

Numerička simulacija vlastitog pogona

Vlašić, Deni

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:417237>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-06**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Deni Vlašić

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

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

Student:

Deni Vlašić

Zagreb, 2017.

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

Zahvaljujem se profesorici Nastii Degiuli te njenim asistentima i mojim kolegama Andrei Farkasu i Ivani Martić na pruženoj potpori i stručnom vodstvu. Također se zahvaljujem svojim roditeljima i bratu na bezuvjetnoj podršci tijekom cijelog studija, zahvalio bih se i svome cimeru Ivanu Batistiću na redovnim debatama oko problematike kojom smo se bavili tijekom cijelog studiranja. Posebno se zahvaljujem svojoj curi Kristini Knežević za neizmjereno strpljenje i razumijevanje tijekom mog studija.

Deni Vlašić



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	30 -11- 2017 ilog
Klasa:	602-04/17-6/4
Ur.broj:	15-1703-17-449

DIPLOMSKI ZADATAK

Student:

Deni Vlašić

Mat. br.: 0035190676

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

NUMERIČKA SIMULACIJA POKUSA VLASTITOG POGONA

Naslov rada na
engleskom jeziku:

NUMERICAL SIMULATION OF SELF PROPULSION TEST

Opis zadatka:

Poznavanje hidrodinamičkih značajki i interakcije trupa broda i brodskog vijka prilikom rada brodskog vijka iza trupa broda predstavlja vrlo važan element u procesu projektiranja broda. Za određivanje hidrodinamičkih značajki trupa broda i brodskog vijka danas se najčešće provode pokusi s modelima brodova i brodskih vijaka u bazenima za modelska ispitivanja koji su vrlo skupi i dugotrajni. Razvojem računalne dinamike fluida moguće je odrediti hidrodinamičke značajke broda u uvjetima vlastitog pogona te time znatno skratiti vrijeme i troškove projektiranja broda i brodskog vijka. Primjenom računalne dinamike fluida moguće je u ranoj fazi projektiranja broda dobiti detaljan uvid u strujanje oko trupa broda i brodskog vijka kao i u njihovu interakciju te tako poboljšati određeni projekt, odnosno odabrati najpovoljniji projekt za modelsko ispitivanje.

U diplomskom radu potrebno je, uz pomoć programskog paketa za računalnu dinamiku fluida, numerički simulirati pokus vlastitog pogona modela broda.

U radu je potrebno:

1. Dati pregled literature vezane za numeričke simulacije pokusa vlastitog pogona.
2. Dati matematičku osnovu numeričkih simulacija viskoznog strujanja.
3. Pripremiti proračunsku mrežu, početne i rubne uvjete potrebne za numeričku simulaciju viskoznog strujanja fluida.
4. Opisati računalni model za numeričku simulaciju pokusa vlastitog pogona.
5. Izvršiti numeričku simulaciju pokusa vlastitog pogona za odabrani model broda koristeći programski paket za računalnu dinamiku fluida.
6. Usporediti numerički dobivene rezultate hidrodinamičkih značajki s dostupnim 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:

28. rujna 2017.

Rok predaje rada:

30. studenog 2017.

Predviđeni datumi obrane:

6., 7. i 8. prosinca 2017.

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.....	XI
SUMMARY	XII
1 Uvod.....	1
2 Matematički model	3
2.1. Osnovni fizikalni zakoni.....	3
2.2. Modeliranje turbulencije.....	4
2.3. k- ϵ realizible model turbulencije	4
2.4. k- ω SST model turbulencije	7
2.5. Metoda konačnih volumena.....	10
2.6. Diskretizacija transportne jednačbe.....	11
2.7. Diskretizacija domene	13
2.8. Metoda višestrukih referentnih koordinatnih sustava.....	13
2.9. Metoda virtualnog diska	14
2.10. „Body force“ metoda	14
2.11. VOF metoda za određivanje reljefa slobodne površine.....	15
2.12. Proračun relativne devijacije rezultata.....	16
3 Pokus slobodne vožnje broskog vijka.....	17
3.1. Hidrodinamički koeficijenti.....	17
3.2. Izvođenje pokusa slobodne vožnje broskog vijka	18
3.3. Rezultati pokusa slobodne vožnje broskog vijka	18
3.4. Ekstrapolacija rezultata modelskih ispitivanja na prototip.....	19
3.5. Metoda verifikacije gustoće mreže.....	20
4 Pokus vlastitog pogona	23

4.1.	Izvođenje pokusa vlastitog pogona.....	23
4.2.	Metoda s variranjem opterećenja vijka.....	23
4.3.	Metoda s konstantnim opterećenjem vijka	24
4.4.	Numerička simulacija pokusa vlastitog pogona	24
4.5.	Rezultati pokusa vlastitog pogona	24
5	Priprema domene i rubni uvjeti za numeričke simulacije.....	26
5.1.	Geometrija broskog vijka	26
5.2.	Rubni uvjeti pokusa slobodne vožnje broskog vijka	29
5.3.	Generiranje mreže kontrolnih volumena za pokus slobodne vožnje broskog vijka	30
5.4.	Kinematički rubni uvjeti numeričke simulacije slobodne vožnje broskog vijka.....	33
5.5.	Geometrija trupa broda.....	34
5.6.	Generiranje mreže konačnih volumena za pokus vlastitog pogona	36
5.7.	Rubni uvjeti numeričke simulacije pokusa vlastitog pogona	42
6	Rezultati numeričkih simulacija pokusa slobodne vožnje broskog vijka	45
6.1.	Analiza konvergencije mreže	45
6.2.	Konvergencija fizikalnih veličina.....	48
6.3.	Rezultati numeričke simulacije pokusa slobodne vožnje broskog vijka	49
6.4.	Usporedba rezultata pokusa slobodne vožnje dobivenih numeričkom simulacijom i rezultata modelskih ispitivanja ekstrapoliranih na prototip	53
7	Rezultati numeričkih simulacija pokusa vlastitog pogona.....	57
7.1.	Konvergencija integralnih veličina.....	57
7.2.	Rezultati numeričke simulacije pokusa vlastitog pogona.....	58
7.3.	Usporedba rezultata numeričkih simulacija vlastitog pogona i ekstrapoliranih rezultata vlastitog pogona na temelju modelskih ispitivanja	60
7.4.	Određivanje hidrodinamičkih koeficijenata propulzije	62
8	Zaključak.....	64
	LITERATURA.....	65

POPIS SLIKA

Slika 1: Primjer loše odabrane rezolucije mreže (a) i dobro odabrane rezolucije mreže za VOF model (b) [9]	15
Slika 2. Nacrt broskog vijka	27
Slika 3. 3D model broskog vijka u prog. paketu Rhinoceros	27
Slika 4. 3D model broskog vijka s vratilom i hidrodinamičkom kapom	28
Slika 5. Proračunska domena za simulaciju pokusa slobodne vožnje vijka.....	28
Slika 6. Proračunska domena s četvrtinom vijka	29
Slika 7. Rubni uvjeti na rubovima proračunske domene	30
Slika 8. Mreža konačnih volumena koja sadrži 1,25 milijuna KV	31
Slika 9. Mreža konačnih volumena koja sadrži 2,5 milijuna KV	31
Slika 10. Mreža konačnih volumena koja sadrži 5 milijuna KV	31
Slika 11. Uzdužni i poprečni presjek mreže konačnih volumena u blizini broskog vijka (1,25 milijuna KV).....	32
Slika 12. Uzdužni i poprečni presjek mreže konačnih volumena u blizini broskog vijka (2,5 milijuna KV).....	32
Slika 13. Uzdužni i poprečni presjek mreže konačnih volumena u blizini broskog vijka (5 milijuna KV).....	32
Slika 14. Volumeni za profinjenje mreže KV u blizini broskog vijka.....	33
Slika 15. 3D model trupa broda s kormilom	35
Slika 16. 3D prikaz domene za numeričku simulaciju pokusa vlastitog pogona.....	36
Slika 17. Volumeni unutar kojih je profinjena mreža KV	37
Slika 18. Volumeni za profinjenje mreže KV za obuhvaćanje Kelvinovog kuta	38
Slika 19. Volumeni za profinjenje mreže KV u blizini slobodne površine.....	39
Slika 20. Cilindar za profinjenje mreže KV u blizini broskog vijka.....	39
Slika 21. Presjek mreže KV u uzdužnoj vertikalnoj ravnini broda.....	40
Slika 22. Presjek mreže KV u ravnini slobodne površine.....	41
Slika 23. Presjek mreže KV u ravnini u kojoj se računa polje sustrujanja za korištenje metode virtualnog diska	42
Slika 24. Prikaz rubnih uvjeta za numeričku simulaciju pokusa vlastitog pogona	43
Slika 25. Reziduumi jednadžbi.....	49
Slika 26. Konvergenција sile poriva i momenta na vijku kroz iteracije	49

Slika 27. Vrijednost bezdimenzijske udaljenosti y^+ na tlačnoj strani vijka dobivena korištenjem $k - \varepsilon$ <i>realizable</i> (lijevo) i $k - \omega$ <i>SST</i> (desno) modela turbulencije	50
Slika 28. Vrijednost bezdimenzijske udaljenosti y^+ na podtlačnoj strani vijka dobivena korištenjem $k - \varepsilon$ <i>realizable</i> (lijevo) i $k - \omega$ <i>SST</i> (desno) modela turbulencije	51
Slika 29. Tlak na tlačnoj strani broskog vijka dobiven korištenjem $k - \varepsilon$ <i>realizable</i> (lijevo) i $k - \omega$ <i>SST</i> (desno) modela turbulencije	51
Slika 30. Tlak na podtlačnoj strani broskog vijka dobiven korištenjem $k - \varepsilon$ <i>realizable</i> (lijevo) i $k - \omega$ <i>SST</i> (desno) modela turbulencije	51
Slika 31. Razdioba kinetičke energije turbulencije na 0,7R vijka dobivena korištenjem $k - \varepsilon$ <i>realizable</i> (gore) i $k - \omega$ <i>SST</i> (dolje) modela turbulencije	52
Slika 32. Dijagram pokusa slobodne vožnje broskog vijka dobiven numeričkom simulacijom s $k - \varepsilon$ <i>realizable</i> modelom turbulencije	53
Slika 33. Dijagram pokusa slobodne vožnje broskog vijka dobiven numeričkom simulacijom s $k - \omega$ <i>SST</i> modelom turbulencije	53
Slika 34. Dijagram slobodne vožnje broskog vijka.....	56
Slika 35. Vrijednost poriva i otpora kroz fizičko vrijeme simulacije	58
Slika 36. Polje sustrujanja ispred diska vijka pri 108 o/min ($k - \varepsilon$ <i>realizable</i>)	59
Slika 37 Polje sustrujanja ispred diska vijka pri 108 o/min ($k - \omega$ <i>SST</i>).....	59
Slika 38. Reljef slobodne površne.....	60
Slika 39. Dijagram ovisnosti razlike poriva i otpora o broju okretaja vijka ($k - \omega$ <i>SST</i>).....	61
Slika 40. Dijagram ovisnosti momenta na vijku o broju okretaja vijka ($k - \omega$ <i>SST</i>).....	61

POPIS TABLICA

Tablica 1: Koeficijenti $k - \varepsilon$ <i>realizable</i> modela turbulencije.....	7
Tablica 2: Koeficijenti $k - \omega$ <i>SST</i> modela turbulencije	10
Tablica 3. Usporedba rezultata numeričkih simulacija s četvrtinom vijka i s cijelim vijkom za $k - \varepsilon$ <i>realizable</i> model turbulencije	46
Tablica 4. Usporedba rezultata numeričkih simulacija s četvrtinom vijka i s cijelim vijkom za $k - \omega$ <i>SST</i> model turbulencije	46
Tablica 5. Procjena nesigurnosti rezultata za K_T izračunatih korištenjem $k - \varepsilon$ <i>realizable</i> modela turbulencije.....	47
Tablica 6. Procjena nesigurnosti rezultata za K_Q izračunatih korištenjem $k - \varepsilon$ <i>realizable</i> modela turbulencije.....	47
Tablica 7. Procjena nesigurnosti rezultata za K_T izračunatih korištenjem $k - \omega$ <i>SST</i> modela turbulencije.....	48
Tablica 8. Procjena nesigurnosti rezultata za K_Q izračunatih korištenjem $k - \omega$ <i>SST</i> modela turbulencije.....	48
Tablica 9. Usporedba ekstrapoliranih rezultata i rezultata dobivenih numeričkom simulacijom za koeficijent poriva.....	54
Tablica 10. Usporedba ekstrapoliranih rezultata i rezultata dobivenih numeričkom simulacijom za koeficijent momenta	55
Tablica 11. Usporedba ekstrapoliranih rezultata i rezultata dobivenih numeričkom simulacijom za stupanj djelovanja broskog vijka u slobodnoj vožnji	55
Tablica 12: Usporedba rezultata pokusa vlastitog pogona.....	62
Tablica 13: Usporedba rezultata komponenata propulzije.....	63

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_0	m^2	Površina diska vijka
a_1	/	Koeficijent modela turbulencije
A_E	m^2	Razvijena površina vijka
A_m	m^2	Površina glavnog rebra
B_m	m	širina na rebru najveće površine
B_{WL}	m	Širina na vodnoj liniji
c	m/s	Brzina zvuka
c	m	Duljina tetive profila krila vijka
C_{AWL}	/	Koeficijent vodne linije
C_B	/	Koeficijent punoće
$CD_{k\omega}$	/	Koeficijent unakrsne difuzije
C_{DM}	/	Koeficijent otpora modela profila krila vijka
C_{DS}	/	Koeficijent otpora prototipa profila krila vijka
C_M	/	Koeficijent modela turbulencije
C_M	/	Koeficijent glavnog rebra
$C_{P,L}$	/	Uzdužni prizmatički koeficijent
$C_{P,V}$	/	Vertikalni prizmatički koeficijent
C_t	/	Koeficijent modela turbulencije
$C_{\varepsilon 1}$	/	Koeficijent modela turbulencije
$C_{\varepsilon 3}$	/	Koeficijent modela turbulencije
C_μ	/	Koeficijent modela turbulencije
D	kg/s	Jakost difuzije
D	m	Promjer broskog vijka
d	m	Promjer glavine vijka
d	m	Udaljenost od stjenke
D_D	m	Promjer domene za pokus slobodne vožnje vijka
D_ω	N/m^4	Član unakrsne difuzije
F	kg/s	Jakost konvekcije
F_1	/	Funkcija miješanja modela turbulencije
f_2	/	Funkcija modela turbulencije
F_2	/	Funkcija miješanja modela turbulencije
f_c	/	Faktor korekcije zakrivljenosti
F_D	N	Vanjska sila korekcije trenja
F_S	/	Koeficijent sigurnosti
f_β	/	Faktor modifikacije rastezanja vrtloga
f_{β^*}	/	Faktor modifikacije smicanja u slobodnoj struji fluida
f_μ	/	Funkcija prigušenja modela turbulencije
G_b	Pa/s	Član produkcije uzgona
g_i	m/s^2	Vektor gravitacijskog ubrzanja

