odstupanje iznosi 6,28% primjenom realizable $k-\varepsilon$ modela turbulencije te 3,72% primjenom $k-\omega$ SST modela turbulencije. Pri $Fn = 0,218$, relativno odstupanje iznosi 0,03% primjenom realizable $k-\varepsilon$

modela turbulencije te 2,0% primjenom $k - \omega$ SST modela turbulencije. Također su izračunati i prikazani koeficijenti propulzije te njihova relativna odstupanja. Najveća relativna odstupanja dobivena su za značajku $1 - t$ što je uzrokovano primjenom „Body force“ metode, koja ne može dovoljno točno opisati interakciju trupa broda i brodskog vijka. Zaključno, dobiveni rezultati numeričkih simulacija su zadovoljavajući te ukazuju na mogućnost korištenja RDF-a prilikom projektiranja broda i brodskog vijka te odabira pogonskog stroja. U daljnjim istraživanjima trebalo bi detaljnije ispitati parametre diskretizacije te njihov utjecaj na konačna rješenja. Također, bilo bi korisno provesti numeričke simulacije vlastitog pogona s diskretiziranim brodskim vijkom te usporediti dobivene rezultate s rezultatima dobivenim u ovom radu.

LITERATURA

- [1] Džijan, I., Virag, Z.: *Računalna dinamika fluida*, skripta – predavanja, FSB, Zagreb, 2014.
- [2] Farkas, A., Degiuli, N., Martić, I.: *Assessment of hydrodynamic characteristics of a full-scale ship at different draughts*, Ocean Engineering, 2018., 156, pp. 135-152.
- [3] Seo, J. H., Seol, D. M., Lee, H. J., Rhee, S. H.: *Flexible CFD meshing strategy for prediction of ship resistance and propulsion performance*, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2010., 2 (3), pp. 139-145.
- [4] Niklas, K., Pruszko, H.: *Full-scale CFD simulations for the determination of ship resistance as a rational, alternative method to towing tank experiments*, Ocean Engineering, 2019., 190., 106435.
- [5] Seok, J., Park, J.: *Numerical simulation of resistance performance according to surface roughness in container ships*, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2020., 12, pp. 11-19.
- [6] Farkas, A., Degiuli, N., Martić, I., Dejhalla, R.: *An investigation into the effect of hard fouling on the ship resistance using CFD*, Journal of Marine Science and Engineering, 2020., 8 (10), 748.
- [7] Nguyen, T. V., Ngo, H. V., Ibata, S., Ikeda, Y.: *Effects of turbulence models on the CFD results of ship resistance and wake*, The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers Annual Meeting, 2017.
- [8] Feng, D., Yu, J., He, R., Zhang, Z., Wang, X.: *Improved body force propulsion model for ship propeller simulation*, Applied Ocean Research, 2020., 104., 102328.
- [9] Shivachev, E., Khorasanchi, M., Day, S., Turan, O.: *Impact of trim on added resistance of KRISO container ship (KCS) in head waves: an experimental and numerical study*, Ocean Engineering, 2020., 211., 107594.
- [10] Lee, S., You, J., Lee, H., Lim, T., Rhee, S. H., Rhee, K.: *Preliminary tests of a damaged ship for CFD validation*, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2012., Vol. 4 (2), pp. 172-181.
- [11] Liu, Y., Zou, Z., Zou, L., Fan, S.: *CFD-based numerical simulation of pure sway tests in shallow water towing tank*, Ocean Engineering, 2019., 189., 106311.
- [12] Di Mascio, A., Dubbioso, G., Muscari, R., Felli, M.: *CFD analysis of propeller-rudder interaction*, International Ocean and Polar Engineering Conference, 2015.

- [13] Tezdogan, T., Demirel, Y. K., Kellett, P., Khorasanchi, M., Incecik, A., Turan, O.: *Full-scale unsteady RANS CFD simulations of ship behaviour and performance in head seas due to slow steaming*, Ocean Engineering, 2015., 97, pp. 186-206.
- [14] Sigmund, S., el Moctar, O.: *Numerical and experimental investigation of propulsion in waves*, Ocean Engineering, 2017., 144, pp. 35-49.
- [15] Guo, J., Zhang, Y., Chen, Z., Feng, Y.: *CFD-based multi-objective optimization of a waterjet-propelled trimaran*, Ocean Engineering, 2020., 195., 106755.
- [16] Niklas, K., Pruszek, H.: *Prediction of ship resistance with the use of full-scale CFD simulations*, VIII International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, CIMNE, 2019., pp. 718-729.
- [17] Kang, C. W., Xing, X.: *CFD study of propeller cavitation with hull-propeller interaction*, 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, ASME, 2019.
- [18] Peng G., Gao, Y., Wen-hua, W., Lin., L., Huang, Y.: *Numerical method to simulate self-propulsion of Aframax tanker in irregular waves*, Mathematical Problems in Engineering, 2020.
- [19] Htay, W. N., Truong, T. Q., Toda, Y.: *A CFD based comparison study of conventional rudder and rudder with bulb-fins system of KVLCC2 in waves*, 30th International Ocean and Polar Engineering Conference, 2020.
- [20] Elsherbiny, K., Terziev, M., Tezdogan, T., Incecik, A., Kotb, M.: *Numerical and experimental study on hydrodynamic performance of ships advancing through different canals*, Ocean Engineering, 2020., 195., 106696.
- [21] Saettone, S., Taskar, B., Regener, P. B., Steen, S., Andersen, P.: *A comparison between fully-unsteady and quasi-steady approach for prediction of the propeller performance in waves*, Applied Ocean Research, 2020., 99., 102011.
- [22] Gamulin, A.: *Otpor i propulzija broda*, interna skripta, FSB, Zagreb, 1997.
- [23] ITTC – *Recommended procedures and guidelines*, 2017.
- [24] Molland, A., Turnock, S., Hudson, D.: *Ship resistance and propulsion: practical estimation of ship propulsive power*, Cambridge University Press, 2017.
- [25] Carlton, J. S.: *Marine propellers and propulsion*, Butterworth-Heinemann, 2019.
- [26] Helma, S.: *An extrapolation method suitable for scaling of propellers of any design*, Fourth International Symposium on Marine Propulsors, 2015.
- [27] Bertram, V.: *Practical ship hydrodynamics*, Butterworth-Heinemann, 2012.
- [28] Degiuli, N., Werner, A., *Mehanika fluida IB*, podloge za nastavu, <http://e-ucenje.fsb.hr/course/view.php?id=819>.

- [29] Werner, A., Degiuli, N.: *Mehanika fluida IIB*, podloge za nastavu, <http://e-ucenje.fsb.hr/course/view.php?id=820>.
- [30] STAR-CCM+, User guide.
- [31] 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, pp. 21-31.
- [32] Stern, F., Wilson, R. V., Coleman, H. W., Paterson, E. G.: *Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations – Part 1: methodology and procedures*, Journal of Fluids Engineering, 2001., 123(4), pp. 793-802.
- [33] El Moctar, O., Shigunov, V., Zorn, T.: *Duisburg Test Case: post-panamax container ship for benchmarking*, Ship Technology Research, 2012., 3, pp. 50-64.
- [34] Kinaci, O. K., Gokce, M. K., Delen, C.: *Resistance experiments and self-propulsion estimations of Duisburg Test Case at 1/100 scale*, Ship Technology Research, 2020., 67(2), pp. 109-120.
- [35] Kinaci, O. K., Gokce, M. K., Alkan, A. D., Kukner, A.: *On self-propulsion assessment of marine vehicles*, Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike, 2018., 69 (4), pp. 29-51.