G_k	Pa/s	Član produkcije turbulencije
G_{nl}	Pa/s	Član nelinearne produkcije
G_ω	N/m ⁴	Član produkcije specifične brzine disipacije
J	/	Koeficijent napredovanja vijka
J_T	/	Koeficijent napredovanja za jednakost poriva vijka u slobodnoj vožnji i iza trupa broda
k	J/kg	Specifična kinetička energija turbulencije
k_P	m	Površinska hrapavost krila vijka
K_Q	/	Koeficijent momenta brodskog vijka
K_{QT}	/	Koeficijent momenta za jednakost poriva
K_T	/	Koeficijent poriva brodskog vijka
KV	/	Kontrolni volumen
L_{ahead}	m	Duljina domene ispred brodskog vijka
L_{behind}	m	Duljina domene iza brodskog vijka
L_{CB}	m	Uzdužni položaj težišta istisnine mjereno od glavnog rebra
L_{PP}	m	Duljina broda između okomica
L_{WL}	m	Duljina vodne linije
n	o/s	Broj okretaja brodskog vijka u sekundi
N	o/min	Broj okretaja brodskog vijka u minuti
\tilde{n}	/	Jedinična normala stranice KV
N_{PP}	o/min	Broj okretaja brodskog vijka na pokusnoj plovidbi
n_j	m	Jedinični vektor normale
p	Pa	Tlak
P	m	Ušpon brodskog vijka
\bar{p}	Pa	Vremenski osrednjeni tlak
P_B	kW	Kočena snaga motora
P_D	kW	Snaga predana brodskom vijku
P_{DPP}	kW	Snaga predana brodskom vijku na pokusnoj plovidbi
p_i	/	Numerički postignut red točnosti
P_k	Pa/s	Produkcijski član specifične kinetičke energije turbulencije
Pr_t	/	Prandtlova značajka za turbulenciju
P_T	kW	Snaga poriva brodskog vijka
P_ε	Pa/s ²	Produkcijski član brzine disipacije kinetičke energije turbulencije
P_ω	N/m ⁴	Produkcijski član specifične brzine disipacije
Q	Nm	Moment na brodskom vijku
Q_{PP}	Nm	Moment na vijku na pokusnoj plovidbi
RD	%	Relativna devijacija
Re_{c0}	/	Lokalni Reynoldsov broj profila krila vijka
R_i	/	Omjer konvergencije
r_i	/	Omjer profinjenja mreže KV
r_j	m	Radij vektor

R_{TM}	N	Sila otpora modela
S	1/s	Modul tenzora brzine deformacije
S	m ²	Kontrolna površina
S_C	/	Vrijednost jakosti izvora/ponora opće fizikalne veličine u težištu KV
S_f	m ²	Površina stranice KV
$\hat{S}_{i,1}$	/	Vrijednost fizikalne veličine dobivene numeričkim simulacijama s finom mrežom KV
$\hat{S}_{i,2}$	/	Vrijednost fizikalne veličine dobivene numeričkim simulacijama s srednjom mrežom KV
$\hat{S}_{i,3}$	/	Vrijednost fizikalne veličine dobivene numeričkim simulacijama s grubom mrežom KV
S_{ij}	1/s	Tenzor brzine deformacije
S_k	Pa/s	Izvorski član specifične kinetičke energije turbulencije
S_L	/	Minimalna vrijednost promatrane veličine među mrežama KV različite gustoće
S_U	/	Maksimalna vrijednost promatrane veličine među mrežama KV različite gustoće
S_ε	Pa/s ²	Izvorski član brzine disipacije kinetičke energije turbulencije
S_φ	/	Ponor/Izvor opće fizikalne veličine
$\bar{S}_{\varphi,KV}$	/	Srednja vrijednost jakosti izvora/ponora opće fizikalne veličine
S_ω	N/m ⁴	Izvorski član specifične brzine disipacije
t	s	Vrijeme
T	s	Vremenska skala turbulencije
T	N	Poriv broskog vijka
t	m	Maksimalna debljina profila krila vijka
t	/	Koeficijent upijanja poriva
T	m	Gaz broda
T	s	Period broda
\bar{T}	K	Vremenski osrednjeno polje temperature
T_0	s	Vremenska skala turbulencije u okruženju
T_e	s	Vremenska skala velikih vrtloga
T_{PP}	o/min	Poriv vijka na pokusnoj plovidbi
u_i	m/s	Vektor brzine
U_i	/	Nesigurnost rješenja fizikalne veličine
u'_i	m/s	Vektor fluktuirajuće brzine
\bar{u}_i	m/s	Vektor osrednjene brzine
\bar{U}_i	%	Relativna nesigurnost rješenja
$u_{n,f}$	m/s	Brzina u smjeru normale na stranicu KV u težištu stranice
\bar{u}_{n,S_f}	m/s	Srednja brzina u smjeru normale stranice KV
v	m/s	Brzina broda
V_a	m/s	Brzina napredovanja broskog vijka
V_{CB}	m	Vertikalni položaj težišta mjereno od kobilice

V_{PP}	čv	Brzina broda na pokusnoj plovidbi
W_{ij}	1/s	Tenzor vrtložnosti
w_T	/	Koeficijent sustrujanja
x_i	m	Radij vektor
Z	/	Broj krila broskog vijka
α^*	/	Koeficijent modela turbulencije
α_1^*	/	Koeficijent modela turbulencije
α_2^*	/	Koeficijent modela turbulencije
α_i	/	Volumenski udio pojedine faze fluida unutar KV
β	/	Koeficijent termalne ekspanzije
β	/	Koeficijent modela turbulencije
β^*	/	Koeficijent modela turbulencije
β_1	/	Koeficijent modela turbulencije
β_1^*	/	Koeficijent modela turbulencije
β_2	/	Koeficijent modela turbulencije
β_2^*	/	Koeficijent modela turbulencije
γ	/	Koeficijent modela turbulencije
γ_1	/	Koeficijent modela turbulencije
γ_2	/	Koeficijent modela turbulencije
ΔC_D	/	Razlika koeficijenata otpora
Δt	s	Vremenski korak
ΔV	m ³	Iznos volumena kontrolnog volumena
ΔK_T	/	Ekstrapolacijski dodatak za koeficijent poriva
ΔK_Q	/	Ekstrapolacijski dodatak za koeficijent momenta
ε	J/(kg s)	Brzina disipacije kinetičke energije turbulencije
ε_0	J/(kg s)	Brzina disipacije kinetičke energije turbulencije u okruženju
$\varepsilon_{i,21}$	/	Razlika rješenja srednja-fina mreža KV
$\varepsilon_{i,32}$	/	Razlika rješenja gruba-srednja mreža KV
η_O	/	Stupanj djelovanja broskog vijka u slobodnoj vožnji
η_H	/	Stupanj utjecaja trupa
η_R	/	Stupanj prijelaza
κ	/	Koeficijent modela turbulencije
μ	Pas	Koeficijent dinamičke viskoznosti
μ_i	Pas	Koeficijent dinamičke viskoznosti i-tog fluida unutar KV
μ_t	Pas	Turbulentna dinamička viskoznost
ν	m ² /s	Koeficijent kinematičke viskoznosti
ρ	kg/m ³	Gustoća fluida
ρ_i	kg/m ³	Gustoća i-tog fluida unutar KV
σ_k	/	Koeficijent modela turbulencije
σ_{k1}	/	Koeficijent modela turbulencije
σ_{k2}	/	Koeficijent modela turbulencije

σ_ε	/	Koeficijent modela turbulencije
σ_ω	/	Koeficijent modela turbulencije
$\sigma_{\omega 1}$	/	Koeficijent modela turbulencije
$\sigma_{\omega 2}$	/	Koeficijent modela turbulencije
$\bar{\tau}_{ij}$	Pa	Osrednjeni tenzor naprezanja
Y_M	Pa/s	Modifikacija modela turbulencije za stlačivost
φ	/	Opća fizikalna veličina
φ_C	/	Vrijednost opće fizikalne veličine u težištu konačnog volumena
$\varphi_{EKSP.}$	/	Fizikalna veličina određena eksperimentalno
φ_f	/	Vrijednost opće fizikalne veličine u težištu stranice KV
$\bar{\varphi}_{KV}$	/	Srednja vrijednost opće fizikalne veličine
φ_{RDF}	/	Fizikalna veličina određena računalnom dinamikom fluida
$\bar{\varphi}_{Sf}$	/	Srednja vrijednost opće fizikalne veličine na stranici KV
ω	1/s	Specifična brzina disipacije
ω	1/s	Kutna brzina broskog vijka
ω_0	1/s	Specifična brzina disipacije u okruženju
Ω_i	1/s	Kutna brzina rotirajućeg koordinatnog sustava
∇	m ³	Volumen istisnine broda
$(T_{ij})_{t,NL}$	Pa	Nelinearna konstitutivna relacija

SAŽETAK

U radu su provedene numeričke simulacije pokusa slobodne vožnje broskog vijka u stvarnoj veličini i vlastitog pogona broda za rasuti teret u stvarnoj veličini. Modeli su ispitani u bazenu za modelska ispitivanja Brodarskog instituta u Zagrebu. Numeričke simulacije viskoznog strujanja provedene su metodom konačnih volumena (eng. Finite Volume Method) primjenom programskog paketa STAR-CCM+. Numeričke simulacije pokusa slobodne vožnje broskog vijka su provedene primjenom metode višestrukih referentnih koordinatnih sustava (eng. Multiple Reference Frame). Studija verifikacije je provedena za tri različite gustoće mreže konačnih volumena konstantnog omjera profinjenja te je pokazano da gruba mreža konačnih volumena daje zadovoljavajuće rezultate. Rezultati dobiveni numeričkim simulacijama za pokus slobodne vožnje su uspoređeni s ekstrapoliranim rezultatima modelskih ispitivanja. Pokazano je da je i za grubu mrežu moguće postići zadovoljavajuće slaganje s eksperimentalnim rezultatima. Za numeričke simulacije pokusa vlastitog pogona broda su korištene „Virtual disk“ metoda i „Body Force“ metoda za modeliranje međudjelovanja trupa broda i broskog vijka, te „Volume of Fluid“ metoda za opisivanje i određivanje položaja slobodne površine. Kao ulazni podatci za „Body force“ metodu su korišteni hidrodinamički koeficijenti broskog vijka dobiveni numeričkim simulacijama pokusa slobodne vožnje vijka. Snaga predana broskom vijku i broj okretaja broskog vijka dobiveni numeričkim simulacijama pokusa vlastitog pogona su uspoređeni s ekstrapoliranim rezultatima modelskih ispitivanja te je postignuta zadovoljavajuća točnost.

Ključne riječi: brod za rasuti teret, brodski vijak, pokus slobodne vožnje vijka, pokus vlastitog pogona, računalna dinamika fluida (RDF)

SUMMARY

In this work numerical simulations of the open water test for full scale marine propeller and self propulsion test of the bulk carrier in full scale were carried out. The models were tested in the towing tank of the Brodarski Institute in Zagreb. Viscous flow numerical simulations are performed using the Finite Volume Method within the STAR-CCM+ software package. Numerical simulations of the open water test were carried out using the Multiple Reference Frame method. The verification study was performed for three different densities of finite volume grid having constant refinement ratio. It has been shown that the coarse grid of finite volumes yields satisfactory results. The results from numerical simulations for the open water test are compared with the results extrapolated from towing tank measurements. It has been shown that it is possible to achieve a satisfactory agreement with the experimental results even with a coarse grid. For the numerical simulations of the self propulsion test, the „Virtual Disk” method and the „Body Force” method for modelling the interaction between ship hull and marine propeller and the „Volume of Fluid” method for tracking and locating of the free surface were used. As the necessary input data for the „Body force” method, the propeller hydrodynamic coefficients obtained from the numerical simulations of the open water test were used. The delivered power and propeller's rotational speed obtained numerically from the self propulsion test were compared with the results extrapolated from the model tests. The satisfactory accuracy has been achieved.

Key words: bulk carrier, marine propeller, open water test, self propulsion test, Computational Fluid Dynamics (CFD)

1 UVOD

Preliminarna faza projektiranja propulzijskog sustava broda je najbitnija faza projektiranja rentabilnog broda. Ekonomska opravdanost projekta broda u velikoj mjeri ovisi o utrošku energije potrebne za plovidbu broda. Cilj projektanta broda je projektirati isplativi brod kako sa stajališta cijene novogradnje tako i sa stajališta troškova u eksploataciji broda. Ušteda od nekoliko postotnih poena, u utrošku energije potrebne za propulziju broda, može brodovlasniku donijeti značajne uštede obzirom da u ukupnoj energetskej bilanci broda propulzijski sustav čini najveći dio. Iz prethodno navedenih razloga uvid u strujanje tekućine oko broskog trupa u interakciji s broskim vijkom iznimno je koristan prilikom projektiranja broda. Projektantu može ukazati na nedostatke i mogućnosti poboljšanja geometrije trupa u blizini broskog vijka kao i na prilagodbu broskog vijka polju brzina iza broskog trupa. Mjerenjem otpora modela broda u bazenu moguće je dobiti integralne veličine sile otpora broda u naravi primjenom određene ekstrapolacijske metode. Također moguće je mjeriti polje brzine strujanja u području krme broda korištenjem Pitot-Prandlove cijevi ili primjenom *Lasser Collor Doppler* metode. Tako je moguće odrediti nominalno polje sustrujanja te procijeniti utjecaj polja brzina strujanja iza krme broda na rad broskog vijka. Hidrodinamičke značajke broskog vijka određuju se iz pokusa slobodne vožnje broskog vijka, pri kojem broski vijak radi u homogenom polju brzine strujanja tekućine. Interakcija broskog trupa i broskog vijka se očituje iz pokusa vlastitog pogona. Ovo ispitivanje je nužno provesti kako kombinacijom rezultata modelskih ispitivanja otpora broda i slobodne vožnje broskog vijka nije moguće predvidjeti radne karakteristike broskog vijka iza trupa broda zbog njegovog utjecaja na samo polje sustrujanja. Kako provođenje modelskih ispitivanja i naknadna ekstrapolacija rezultata zahtijeva izuzetno mnogo vremena potrebne su brže, jeftinije i dostupnije metode projektantima trupa broda i broskog vijka. Jedna od metoda koja se razvojem računalnih kodova te povećanjem računalnih kapaciteta u posljednje vrijeme sve više koristi je računalna dinamika fluida (RDF). Carrica et al. [1] su prikazali metodu određivanja točke vlastitog pogona za površinske brodove uz korištenja DES (eng. *Detached Eddy Simulation*) modela turbulencije temeljenog na $k - \omega/k - \varepsilon$ modelima turbulencije. Pokus vlastitog pogona su proveli za 3 broda te su pokazali da je direktni proračun vlastitog pogona isplativ, iako traži velike računalne resurse pruža detaljan uvid u polje strujanja oko trupa broda i broskog vijka. Gao et al. [2] su proveli proračun brzina induciranih broskim vijkom koristeći „Sliding mesh“ pristup za potrebe analize interakcije trupa broda i broskog vijka. Tri metode su korištene za izračun inducirani brzina broskim vijkom: RANS (eng. *Reynolds Averaged Navier Stokes*) simulacija vlastitog pogona, RANS simulacija pokusa slobodne vožnje vijka i momentna teorija broskog vijka, te su rezultati validirani u usporedbi s eksperimentalnim rezultatima. Prve dvije spomenute metode su pokazale

dobro slaganje s eksperimentalnim rezultatima dok momentna teorija značajno precjenjuje vrijednosti induciranih brzina. Bugalski et al. [3] su testirali primjenu numeričkih simulacija temeljenih na RANS jednadžbama za provođenje pokusa vlastitog pogona u programskom paketu StarCCM+. Autori su zaključili kako je navedena metoda dovoljno dobra za predviđanje otpora broda i slobodne vožnje vijka. Fenomen interakcije broskog vijka i trupa broda nije opisan s dovoljnom točnošću, te je potrebno ispitati modifikacije strukture proračunske mreže, gustoću proračunske mreže te primjenu različitih modela turbulencije. Islam et al. [4] su proučavali utjecaj veličine domene i parametara diskretizacije proračunske domene na vrijeme potrebno za provođenje RANS simulacija slobodne vožnje broskog vijka u programskom paketu STAR-CCM+, kao njihov i utjecaj na točnost rezultata. Na temelju rezultata dobivenih korištenjem 32 različite domene za isti brodski vijak, autori su metodom planiranja pokusa pronašli optimalne dimenzije domene i parametre diskretizacije domene, koje su kasnije validirali usporedbom s eksperimentalnim podacima. Califano i Steen [5] su proveli RANS simulacije u programskom paketu Fluent kako bi ispitali utjecaje ventilacije na hidrodinamičke značajke broskog vijka pri radu na nemirnom moru. Zaključili su da izračunata dinamička opterećenja pri ventilaciji krila vijka pokazuju zadovoljavajuće slaganje s eksperimentalnim podacima kada krilo vijka izranja iz slobodne površine, dok je poriv precijenjen za sve druge položaje krila vijka. Autori to pripisuju nemogućnošću RANS rješavača da obuhvati vršni vrtlog krila vijka. Zaključeno je da vršni vrtlog krila vijka kod konvencionalnih brodskih vijaka pri ventilaciji ima jako važnu ulogu u smanjenju poriva. Seo et al. [6] su proveli pokus otpora broda, pokus slobodne vožnje vijka i pokus vlastitog pogona broda koristeći RDF metodu s RANS jednadžbama. Nestrukturirana mreža u području pramca i krme broda korištena je zbog brzine i pogodnosti generiranja mreže, a strukturirana mreža korištena je na ostatku trupa broda. Kako bi proveli numeričke simulacije s brodskim vijkom autori su koristili tehniku „Sliding mesh“. Kako bi opisali utjecaj slobodne površine u numeričkim simulacijama, autori su koristili VOF (eng. *Volume of Fluid*) metodu te su rezultate numeričkih simulacija usporedili s dostupnim eksperimentalnim rezultatima. Müller et al. [7] prikazuju analitičku studiju utjecaja mjerila na vijke za velike kontejnerske brodove, koja uzima u obzir lokalno trodimenzijsko strujanje. Korištenjem komercijalnog programskog paketa CFX provedene su numeričke simulacije slobodne vožnje za 23 modela i prototipa vijaka, koji pokrivaju značajan raspon geometrije krila vijka.

2 MATEMATIČKI MODEL

U ovom poglavlju opisani su osnovni fizikalni zakoni koji upravljaju pojavom strujanja nestlačive tekućine, modeli turbulencije koji se koriste za modeliranje pojave turbulencije u tekućini, metode matematičkog modeliranja pokusa slobodne vožnje vijka i pokusa vlastitog pogona broda. Jednadžbe u daljnjem tekstu dane su u indeksnoj notaciji.

2.1. Osnovni fizikalni zakoni

Fizikalni zakoni koji upravljaju pojavom nestlačivog strujanja tekućine su zakon očuvanja mase i zakon očuvanja količine gibanja [8].

- Zakon očuvanja mase u diferencijalnom obliku glasi:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (2.1)$$

gdje je u_i vektorsko polje brzine, a x_i je radij vektor.

- Zakon očuvanja količine gibanja u diferencijalnom obliku uz zanemarenje masenih sila (Navier-Stokesove jednadžbe):

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j}, \quad (2.2)$$

Pri čemu je uvedena supstitucija:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \quad (2.3)$$

gdje je μ dinamički koeficijent viskoznosti tekućine, ρ gustoća tekućine, p tlak, a ν kinematički koeficijent viskoznosti tekućine.

Kada tekućina struji u turbulentnom režimu, jednadžbe (2.2) i (2.3) se vremenski osrednjuju i tako tvore vremenski osrednjenu jednadžbu kontinuiteta i Reynoldsove osrednjene Navier-Stokesove jednadžbe (RANS). Sustav jednadžbi tada glasi:

- Osrednjeni zakon očuvanja mase u diferencijalnom obliku za nestlačivo strujanje:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (2.4)$$

gdje je \bar{u}_i vremenski osrednjena brzina strujanja tekućine.

- Osrednjeni zakon očuvanja količine gibanja za nestlačivo strujanje (RANS):

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j + \overline{u'_i u'_j}) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j}, \quad (2.5)$$

pri čemu je $\bar{\tau}_{ij}$:

$$\bar{\tau}_{ij} = \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right), \quad (2.6)$$

gdje je $\overline{u'_i u'_j}$ Reynoldsovo naprezanje podijeljeno s gustoćom fluida, $\bar{\tau}_{ij}$ osrednjeni tenzor viskoznog naprezanja, \bar{p} vremenski osrednjeni tlak, a u'_i je fluktuirajući dio brzine oko vremenski osrednjene brzine \bar{u}_i .

2.2. Modeliranje turbulencije

Na lijevoj strani jednadžbe (2.5) u konvektivnom članu je vidljivo Reynoldsovo naprezanje $\rho \overline{u'_i u'_j}$, koje je uvelo dodatnih 6 nepoznanica jer je Reynoldsovo naprezanje simetričan tenzor 2. reda. Zbog toga je potrebno uvesti nove jednadžbe kako bi sustav jednadžbi (2.4) i (2.5) bio zatvoren [8]. U ovom radu su korišteni $k - \omega SST$ i $k - \varepsilon$ *realizable* modeli turbulencije. Pod pretpostavkom da se učinak turbulencije može prikazati kao povećanje viskoznosti može se napisati vrtložno-viskozni model za Reynoldsovo naprezanje [8] kako slijedi:

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k, \quad (2.7)$$

gdje je μ_t turbulentna viskoznost fluida, a k je specifična kinetička energija turbulencije koja glasi:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} = \frac{1}{2} (\overline{u'_x u'_x} + \overline{u'_y u'_y} + \overline{u'_z u'_z}). \quad (2.8)$$

Iako vrtložno-viskozna hipoteza nije u potpunosti točna, jednostavna je za implementaciju te pažljivom primjenom može polučiti relativno točne rezultate [8]. Boussinesqovom hipotezom šest nepoznatih članova tenzora Reynoldsovih naprezanja zamijenjeno je s jednom nepoznanicom μ_t . Turbulentnu viskoznost moguće je modelirati raznim modelima turbulencije, a u nastavku su opisani $k - \varepsilon$ *realizable* i $k - \omega SST$ modeli turbulencije korišteni u ovom radu.

2.3. $k - \varepsilon$ *realizable* model turbulencije

$k - \varepsilon$ model turbulencije [9] je model turbulencije u kojem se rješavaju dvije transportne jednadžbe, jedna za kinetičku energiju turbulencije k i druga za brzinu disipacije kinetičke energije turbulencije ε , kako bi se izračunala turbulentna viskoznost. $k - \varepsilon$ *realizable* model turbulencije sadrži poboljšanu transportnu jednadžbu za brzinu disipacije kinetičke energije turbulencije ε , kao i poboljšanje za koeficijent modela C_μ koji se u ovom modelu turbulencije računa kao $C_\mu f_\mu$.

Funkcija f_μ , koja ovisi o glavnom toku i turbulentnim značajkama, dopušta modeliranje koje zadovoljava određena matematička ograničenja za razliku od standardnog $k - \varepsilon$ modela turbulencije gdje se C_μ smatra konstantnim.

Turbulentna viskoznost μ_t određuje se kao:

$$\mu_t = \rho C_\mu f_\mu k T, \quad (2.9)$$

gdje je C_μ koeficijent modela, f_μ funkcija prigušenja, a T vremenska skala turbulencije.

Vremenska skala turbulencije T određuje se za $k - \varepsilon$ *realizable* model turbulencije na sljedeći način:

$$T = T_e = \frac{k}{\varepsilon}, \quad (2.10)$$

gdje je T_e vremenska skala velikih vrtloga, a ε je brzina disipacije kinetičke energije turbulencije.

Funkcija f_μ glasi:

$$f_\mu = \frac{1}{C_\mu \left\{ 4 + \sqrt{6} \cos \left[\frac{1}{3} \cos^{-1} \left(\sqrt{6} \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{(\sqrt{S_{ij} S_{ji}})^3} \right) \right] \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{S_{ij} S_{ji} + W_{ij} W_{ji}} \right\}}, \quad (2.11)$$

gdje je S_{ij} tenzor brzine deformacije, a W_{ij} tenzor vrtložnosti.

Tenzor brzine deformacije i tenzor vrtložnosti su redom definirani kao:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (2.12)$$

$$W_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (2.13)$$

Transportne jednadžbe za kinetičku energiju turbulencije i brzinu disipacije turbulencije redom glase:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho (\varepsilon - \varepsilon_0) + S_k, \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{T_e} C_{\varepsilon 1} P_\varepsilon - C_{\varepsilon 2} f_2 \rho \left(\frac{\varepsilon}{T_e} - \frac{\varepsilon_0}{T_0} \right) + S_\varepsilon, \quad (2.15)$$

gdje su $\sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{\varepsilon 1}$ i $C_{\varepsilon 2}$ koeficijenti modela turbulencije, P_k i P_ε produkcijski članovi, f_2 funkcija modela turbulencije, S_k i S_ε proizvoljni izvorski članovi, ε_0 vrijednost brzine disipacije kinetičke energije turbulencije u okruženju, a T_0 vremenska skala turbulencije u okruženju.

Funkcija f_2 je definirana kao:

$$f_2 = \frac{k}{k + \sqrt{\nu\varepsilon}} . \quad (2.16)$$

Vremenska skala turbulencije u okruženju je definirana kao:

$$T_0 = \max\left(\frac{k_0}{\varepsilon_0}, C_t \sqrt{\frac{\nu}{\varepsilon_0}}\right) , \quad (2.17)$$

gdje je C_t koeficijent modela.

Produkcijski članovi P_k i P_ε za $k - \varepsilon$ *realizable* model turbulencije glase:

$$P_k = f_c G_k + G_b + Y_M, \quad (2.18)$$

$$P_\varepsilon = f_c S k + C_{\varepsilon 3} G_b , \quad (2.19)$$

gdje je f_c faktor korekcije zakrivljenosti [9], G_k je član produkcije turbulencije, G_b je član produkcije uzgona, Y_M je modifikacija za stlačivost, S modul tenzora brzine deformacije, a $C_{\varepsilon 3}$ je koeficijent modela.

Modul tenzora brzine deformacije glasi:

$$S = |S_{ij}| = \sqrt{2S_{ij}S_{ji}} . \quad (2.20)$$

Produkcija turbulencije G_k , produkcija uzgona G_b te modifikacija modela za stlačivost Y_M redom glase:

$$G_k = \mu_t S^2 - \frac{2}{3} \rho k \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} \right)^2 , \quad (2.21)$$

$$G_b = \beta \frac{\mu_t}{Pr_t} \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} g_j \right) , \quad (2.22)$$

$$Y_M = \frac{C_M k \varepsilon}{c^2} , \quad (2.23)$$

gdje je β koeficijent termalne ekspanzije, Pr_t je Prandtlova značajka za turbulenciju, \bar{T} je vremenski osrednjeno polje temperature, g_i je vektor gravitacijskog ubrzanja, C_M je koeficijent modela, a c je iznos brzine zvuka.

Tablica 1 prikazuje koeficijente $k - \varepsilon$ *realizable* modela turbulencije spomenute u ovom poglavlju.

Tablica 1: Koeficijenti $k - \varepsilon$ *realizable* modela turbulencije

Koeficijent	Iznos koeficijenta
C_M	2
C_t	1
$C_{\varepsilon 1}$	$\max\left(0,43; \frac{\eta}{5+\eta}\right)$, gdje je $\eta = \frac{Sk}{\varepsilon}$
$C_{\varepsilon 2}$	1,9
C_μ	0,09
σ_ε	1,2
σ_k	1

2.4. $k-\omega$ SST model turbulencije

$k - \omega$ SST model turbulencije [9] je model turbulencije s dvije transportne jednadžbe koji rješava jednadžbu za kinetičku energiju turbulencije k i specifičnu brzinu disipacije ω . Specifična brzina disipacije je brzina disipacije za jediničnu kinetičku energiju turbulencije. Prednost $k - \omega$ modela turbulencije nad $k - \varepsilon$ modelima turbulencije je ta što bolje opisuje granični sloj pri velikom gradijentu tlaka. Još jedna prednost $k - \omega$ modela turbulencije je mogućnost primjene u cijelom graničnom sloju, uključujući i područje dominacije viskoznih sila, bez potrebe daljnje modifikacije modela. Mana $k - \omega$ modela turbulencije je osjetljivost na iznos specifične brzine disipacije u slobodnoj struji, koja ovisi o vrijednosti specifične brzine disipacije na ulaznoj granici domene. Ovaj problem ne postoji kod $k - \varepsilon$ modela turbulencije, a kod $k - \omega$ modela turbulencije je riješen miješanjem $k - \varepsilon$ modela turbulencije u slobodnoj struji sa standardnim $k - \omega$ modelom turbulencije u graničnom sloju što je rezultiralo $k - \omega$ SST modelom turbulencije.

Turbulentna viskoznost u $k - \omega$ SST modelu turbulencije se računa prema:

$$\mu_t = \rho k T. \quad (2.24)$$

Vremenska skala turbulencije T za $k - \omega$ SST model turbulencije glasi:

$$T = \min\left(\frac{\alpha^*}{\omega}; \frac{a_1}{SF_2}\right), \quad (2.25)$$

gdje su α^* i a_1 koeficijenti modela, ω je specifična brzina disipacije, a F_2 je funkcija miješanja koja se računa na sljedeći način:

$$F_2 = \tanh\left(\left(\max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^*\omega d}; \frac{500\nu}{d^2\omega}\right)\right)^2\right), \quad (2.26)$$

gdje je β^* koeficijent modela, a d je udaljenost od krute stjenke.

Transportne jednadžbe za kinetičku energiju turbulencije i specifičnu brzinu disipacije za $k - \omega$ SST model turbulencije glase:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + P_k - \rho \beta^* f_{\beta^*}(\omega k - \omega_0 k_0) + S_k, \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right] + P_\omega - \rho \beta^* f_\beta(\omega^2 - \omega_0^2) + S_\omega, \quad (2.28)$$

gdje je σ_ω koeficijent modela, P_ω je član produkcije, f_{β^*} je faktor modifikacije smicanja u slobodnoj struji, f_β je faktor modifikacije rastezanja vrtloga, S_ω je izvorski član specifične brzine disipacije, a ω_0 je vrijednost specifične brzine disipacije u slobodnoj struji koja umanjuje raspad turbulencije.

Članovi produkcije P_k i P_ω za $k - \omega$ SST model turbulencije redom glase:

$$P_k = G_k + G_{nl} + G_b, \quad (2.29)$$

$$P_\omega = G_\omega + D_\omega, \quad (2.30)$$

gdje je G_k produkcija turbulencije, G_{nl} „nelinearna“ produkcija, G_b produkcija uslijed uzgona, G_ω produkcija specifične brzine disipacije, a D_ω je član unakrsne difuzije.

Član nelinearne produkcije G_{nl} za $k - \omega$ SST model turbulencije glasi:

$$G_{nl} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} (T_{ij})_{t,NL}, \quad (2.31)$$

gdje je $(T_{ij})_{t,NL}$ je nelinearna konstitutivna relacija [9].

Član produkcije specifične brzine disipacije G_ω glasi:

$$G_\omega = \rho\gamma \left[\left(S^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \right)^2 \right) - \frac{2}{3} \omega \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \right], \quad (2.32)$$

gdje je γ koeficijent modela.

Član unakrsne difuzije D_ω glasi:

$$D_\omega = 2\rho(1 - F_1)\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, \quad (2.33)$$

gdje je F_1 funkcija miješanja koja određuje doprinos koeficijentata u blizini stjenke iz njihovih vrijednosti daleko od stjenke, a $\sigma_{\omega 2}$ je koeficijent modela.

Funkcija miješanja F_1 se računa na slijedeći način:

$$F_1 = \tanh \left(\left[\min \left(\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0,09\omega d}; \frac{500\nu}{d^2\omega} \right); \frac{2k}{d^2 CD_{k\omega}} \right) \right]^4 \right), \quad (2.34)$$

gdje je $CD_{k\omega}$ koeficijent unakrsne difuzije i glasi:

$$CD_{k\omega} = \max \left(\frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}; 10^{-20} \right). \quad (2.35)$$

Tablica 2 prikazuje koeficijente modela $k - \omega$ SST modela turbulencije spomenute u ovom poglavlju.

Tablica 2: Koeficijenti $k - \omega$ SST modela turbulencije

Koeficijent	Iznos koeficijenta
a_1	0,31
α^*	$F_1\alpha_1^* + (1 - F_1)\alpha_2^*$
α_1^*	1
α_2^*	1
β	$F_1\beta_1 + (1 - F_1)\beta_2$
β_1	0,075
β_2	0,0828
β^*	$F_1\beta_1^* + (1 - F_1)\beta_2^*$
β_1^*	0,09
β_2^*	0,09
γ	$F_1\gamma_1 + (1 - F_1)\gamma_2$
γ_1	$\frac{\beta_1}{\beta^*} - \sigma_{\omega 1} \frac{\kappa^2}{\sqrt{\beta^*}}$
γ_2	$\frac{\beta_2}{\beta^*} - \sigma_{\omega 2} \frac{\kappa^2}{\sqrt{\beta^*}}$
κ	0,41
σ_k	$F_1\sigma_{k_1} + (1 - F_1)\sigma_{k_2}$
σ_{k_1}	0,85
σ_{k_2}	1
σ_ω	$F_1\sigma_{\omega_1} + (1 - F_1)\sigma_{\omega_2}$
σ_{ω_1}	0,5
σ_{ω_2}	0,856

2.5. Metoda konačnih volumena

Metoda konačnih volumena dijeli proračunsku domenu na konačan broj kontrolnih volumena. Konačni volumeni odgovaraju ćelijama proračunske mreže. Integralne jednadžbe u diskretnom zapisu se primjenjuju na svaki konačni volumen. Takav zapis omogućuje rješavanje sustava linearnih jednadžbi s brojem nepoznanica jednakim broju ćelija proračunske mreže. Kada su jednadžbe nelinearne, rješavaju se iterativno primjenjujući metode linearizacije. Rezultirajući sustav jednadžbi se rješava algebarskim rješavačima [9].

2.6. Diskretizacija transportne jednadžbe

Metoda konačnih volumena je integralna metoda koja se temelji na integriranju konzervativnih oblika transportnih jednadžbi po kontrolnim volumenima kojima je podijeljena proračunska domena. Opća transportna jednadžba za polje fizikalne veličine φ u nepomičnom kontrolnom volumenu glasi [10]:

$$\frac{d}{dt} \int_{KV} \rho \varphi dV = - \oint_{S_f} \left(\rho u_j \varphi - \Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) n_j dS + \int_{KV} S_\varphi dV, \quad (2.36)$$

gdje je φ opća fizikalna veličina, KV je kontrolni volumen, S je kontrolna površina, n_j je jedinični vektor normale na kontrolnu površinu, a S_φ je jakost izvora (ponora) fizikalne veličine φ .

Uz $\rho = \text{const.}$ integral u članu brzine promjene sadržaja fizikalnog svojstva φ se može sukladno integralnom teoremu o srednjoj vrijednosti izraziti na slijedeći način:

$$\int_{KV} \varphi dV = \bar{\varphi}_{KV} \cdot \Delta V, \quad (2.37)$$

gdje je ΔV iznos volumena kontrolnog volumena, a $\bar{\varphi}_{KV}$ srednja vrijednost fizikalne veličine unutar kontrolnog volumena. Za slučaj linearne raspodjele fizikalne veličine u kontrolnom volumenu, vrijednost fizikalne veličine u težištu kontrolnog volumena jednaka je osrednjenosti vrijednosti fizikalne veličine po kontrolnom volumenu, tj. $\bar{\varphi}_{KV} = \varphi_C$, gdje je φ_C vrijednost fizikalnog svojstva u težištu volumena. Nadalje član lokalne promjene, uz pretpostavku približno linearne promjene fizikalnog svojstva φ unutar kontrolnog volumena može se aproksimirati kako slijedi [10]:

$$\frac{d}{dt} \int_{KV} \rho \varphi dV = \frac{d}{dt} (\rho \bar{\varphi}_{KV} \cdot \Delta V) \approx \frac{d}{dt} (\rho \varphi_C \cdot KV) = \rho \frac{d\varphi_C}{dt} \cdot \Delta V, \quad (2.38)$$

Slično vrijedi i za izvorski član:

$$\int_{KV} S_\varphi dV = \bar{S}_{\varphi,KV} \cdot KV \approx S_C \cdot \Delta V, \quad (2.39)$$

gdje je $\bar{S}_{\varphi,KV}$ srednja vrijednost jakosti izvora fizikalne veličine φ u kontrolnom volumenu, a S_C je vrijednost jakosti izvora fizikalne veličine φ u težištu kontrolnog volumena [10].

Površinski integral u jednadžbi (2.36) označava protok fizikalnog svojstva kroz površinu kontrolnog volumena uslijed difuzije i konvekcije. Ta dva vektora u općem slučaju nisu

kolinearna, a protoku fizikalne veličine kroz stranice kontrolnog volumena doprinosi samo normalna komponenta:

$$\oint_{S_f} \left(\rho u_j \varphi - \Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) n_j dS = \oint_{S_f} \left(\rho u_n \varphi - \Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) dS = \left[(\overline{u_n \varphi})_{S_f} - \Gamma \left(\frac{\partial \varphi}{\partial n} \right)_{S_f} \right] S_f, \quad (2.40)$$

gdje je S_f površina jedne stranice kontrolnog volumena.

Konvekcijski i difuzijski član redom glase:

- Konvekcijski član:

$$(\overline{u_n \varphi})_{S_f} \approx \bar{u}_{n,S_f} \bar{\varphi}_{S_f} \approx u_{n,f} \varphi_f, \quad (2.41)$$

gdje f označava točku u težištu stranice kontrolnog volumena, \bar{u}_{n,S_f} je srednja brzina u smjeru normale na stranicu kontrolnog volumena, $u_{n,f}$ je vrijednost brzine u smjeru normale na stranicu kontrolnog volumena u težištu, $\bar{\varphi}_{S_f}$ je srednja vrijednost fizikalne veličine na stranici kontrolnog volumena, a φ_f vrijednost fizikalne veličine u težištu stranice kontrolnog volumena. Vrijednost φ_f moguće je dobiti iz vrijednosti φ u težištima kontrolnih volumena koje promatrana stranica kontrolnog volumena razdvaja.

- Difuzijski član:

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial n} \right)_{S_f} \approx \left(\frac{\partial \varphi}{\partial n} \right)_f, \quad (2.42)$$

gdje je $\left(\frac{\partial \varphi}{\partial n} \right)_{S_f}$ srednja vrijednost derivacije u smjeru normale na stranicu kontrolnog volumena, a $\left(\frac{\partial \varphi}{\partial n} \right)_f$ vrijednost derivacije fizikalne veličine u smjeru normale u težištu stranice kontrolnog volumena.

Uvrštavanjem jednadžbi (2.38), (2.39), (2.41) i (2.42) u jednadžbu (2.36) dobiva se njen diskretiziran oblik koji glasi:

$$\rho \cdot KV \cdot \frac{d\varphi_C}{dt} = - \sum_{S_f} \left(F \varphi_f - D \left[\frac{\partial \varphi}{\partial \tilde{n}} \right]_f \right)^{S_f} + S_C \cdot KV, \quad (2.43)$$

gdje je F jakost konvekcije, D je jakost difuzije, \sum_{S_f} označava sumu po svim stranicama kontrolnog volumena, a \tilde{n} je jedinična normala promatrane površine kontrolnog volumena.

2.7. Diskretizacija domene

Proračunska domena je diskretizirana konačnim brojem kontrolnih volumena što rezultira geometrijskom mrežom. Kontrolni volumeni se ne preklapaju, dodiruju se na svojim graničnim površinama te u potpunosti popunjavaju područje proračuna. Geometrijska mreža može biti strukturirana ili nestrukturirana. Položaj svakog volumena u području proračuna je opisan trima indeksima u strukturiranoj geometrijskoj mreži dok u nestrukturiranoj to nije slučaj što komplicira programiranje metode. Matrica sustava diskretiziranih jednadžbi u strukturiranim mrežama ima pravilnu dijagonalnu strukturu što nije slučaj kod nestrukturiranih mreža. Diskretizacija područja proračuna se može napraviti na dva načina. Prvim načinom prvenstveno se postavljaju proračunski čvorovi, a potom se formiraju konačni volumeni čija su težišta u proračunskim čvorovima. Drugim načinom se prvenstveno formiraju konačni volumeni, a potom se postavljaju proračunski čvorovi u težišta konačnih volumena [10]. Kontrolni volumeni moraju zadovoljiti sljedeće uvjete:

- svi kontrolni volumeni su zatvoreni i slabo konveksni,
- kontrolni volumeni potpuno prekrivaju domenu i ne preklapaju se,
- centar kontrolnog volumena nalazi se u težištu kontrolnog volumena.

2.8. Metoda višestrukih referentnih koordinatnih sustava

Metoda višestrukih referentnih koordinatnih sustava [9] se koristi za rješavanje fizikalnih pojava koje nisu u načelu stacionarne, ali ne sadrže velike nestacionarnosti kao što je i sam pokus slobodne vožnje vijka. Ova metoda se primjenjuje kod proračuna uprosječenih stacionarnih rješenja problema. Pokus slobodne vožnje vijka se provodi za svaki koeficijent napredovanja vijka, pri čemu se brzina vrtnje vijka i brzina lađice drže konstantnima. Izmjerene veličine poriva i momenta na vijku se potom osrednjuju u vremenu te se računa stacionarna vrijednost poriva i momenta. Prema tome, može se pretpostaviti da je pokus slobodne vožnje vijka stacionaran problem te se može primijeniti metoda višestrukih referentnih koordinatnih sustava.

U slučaju metode višestrukih referentnih koordinatnih sustava, jednadžbe koje upravljaju pojavom se rješavaju zajedno s dodatnim članovima ubrzanja. Proračunska domena je podijeljena na stacionarni i rotirajući dio. Gledano iz nepomične točke apsolutna brzina i relativna brzina su povezane jednadžbom kako slijedi:

$$u_i^R = u_i^I - \varepsilon_{ijk} \Omega_j r_k, \quad (2.44)$$

gdje je r_j radij vektor, Ω_i kutna brzina, nadindeks I označava inercijski koordinatni sustav, a nadindeks R označava relativni koordinatni sustav.

Zakon očuvanja mase i zakon očuvanja količine gibanja u relativnom koordinatnom sustavu sada glase:

$$\frac{\partial u_i^R}{\partial x_i} = 0, \quad (2.45)$$

$$\frac{\partial u_i^R}{\partial t} + \varepsilon_{ijk} \frac{d\Omega_j}{dt} r_k + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i^R u_j^R) + 2\varepsilon_{ijk} \Omega_j u_k^R + \varepsilon_{ijk} \varepsilon_{jlm} \Omega_l \Omega_m r_k = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_j^R}{\partial x_i \partial x_j}, \quad (2.46)$$

gdje je $2\Omega_i u_j^R$ Coriolisovo ubrzanje, a $\Omega_i \Omega_j r_k$ normalno (centripetalno) ubrzanje.

2.9. Metoda virtualnog diska

Metoda virtualnog diska je temeljena na modeliranju propelera, turbina, rotora, ventilatora itd. kao aktuatorskih diskova [9]. Prilikom modeliranja propulzije teorija koja se koristi naziva se teorija propulzijskog diska. Teorija propulzijskog diska pripisuje geometrijskom liku (krugu) neka svojstva koja mogu imati samo materijalna tijela. Propulzijski disk označava krug postavljen okomito na smjer strujanja koji u svakoj točki, na račun utrošene snage, proizvodi skok tlaka u fluidu koji protječe kroz propulzijski disk [11].

Djelovanje propulzijskog diska na polje strujanja opisuje se izvorskim članom u momentnoj jednadžbi. Izvorski član je raspodijeljen preko ploštine propulzijskog diska [9].

2.10. „Body force“ metoda

Ova metoda namijenjena je modeliranju rada brodskog vijka iza trupa broda. Metoda modelira učinke polja sustrujanja koje nastaje u interakciji trupa broda i brodskog vijka. Sustrujanje inducirano vijkom ovisi o strujanju oko trupa broda, kao što i polje strujanja inducirano brodskim vijkom utječe na strujanje oko trupa broda [9].

„Body force“ metoda propulzora se koristi za modeliranje vijčane propulzije broda kao dio DFBI (eng. *Dynamic Fluid Body Interaction*) numeričke simulacije. Prednost ove metode je osim manjeg broja čvorova proračunske mreže i jednostavnija priprema numeričke simulacije u kojoj propulzor fizički ne rotira i nije potrebno provoditi „Sliding mesh“ simulaciju. Ova metoda time štedi na proračunskom vremenu kao i na potrebnim računalnim resursima. Ova metoda ne daje uvid u polje strujanja oko brodskog vijka, ali je dovoljno dobra za proračun propulzijskih značajki sustava vijak-trup broda [9].

U „Body Force“ metodi brodski vijak potrebno je opisati sljedećim podacima [9]:

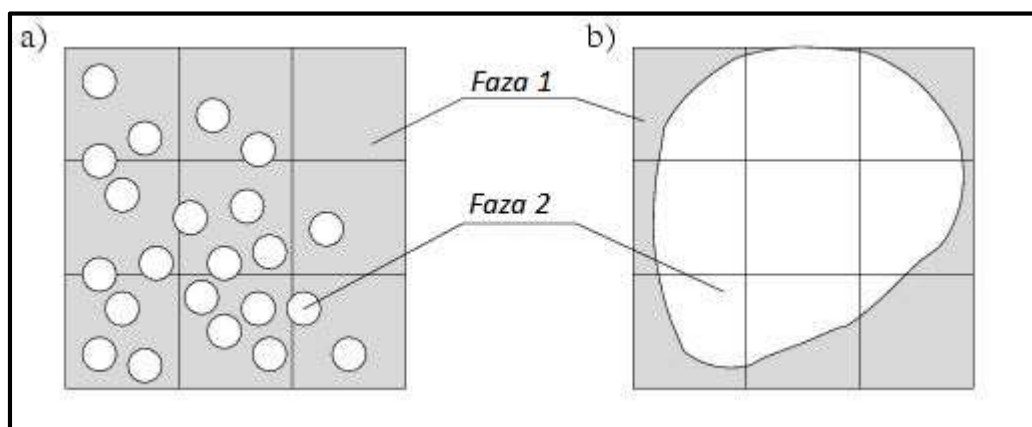
- Definicija virtualnog diska u pogledu njegove položaja i smjera u kojem poriv vijka djeluje,
- Dijagram slobodne vožnje brodskog vijka ($K_T - K_Q - J$),

- Radna točka brodskog vijka (broj okretaja brodskog vijka),
- Položaj presjeka na kojem se za virtualni disk računa srednja brzina (brzina napredovanja vijka) nastrujavanja tekućine na vijak.

Iz navedenih podataka se računa sila ovisna o radijusu uzrokovana radom brodskog 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 [9].

2.11. VOF metoda za određivanje reljefa slobodne površine

VOF metoda se koristi za opisivanje slobodne površine, tj. granice dvaju medija koji se ne miješaju homogeno [9]. VOF je jednostavan model za rješavanje višefaznog strujanja tj. rješavanje interakcije različitih faza fluida unutar proračunske domene. Pretpostavke modela su da obje faze fluida na zajedničkoj granici imaju istu brzinu, tlak te temperaturu. Zbog svoje numeričke učinkovitosti ovaj model je pogodan za rješavanje strujanja unutar kojeg pojedine faze fluida tvore velike strukture s relativno malom dodirnom površinom. Za dovoljno dobar opis fizikalne pojava heterogenog miješanja fluida potrebno je postići zadovoljavajuću rezoluciju mreže. Slika 1 prikazuje pravilno i nepravilno izabranu rezoluciju mreže KV ovisno o veličini struktura koje tvore različite faze fluida unutar proračunske domene.



Slika 1: Primjer loše odabrane rezolucije mreže (a) i dobro odabrane rezolucije mreže za VOF model (b) [9]

Prostorna distribucija pojedine faze fluida u određenom vremenskom trenutku je definirana varijablom koja se zove „volume fraction“ (volumenski udio). Vrijednosti fizikalnih veličina u pojedinom KV određuju se sljedećim jednadžbama:

$$\rho = \sum_i \rho_i \alpha_i , \quad (2.47)$$

$$\mu = \sum_i \mu_i \alpha_i , \quad (2.48)$$

gdje je α_i volumenski udio pojedine faze fluida unutar KV , ρ_i gustoća i -tog fluida unutar KV , a μ_i dinamička viskoznost i -tog fluida unutar KV .

2.12. Proračun relativne devijacije rezultata

U ovome radu relativna devijacija iznosa fizikalnih veličina dobivenih numeričkim simulacijama (φ_{RDF}) naspram iznosa fizikalnih veličina dobivenih ekstrapolacijom rezultata provedenih modelskih ispitivanja (φ_{EKSP}) izračunata je prema:

$$RD, \% = \frac{\varphi_{RDF} - \varphi_{EKSP}}{\varphi_{EKSP}} \cdot 100, \quad (2.49)$$

3 POKUS SLOBODNE VOŽNJE BRODSKOG VIJKA

Pokusom slobodne vožnje broskog vijka određuju se hidrodinamičke značajke broskog vijka u homogenom polju brzine strujanja tekućine ispred vijka. Prilikom rada broskog vijka u homogenom polju brzine strujanja tekućine sila poriva koju ostvaruje brodski vijak i moment koji je potreban za ostvarivanje sile poriva su stacionarni u vremenu za konstantnu brzinu napredovanja vijka pri konstantnom broju okretaja vijka. Prilikom rada broskog vijka iza trupa broda spomenute veličine nisu stacionarne u vremenu obzirom da vijak radi u nehomogenom polju brzine strujanja tekućine ispred vijka. Nehomogeno polje brzine strujanja je rezultat postojanja tijela neposredno ispred vijka. Kada bi tijelo koje je ispred vijka bilo osno simetrično s obzirom na os rotacije vijka te duboko uronjeno, polje sustrujanja također ne bi bilo homogeno, ali bi integralne veličine poriva i momenta na vijku bile stacionarne u vremenu iz razloga osno simetričnog polja sustrujanja.

3.1. Hidrodinamički koeficijenti

Rezultat mjerenja pokusa slobodne vožnje broskog vijka su integralna sila i moment na broskom vijku. Zbog potrebe ekstrapolacije rezultata eksperimenta dobivenih na različitim mjerilima modela, integralne veličine se svode na bezdimenzijske hidrodinamičke koeficijente koji glase kako slijedi [12]:

- Koeficijent poriva:

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}, \quad (3.1)$$

gdje je T sila poriva u aksijalnom smjeru, n je broj okretaja u sekundi broskog vijka, a D je promjer vijka.

- Koeficijent momenta:

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}, \quad (3.2)$$

gdje je Q moment koji je potreban za rotaciju vijka.

- Koeficijent napredovanja:

$$J = \frac{V_a}{nD}, \quad (3.3)$$

gdje je V_a brzina napredovanja vijka.

- Stupanj djelovanja broskog vijka u slobodnoj vožnji glasi:

$$\eta_0 = \frac{P_T}{P_D}, \quad (3.4)$$

gdje je P_T snaga poriva vijka, a P_D snaga predana vijku.

Snaga predana brodskom vijku se može izraziti kao:

$$P_D = 2\pi nQ, \quad (3.5)$$

gdje $2\pi n$ predstavlja kutnu brzinu vijka ω .

Snaga poriva glasi:

$$P_T = TV_a. \quad (3.6)$$

Lako se može pokazati da je stupanj djelovanja brodskog vijka u slobodnoj vožnji jednak:

$$\eta_0 = \frac{K_T J}{K_Q 2\pi}, \quad (3.7)$$

3.2. Izvođenje pokusa slobodne vožnje brodskog vijka

Pokus slobodne vožnje brodskog vijka se izvodi u bazenu za modelska ispitivanja. Prilikom eksperimenta fizikalne veličine koje se mjere su [13]:

- brzina napredovanja,
- sila poriva,
- moment na modelu vijka,
- broj okretaja modela vijka,
- temperatura tekućine (vode).

Poriv i moment modela vijka se mjere pomoću dinamometra za pokus slobodne vožnje, a broj okretaja vijka tijekom ispitivanja se treba držati konstantnim kako bi se dobili pouzdani podatci. Prije samog pokusa slobodne vožnje u svrhu kalibracije mjernih uređaja potrebno je provesti ispitivanja samo s glavčinom vijka kako bi se izmjerio utjecaj strujno oblikovane kape [13].

3.3. Rezultati pokusa slobodne vožnje brodskog vijka

Rezultati pokusa slobodne vožnje modela brodskog vijka su sile poriva i momenti za pojedine brzine napredovanja vijka pri konstantnom broju okretaja. Sila poriva i moment mogu imati oscilacije za vrijeme izvođenja pokusa pri jednoj brzini, a zbog pretpostavke stacionarnog strujanja sila poriva i moment se osrednjuju u vremenu trajanja jednog pokusa. Pokusi se izvode od koeficijenta napredovanja $J = 0$, što se postiže mirovanjem kolica, sve do radne točke s brzinom kolica pri kojoj je $K_T \leq 0$.

3.4. Ekstrapolacija rezultata modelskih ispitivanja na prototip

Rezultati pokusa slobodne vožnje broskog vijka mogu se ekstrapolirati na mjerilo prototipa. Kako bi se eliminirao utjecaj mjerila na rezultate, ITTC (eng. *International Towing Tank Conference*) preporučuje sljedeću ekstrapolacijsku metodu [14]:

- ekstrapolacija koeficijenta poriva:

$$K_{TS} = K_{TM} - \Delta K_T, \quad (3.8)$$

gdje indeks S označava prototip, indeks M označava model, a ΔK_T je ekstrapolacijski dodatak za koeficijent poriva,

- ekstrapolaciju koeficijenta momenta:

$$K_{QS} = K_{QM} - \Delta K_Q, \quad (3.9)$$

gdje je ΔK_Q ekstrapolacijski dodatak za koeficijent momenta.

Iznosi ekstrapolacijskih dodataka za koeficijent poriva i koeficijent momenta se računaju prema [14]:

- ekstrapolacijski dodatak za koeficijent poriva:

$$\Delta K_T = -\Delta C_D \cdot 0,3 \cdot \frac{P}{D} \cdot \frac{c \cdot Z}{D}, \quad (3.10)$$

gdje je ΔC_D razlika u koeficijentu otpora, c je duljina tetive na reprezentativnom presjeku krila vijka koji se prema preporuci nalazi na 75 % radijusa vijka, P je uspon vijka, a Z je broj krila vijka,

- ekstrapolacijski dodatak za koeficijent momenta:

$$\Delta K_Q = \Delta C_D \cdot 0,25 \cdot \frac{c \cdot Z}{D}. \quad (3.11)$$

Razlika u koeficijentu otpora na reprezentativnom presjeku krila vijka se računa kao razlika koeficijenta otpora modela i koeficijenta otpora prototipa:

$$\Delta C_D = C_{DM} - C_{DS}, \quad (3.12)$$

gdje C_{DM} koeficijent otpora modela profila krila vijka na reprezentativnom radijusu, a C_{DS} koeficijent otpora prototipa profila krila vijka na reprezentativnom radijusu.

Koeficijenti otpora se računaju prema slijedećim jednadžbama [14]:

- Koeficijent otpora modela profila krila vijka na reprezentativnom radijusu:

$$C_{DM} = 2 \left(1 + 2 \frac{t}{c} \right) \cdot \left[\frac{0.044}{(Re_{c0})^{\frac{1}{6}}} - \frac{5}{(Re_{c0})^{\frac{2}{3}}} \right], \quad (3.13)$$

gdje je t maksimalna debljina profila krila vijka na reprezentativnom radijusu, Re_{c0} je lokalni Reynoldsov broj profila krila vijka na reprezentativnom radijusa vijka temeljen na duljini tetive profila,

- Koeficijent otpora prototipa profila krila vijka na reprezentativnom radijusu:

$$C_{DS} = 2 \left(1 + 2 \frac{t}{c} \right) \left[1,89 + 1,62 \cdot \log \frac{c}{k_P} \right]^{-2.5}, \quad (3.14)$$

gdje je k_P površinska hrapavost krila vijka koja se pretpostavlja prema preporuci ITTC-a: $k_P = 30 \times 10^{-6}$ m.

3.5. Metoda verifikacije gustoće mreže

Prema preporučenoj proceduri za određivanje konvergencije gustoće mreže potrebno je izračunati razlike u rezultatima odabranih fizikalnih veličina. Rezultati se uspoređuju za različite gustoće mreže, a numeričke simulacije su provedene uz iste početne i rubne uvjete. Razlike između rezultata za različite gustoće mreže se računaju kao [15]:

- Razlika rezultata između srednje i fine mreže:

$$\varepsilon_{i,21} = \hat{S}_{i,2} - \hat{S}_{i,1}, \quad (3.15)$$

gdje je $\hat{S}_{i,1}$ vrijednost fizikalne veličine koja se uspoređuje dobivena finom mrežom, a $\hat{S}_{i,2}$ vrijednost fizikalne veličine koja se uspoređuje dobivena srednjom mrežom.

- Razlika rezultata između grube i srednje mreže:

$$\varepsilon_{i,32} = \hat{S}_{i,3} - \hat{S}_{i,2}, \quad (3.16)$$

gdje je $\hat{S}_{i,3}$ vrijednost fizikalne veličine koja se uspoređuje dobivena grubom mrežom.

Razlike u rješenjima za istu promatranu veličinu s različitim gustoćama mreže, $\varepsilon_{i,21}$ i $\varepsilon_{i,32}$, su potrebne kako bi se mogao izračunati omjer konvergencije koji glasi:

$$R_i = \frac{\varepsilon_{i,21}}{\varepsilon_{i,32}}, \quad (3.17)$$

Prema prije definiranom omjeru konvergencije, jednadžba (6.3), moguća su četiri tipa konvergencije [16]:

- monotona konvergencija: $0 < R_i < 1$,

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

Za slučaj pokusa slobodne vožnje broskog vijka veličine koje se uspoređuju za različite gustoće mreže su vrijednosti koeficijent poriva i koeficijent momenta.

Ovisno o tipu konvergencije mogu se procijeniti nesigurnosti rješenja numeričkih simulacija koristeći tri mreže konačnih volumena različitih gustoća. Za monotonu konvergenciju, numerički postignut red točnosti određuje se koristeći Richardsonovu ekstrapolaciju:

$$p_i = \frac{\ln\left(\frac{\varepsilon_{i,32}}{\varepsilon_{i,21}}\right)}{\ln(r_i)}, \quad (3.18)$$

gdje je r_i omjer profinjenja mreže koji je potrebno držati konstantnim za omjer fine i srednje te srednje i grube mreže konačnih volumena.

Koristeći postignuti red točnosti p nesigurnost rješenja iz razloga profinjenja mreže moguće je za monotonu konvergenciju izračunati kao:

$$U_i = F_S \left| \frac{\varepsilon_{i,21}}{r_i^{p_i} - 1} \right|, \quad (3.19)$$

gdje je F_S koeficijent sigurnosti koji se uzima u rasponu vrijednosti od 1,25 do 3.

U slučaju oscilatorne konvergencije nesigurnost rješenja se određuje na slijedeći način [17]:

$$U_i = F_S \cdot 0,5 |S_U - S_L|, \quad (3.20)$$

gdje je S_U maksimalna vrijednost rješenja promatrane fizikalne veličine dobivena numeričkim simulacijama različitih gustoća mreža konačnih volumena, a S_L minimalna vrijednost promatrane fizikalne veličine dobivena numeričkim simulacijama različitih gustoća mreža konačnih volumena.

Za slučaj monotone ili oscilatorne divergencije nesigurnost rješenja ne može se procijeniti formalno već se prema [18] nesigurnost rješenja može procijeniti koristeći maksimalnu devijaciju među rješenjima numeričke simulacije na različitim gustoćama mreža:

$$U_i = F_S |S_U - S_L|. \quad (3.21)$$

Za navedene tipove konvergencije promatrane fizikalne veličine, moguće je pomoću jednadžbi (3.19), (3.20) i (3.21) procijeniti nesigurnost rješenja. U ovom radu će se izračunate nesigurnosti rješenja prikazati kao relativne:

$$\bar{U}_i, \% = \frac{U_i}{\hat{S}_{i,1}} \cdot 100 . \quad (3.22)$$

4 POKUS VLASTITOG POGONA

Pokus vlastitog pogona se izvodi kako bi se odredio broj okretaja vijka i snaga predana vijku za postizanje zahtijevane brzine broda pri određenom gazu. Prije provođenja pokusa vlastitog pogona izvodi se pokus slobodne vožnje vijka kao i pokus otpora broda. Rezultati iz pokusa koji prethode pokusu vlastitog pogona su potrebni kako bi se mogao približno odrediti broj okretaja vijka za određenu brzinu modela broda, kao i za određivanje propulzijskih hidrodinamičkih koeficijenata za brod s brodskim vijkom.

4.1. Izvođenje pokusa vlastitog pogona

Pokus vlastitog pogona se izvodi u bazenu za modelska ispitivanja, a mjerilo modela trupa broda i broskog vijka treba biti isto. Veličine koje se mjere za vrijeme pokusa vlastitog pogona su [19]:

- brzina modela,
- otpor/sila tegljenja,
- poriv modela broskog vijka,
- moment modela broskog vijka,
- broj okretaja modela broskog vijka,
- poriv sapnice (ako postoji),
- bočna sila na pod-propulzor (ako postoji),
- temperatura vode u kojoj se pokus provodi,
- gaz na krmu i pramcu.

Pokus vlastitog pogona se može izvoditi na dva načina preporučena od strane ITTC-a: variranjem opterećenja i s konstantnim opterećenjem.

4.2. Metoda s variranjem opterećenja vijka

Prije provođenja eksperimenta s variranjem opterećenja [19] potrebno je odrediti željenu brzinu modela broda te je iz pokusa slobodne vožnje vijka potrebno približno odrediti silu poriva koju vijak mora isporučiti kao i broj okretaja vijka za danu brzinu napredovanja određenu brzinom modela broda i zahtijevanom silom poriva. Kolica za provedbu pokusa bi trebala kontinuirano ubrzavati dok se ne postigne željena brzina modela kao i broj okretaja vijka, kojeg je također potrebno kontinuirano povećavati. Kada se postigne željena brzina napredovanja modela i broj okretaja vijka model je potrebno otpustiti i tegliti samo dinamometrom koji mjeri otpor. Mjerenje treba započeti tek kada se vrijednosti mjerenih fizikalnih veličina stabiliziraju. Potrebno je izvršiti više pokusa s različitim brojem okretaja vijka kako bi se mogla odrediti točka vlastitog pogona za odabranu brzinu modela broda.

4.3. Metoda s konstantnim opterećenjem vijka

Prije početka svake pokusne vožnje je potrebno odrediti brzinu modela broda kao i odgovarajuću silu tegljenja za predviđeni broj okretaja vijka. Model se tegli dodatnom vanjskom silom koja odgovara korekciji trenja (F_D). Kolica se potom kontinuirano ubrzavaju do odabrane brzine modela, a broj okretaja vijka se kontinuirano povećava dok model ne postigne točku vlastitog pogona ili kada se postigne željena sila korekcije trenja (F_D). Rasponom brzina potrebno je obuhvatiti sve brzine za koje se žele dobiti podatci o propulziji. Preporuka je provesti ispitivanja u rasponu od 5% ispod i iznad raspona brzina [19].

4.4. Numerička simulacija pokusa vlastitog pogona

Numeričke simulacije vlastitog pogona su provedene metodom s variranjem opterećenja vijka, tj. za željenu brzinu broda je procijenjen broj okretaja brodskog vijka te je broj okretaja zadan kao ulazni podatak u metodi virtualnog diska. Numeričkom simulacijom određen je poriv brodskog vijka i otpor broda. Otpor broda s brodskim vijkom nije jednak otporu broda bez brodskog vijka zbog međudjelovanja brodskog vijka i trupa broda. Utjecaj vijka na otpor broda se modelira pomoću „Body Force“ metode. Kako bi se odredila točka vlastitog pogona potrebno je provesti najmanje dvije numeričke simulacije za istu brzinu broda, ali s različitim brojem okretaja brodskog vijka. Tako je u jednoj simulaciji razlika poriva i otpora broda bila negativna a u drugoj pozitivna. Nakon što se odrede razlike poriva i otpora broda za svaku numeričku simulaciju linearnom interpolacijom se pronalazi točka vlastitog pogona tj. broj okretaja vijka pri kojem je razlika poriva i otpora jednaka nuli.

4.5. Rezultati pokusa vlastitog pogona

Rezultati pokusa vlastitog pogona su broj okretaja vijka u točki vlastitog pogona za zadanu brzinu broda, snaga predana brodskom vijku i koeficijenti propulzije. Snaga predana brodskom vijku glasi:

$$P_D = \omega Q = 2\pi n Q = \frac{\pi N}{30} Q, \quad (4.1)$$

gdje je ω kutna brzina brodskog vijka, a N broj okretaja u minuti brodskog vijka.

Koeficijenti propulzije se prema preporuci iz [19] računaju na slijedeći način:

- Koeficijent upijanja:

$$t = \frac{T + F_D - R_{TM}}{T}, \quad (4.2)$$

gdje je F_D vanjska sila korekcije trenja, a R_{TM} sila otpora modela.

- Koeficijent sustrujanja:

$$w_T = 1 - \frac{J_T n D}{v}, \quad (4.3)$$

gdje je J_T koeficijent napredovanja broskog vijka određen pomoću jednakosti poriva vijka u točki vlastitog pogona, a v brzina broda.

- Stupanj prijelaza:

$$\eta_R = \frac{K_{QT}}{K_Q}, \quad (4.4)$$

gdje je K_{QT} koeficijent momenta za koeficijent napredovanja J_T pri kojem se postiže poriv T prilikom rada broskog vijka iza krme broda.

- Stupanj utjecaja trupa:

$$\eta_H = \frac{1 - t}{1 - w_T}. \quad (4.5)$$

5 PRIPREMA DOMENE I RUBNI UVIJETI ZA NUMERIČKE SIMULACIJE

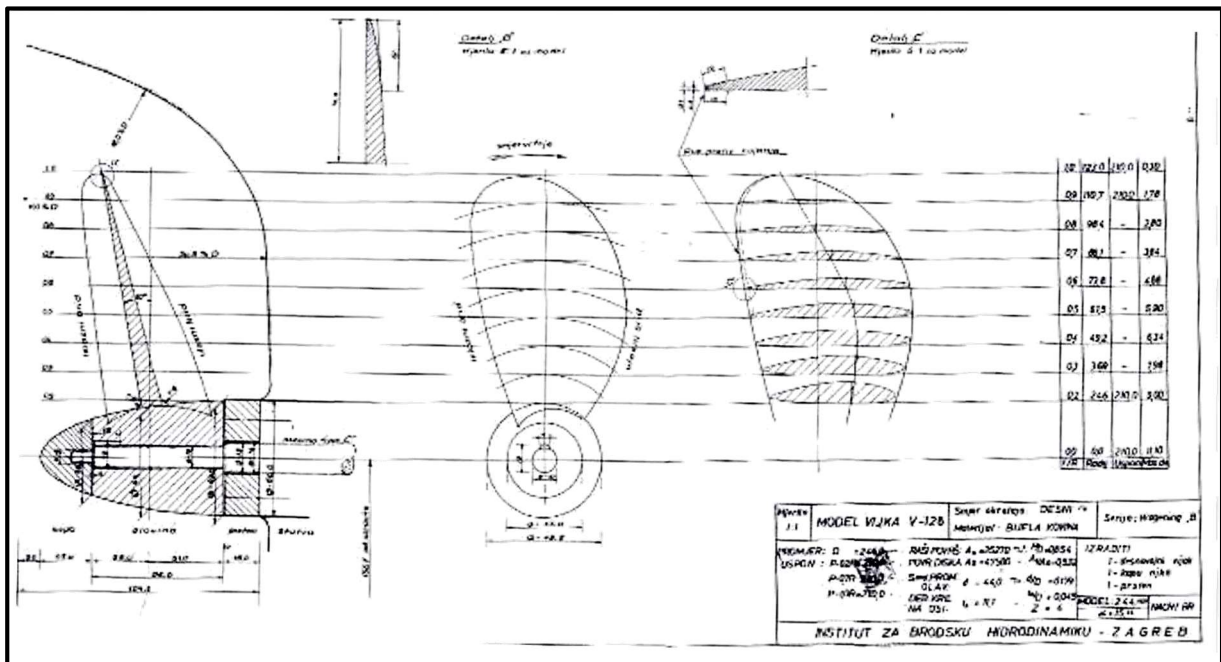
Za potrebe numeričkih simulacija potrebno je pripremiti proračunske domene. Domena za simulaciju mora biti takvih dimenzija da njene granice ne utječu na konačno rješenje. U ovom poglavlju bit će opisan način pripreme proračunske domene.

5.1. Geometrija brodskog vijka

Brodski vijak korišten u modelskim ispitivanjima pokusa vlastitog pogona je vijak s zalihe Wageningeške B serije. Podatci o vijku su sljedeći:

- broj krila, $Z = 4$,
- promjer modela vijka, $D = 0,246$ m,
- omjer uspona i promjera vijka, $P/D = 0,8$,
- omjer promjera glavčine i promjera vijka, $d/D = 0,1789$,
- omjer razvijene površine i površine diska vijka, $A_E/A_0 = 0,5320$,
- vijak je desnokretan.

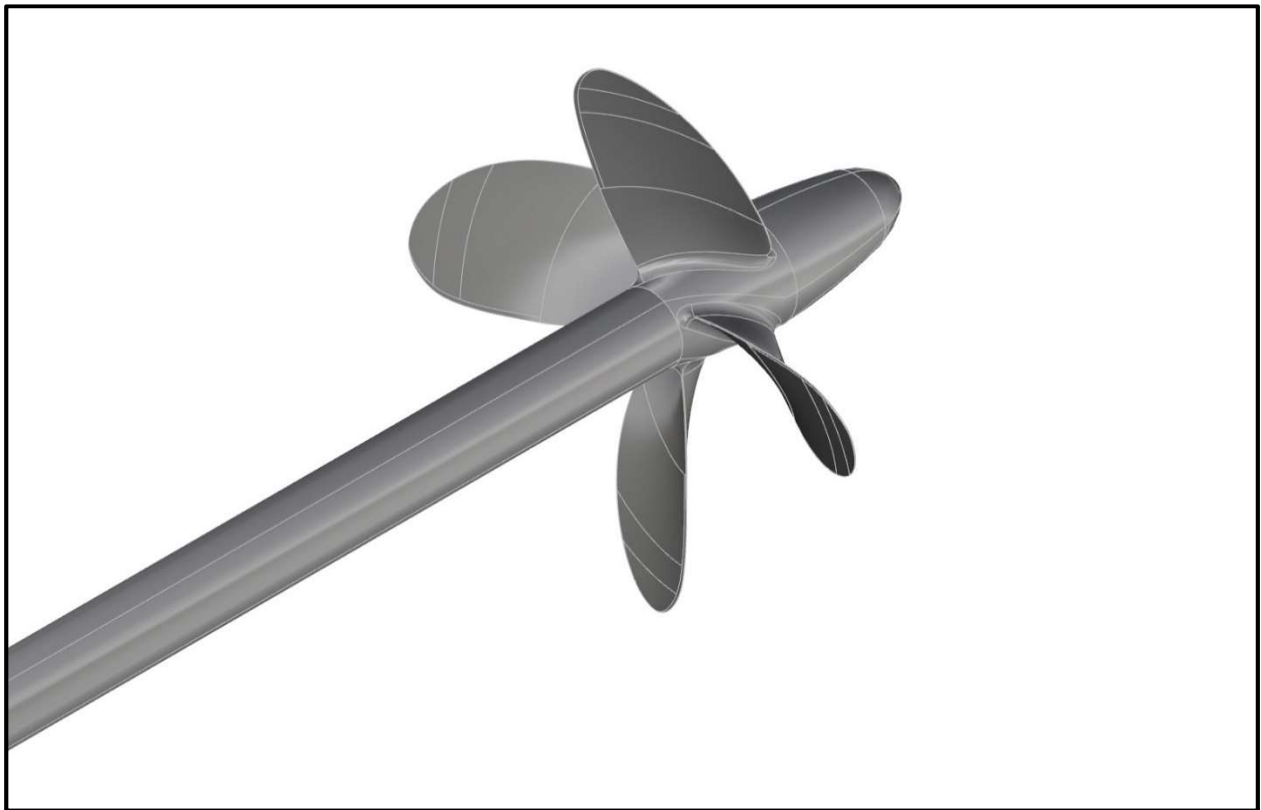
Vijak spomenutih karakteristika je modeliran u programskom paketu Rhinoceros 5 u mjerilu prototipa. Brodski vijak je modeliran pomoću nacrtu vijka sa zalihe (eng. *stock propeller*) koji je ustupljen od strane Brodarskog Instituta u Zagrebu [20]. Slika 2 prikazuje nacrt brodskog vijka prema kojem je izrađen 3D model brodskog vijka. Specifičnost ovog vijka su podrezani profili krila vijka od $0,5R$ do punog promjera vijka, na izlaznom rubu krila vijka. Svrha tog poboljšanja je smanjivanje pojave zujanje vijka pri radu u tekućini. Slika 3 prikazuje 3D model brodskog vijka potreban za izradu domene fluida u kojoj će se provoditi numeričke simulacije. Također je za potrebe provođenja pokusa slobodne vožnje brodskog vijka potrebno izraditi hidrodinamičku kapu kao i vratilo na kojem brodski vijak rotira. Slika 4 prikazuje 3D model vijka s vratilom i hidrodinamičkom kapom koji su potrebni za provođenje pokusa slobodne vožnje vijka.



Slika 2. Nacrt brodskog vijka

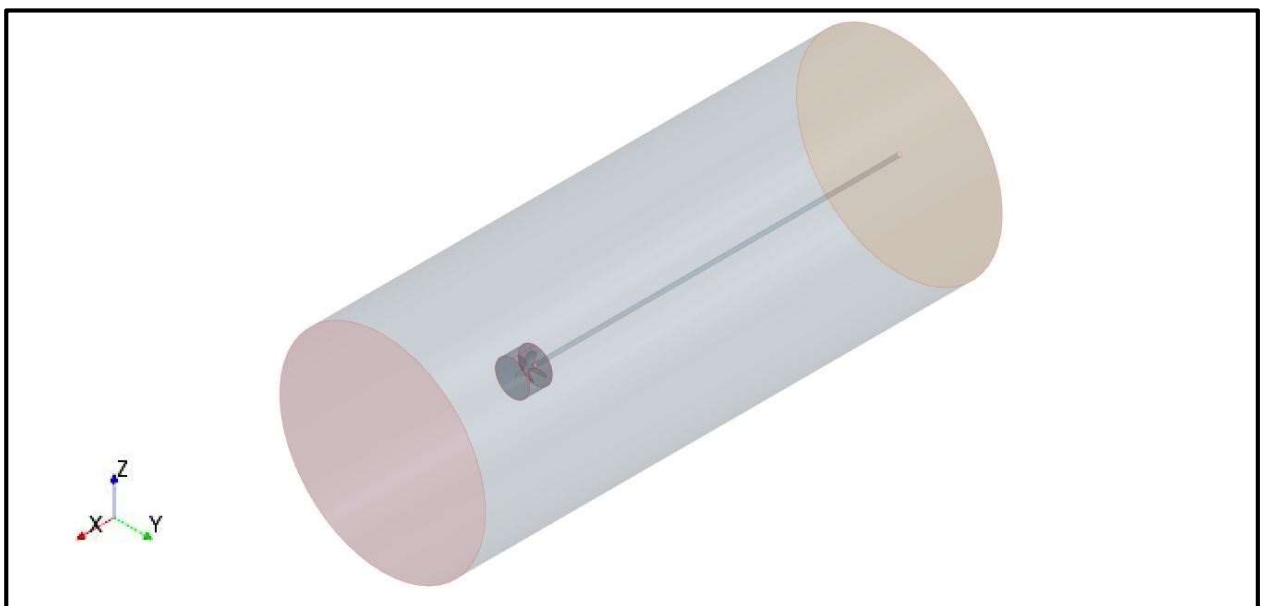


Slika 3. 3D model brodskog vijka u programskom paketu Rhinoceros



Slika 4. 3D model broskog vijka s vratilom i hidrodinamičkom kapom

Domena fluida oko broskog vijka je cilindričnog oblika, veličine prema preporukama iz [9]. Kako se u ovom radu analizirati i mogućnost upotrebe periodičnih granica domene za skraćivanje trajanja numeričkih simulacija bilo je potrebno izraditi i domenu oko jednog krila vijka u obliku isječka cilindra.



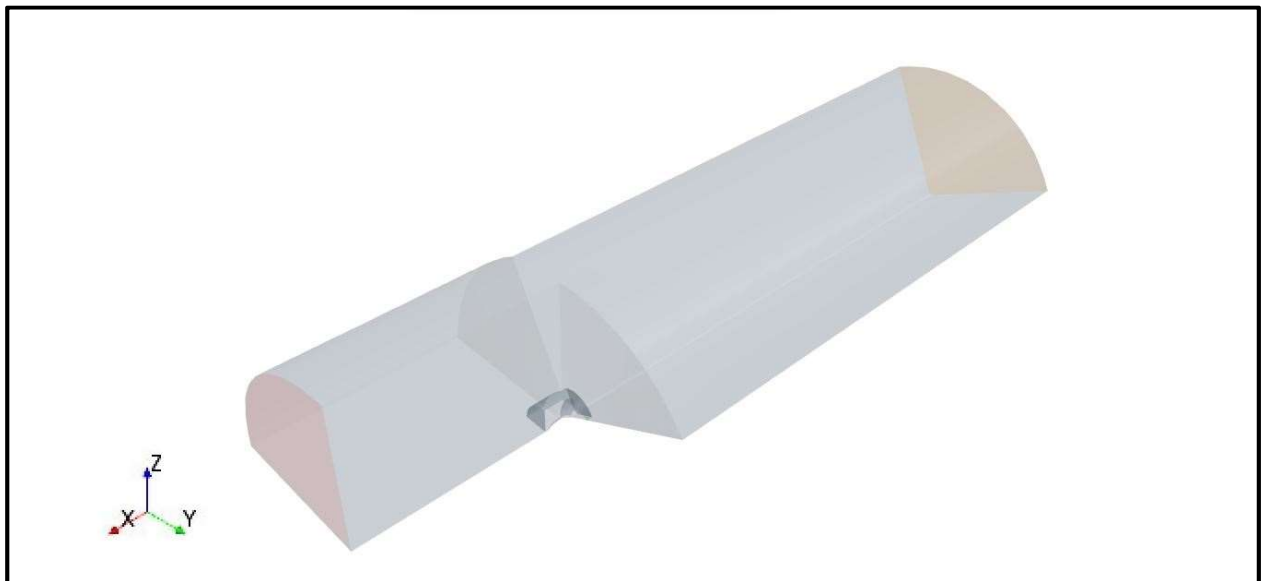
Slika 5. Proračunska domena za simulaciju pokusa slobodne vožnje vijka

Slika 5 prikazuje domenu za numeričku simulaciju slobodne vožnje broskog vijka. Preporučeni omjeri su:

- omjer promjera domene i promjera vijka, $D_D/D = 7$,
- omjer duljine domene ispred vijka i promjera vijka, $L_{ahead}/D = 5$,
- omjer duljine domene iza vijka i promjera vijka, $L_{behind}/D = 13$.

Također je potrebno unutar domene definirati cilindar unutar kojeg je brodski vijak i unutar tog cilindra se konačnim volumenima u momentne jednadžbe dodaju izvorski članovi kao što je opisano u poglavlju 2.8.

Kako bi se ispitala mogućnost korištenja periodičnih rubnih uvjeta potrebno je izraditi domenu fluida koja sadrži jednu četvrtinu broskog vijka s cijelim krilom vijka. Domena je tako podijeljena da se njenim polarnim ponavljanjem 4 puta dobije zatvorena cilindrična domena. Slika 6 prikazuje domenu za četvrtinu vijka za potrebe provođenja numeričke simulacije s periodičnim rubnim uvjetima. Ovaj pristup se koristi kako bi se smanjilo potrebno proračunsko vrijeme za ispitivanje gustoće mreže, tj. za ispitivanje utjecaja gustoće mreže na rezultate numeričke simulacije.

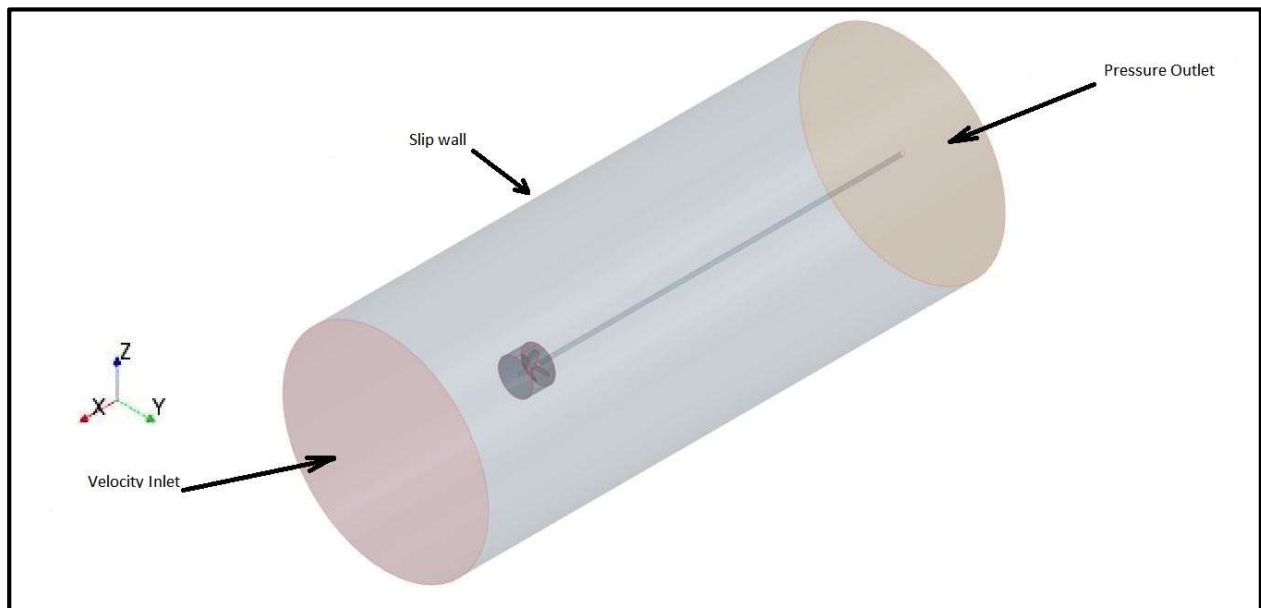


Slika 6. Proračunska domena s četvrtinom vijka

5.2. Rubni uvjeti pokusa slobodne vožnje broskog vijka

Rubne uvjete za numeričku simulaciju provođenja pokusa slobodne vožnje broskog vijka je potrebno definirati kako bi fizikalni problem bio određen. Rubne uvjete je potrebno definirati na rubovima domene kao i na samoj graničnoj površini između broskog vijka i fluida. Rubni uvjet na graničnoj površini između vijka i fluida je postojanje trenja, „no-slip wall“. Slika 7 prikazuje rubne uvjete na rubovima domene. Na ulazu tekućine u domenu je postavljen rubni uvjet „velocity

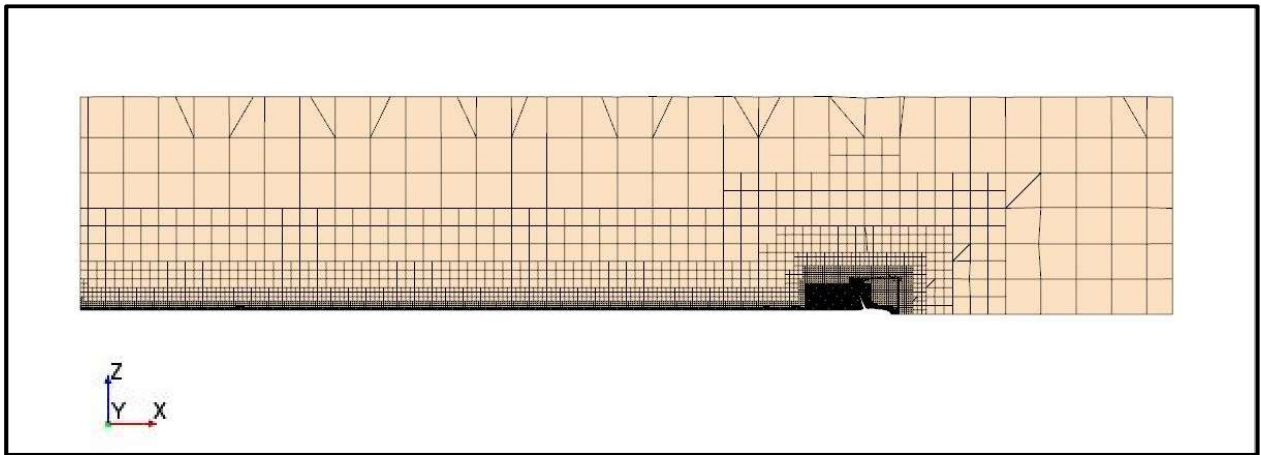
inlet“, na izlazu tekućine iz domene je postavljen rubni uvjet „pressure outlet“, a na plaštu cilindra je postavljen rubni uvjet „slip wall“. Navedeni rubni uvjeti se mogu narinuti pod uvjetom da su rubovi domene dovoljno daleko od vijka, što je postignuto usvajanjem preporuka iz [9].



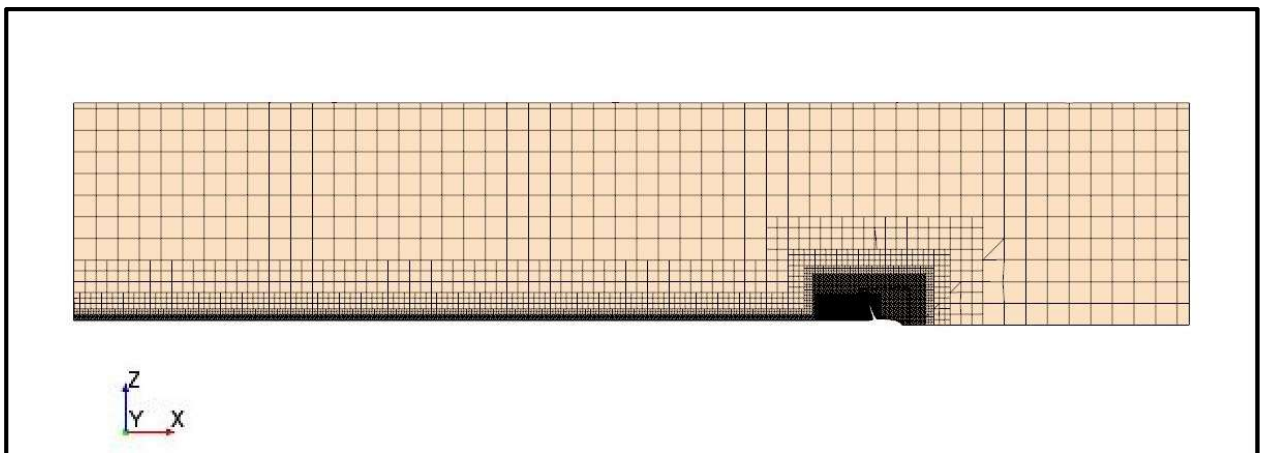
Slika 7. Rubni uvjeti na rubovima proračunske domene

5.3. Generiranje mreže kontrolnih volumena za pokus slobodne vožnje broskog vijka

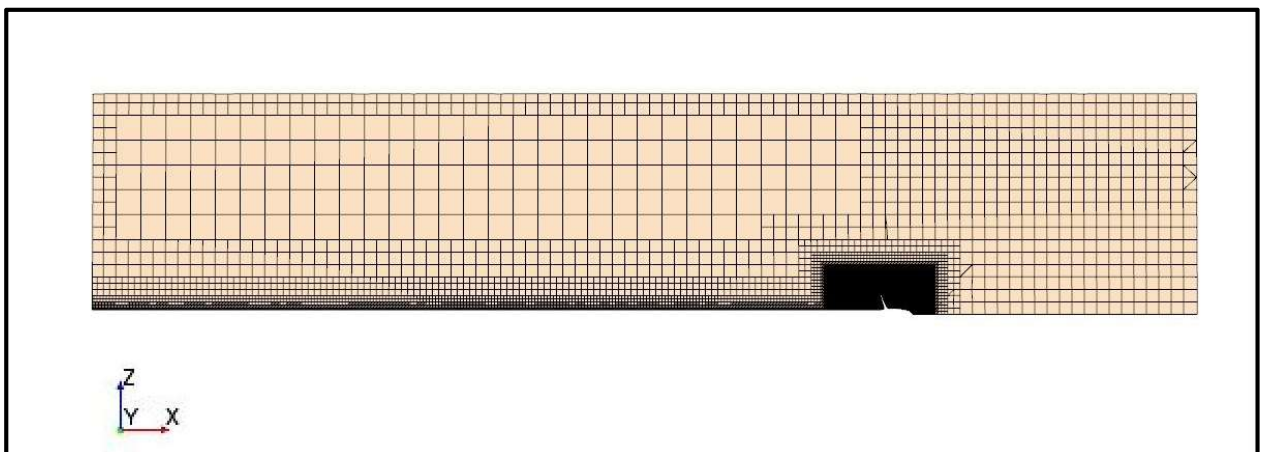
Kako bi se provela numerička simulacija potrebno je unutar proračunske domene generirati mrežu konačnih volumena sukladno poglavlju 2.7. Mreža konačnih volumena je generirana unutar programskog paketa Star CCM+ automatskim diskretizatorom domene (eng. *automatic mesher*), pri čemu su se definirala područja profinjenja mreže kao i temeljne veličine za diskretizaciju domene. Prilikom diskretizacije domene također se uz graničnu površinu vijka na strani fluida generirao prizmatični sloj konačnih volumena kako bi se bolje mogle opisati pojave u blizini vijka. Prizmatični sloj je također potreban kako bi se što bolje mogle koristiti funkcije zida koje opisuju profil brzine fluida u blizini stjenke. S ciljem analize utjecaja gustoće mreže generiralo se više mreža konačnih volumena različitih gustoća. Prema preporuci ITTC-a [15] napravljene su tri mreže različite gustoće s jednakim omjerom profinjenja u broju ćelija u domeni, koja je generirana za četvrtinu broskog vijka. Ovo je napravljeno u svrhu smanjenja broja konačnih volumena unutar domene, a time i vrijeme potrebno za provođenje numeričkih simulacija. Slika 8 prikazuje uzdužni presjek grube prostorne mreže s 1,25 milijuna *KV*. Ekvivalentna mreža konačnih volumena oko cijelog vijka sadržavala bi 5 milijuna *KV*. Slika 9 prikazuje uzdužni presjek srednje prostorne mreže konačnih volumena koja sadrži 2,5 milijuna *KV*. Slika 10 prikazuje uzdužni presjek fine mreže konačnih volumena koja sadrži 5 milijuna *KV*.



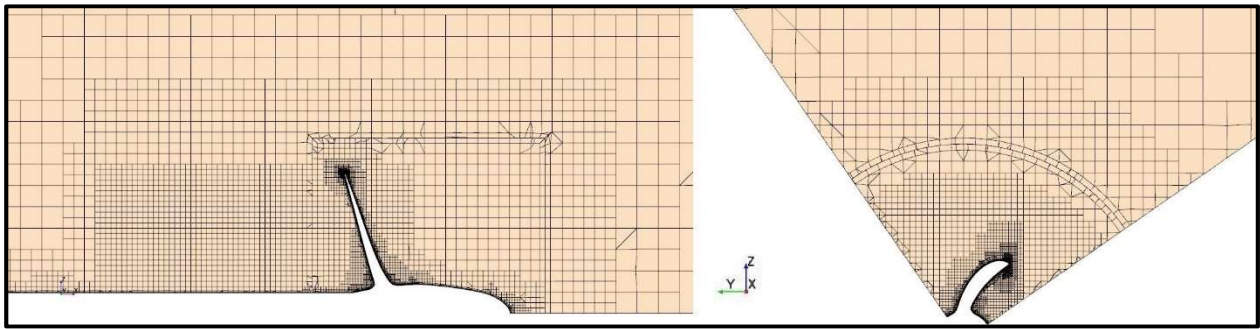
Slika 8. Mreža konačnih volumena koja sadrži 1,25 milijuna KV



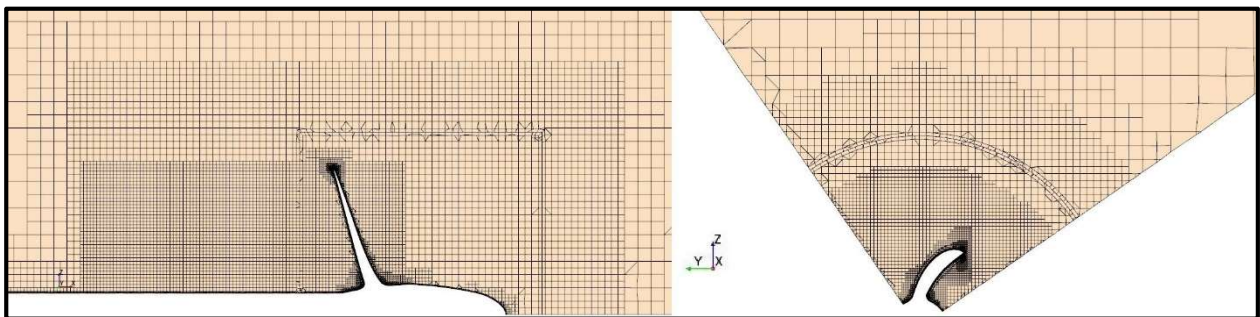
Slika 9. Mreža konačnih volumena koja sadrži 2,5 milijuna KV



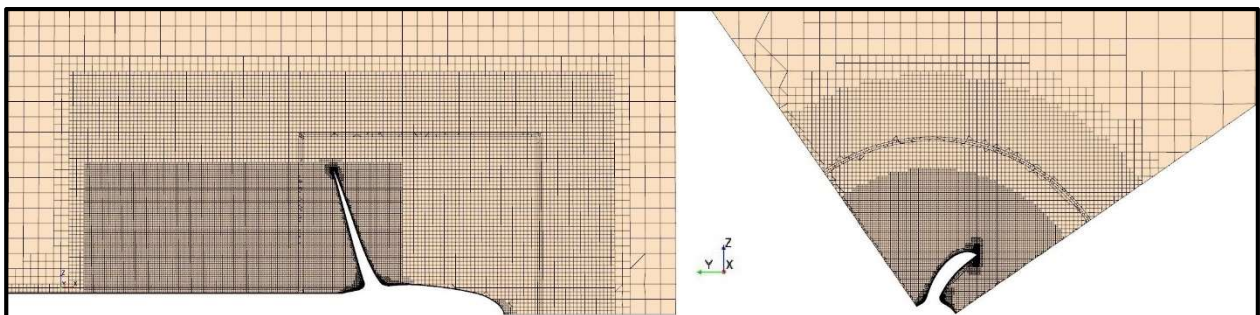
Slika 10. Mreža konačnih volumena koja sadrži 5 milijuna KV



Slika 11. Uzdužni i poprečni presjek mreže konačnih volumena u blizini broskog vijka (1,25 milijuna KV)



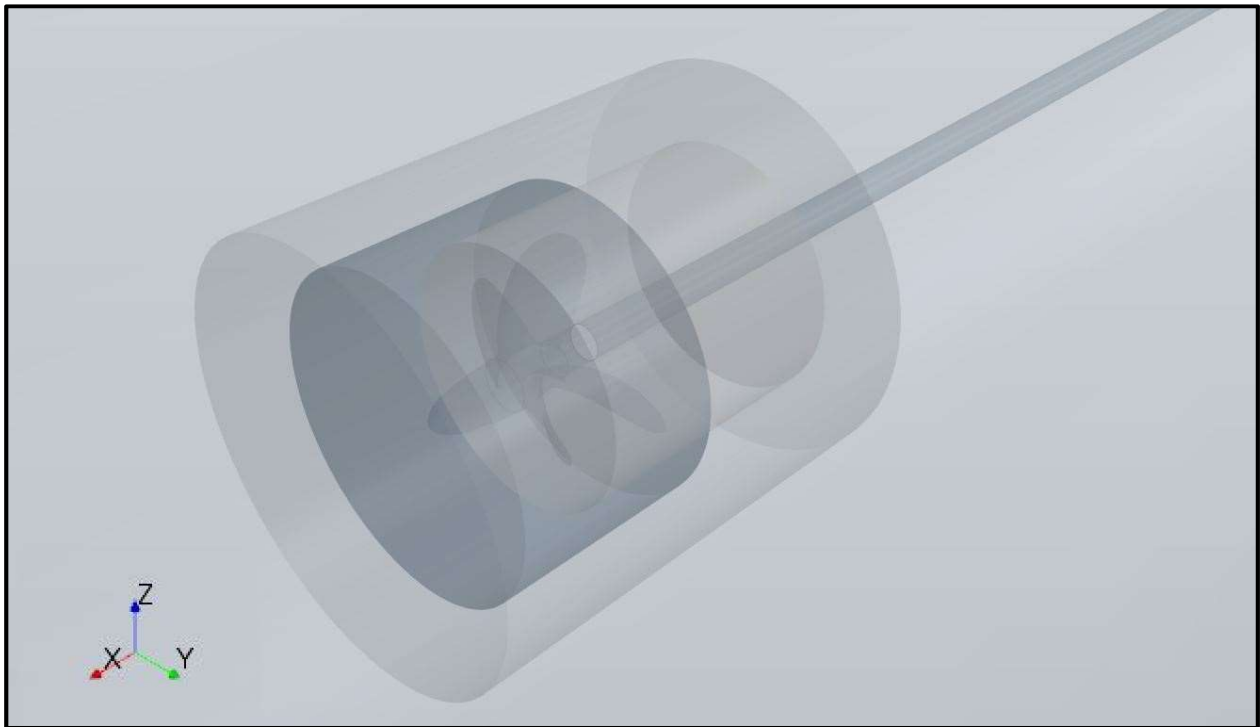
Slika 12. Uzdužni i poprečni presjek mreže konačnih volumena u blizini broskog vijka (2,5 milijuna KV)



Slika 13. Uzdužni i poprečni presjek mreže konačnih volumena u blizini broskog vijka (5 milijuna KV)

Na slikama 11-13 prikazane su različite gustoće mreže u blizini broskog vijka, tj. presjeci mreže konačnih volumena u ravnini paralelnoj s osi vijka i u ravnini okomitoj na os vijka.

Navedene razlike u gustoćama mreže konačnih volumena su u skladu s procedurom iz [15], pri čemu je $r = \sqrt[3]{2}$ tj. razlika u broju konačnih volumena između dvije mreže iznosi 2, te se sukladno proceduri iz [15] može odrediti tip konvergencije mreže i procijeniti greška numeričke simulacije. Kako bi se dobro opisalo strujanje tekućine oko vijka u blizini vijka je napravljeno profinjenje mreže konačnih volumena gdje se pretpostavljaju povećani gradijenti promjene fizikalnih veličina.



Slika 14. Volumeni za profinjenje mreže KV u blizini brodskog vijka

5.4. Kinematički rubni uvjeti numeričke simulacije slobodne vožnje brodskog vijka

Kinematički rubni uvjeti određuju brzinu tekućine na ulazu u domenu, kao i broj okretaja vijka tijekom simulacije. Veličina koja se varira je bezdimenzijski koeficijent napredovanja vijka definiran jednadžbom (3.3).

Pokus slobodne vožnje brodskog vijka se provodi pri konstantnom broju okretaja modela vijka. Broj okretaja se odredi tako da se postigne na nekom reprezentativnom presjeku krila vijka dovoljno veliki lokalni Reynoldsov broj. Kako je broj okretaja vijka konstantan jedini način za variranje koeficijenta napredovanja vijka je mijenjanje brzine napredovanja vijka kao što je opisano u poglavlju 3. Brzina vijka se prilikom modelskih ispitivanja varira od koeficijenta napredovanja $J = 0$ do brzine kada koeficijent poriva ne postane $K_T = 0$. Za pojedinu brzinu napredovanja vijka potrebno je provesti određen broj iteracija numeričkog proračuna dok se ne pronađe solenoidno polje brzina i tlakova takvo da zadovoljava jednadžbu kontinuiteta i da se integralne veličine koje se računaju na vijku, odnosno sila poriva i moment, više ne mijenjaju kroz iteracije proračuna. Određeno je da je dovoljan broj iteracija po pojedinoj brzini napredovanja vijka 2000, tj. nakon svakih 2000 iteracija koeficijent napredovanja se inkrementalno mijenja te se iterativno rješava polje brzina i tlakova za sljedeću radnu točku definiranu koeficijentom napredovanja. Brzina napredovanja brodskog vijka se računa prema formuli:

$$V_a = J \cdot n \cdot D. \quad (5.1)$$

Izračunata brzina napredovanja prema jednadžbi (5.1) se postavlja kao rubni uvjet na ulazu tekućine u domenu, a brzina napredovanja je paralelna s aksijalnom osi vijka. Izračunata brzina napredovanja se također postavlja kao početni uvjet u cijeloj domeni prilikom početka numeričke simulacije.

5.5. Geometrija trupa broda

Model trupa broda za rasuti teret je ispitan na Brodarskom institutu u Zagrebu [20]. Slika 15 prikazuje 3D model trupa broda s kormilom koji je korišten u numeričkim simulacijama pokusa vlastitog pogona. Karakteristike modela broda su sljedeće:

- duljina između okomica: $L_{PP} = 6,9444$ m,
- duljina na vodnoj liniji: $L_{WL} = 7,2494$ m,
- širina na vodnoj liniji: $B_{WL} = 1,1904$ m,
- širina na rebru najveće površine: $B_m = 1,1904$ m,
- površina glavnog rebra: $A_m = 0,4657$ m²,
- konstrukcijski gaz: $T = 0,3929$ m,
- volumen istisnine: $\nabla = 2,5443$ m³,
- uzdužni položaj težišta istisnine mjereno od glavnog rebra¹: $L_{CB} = 0,0545$ m,
- vertikalni položaj težišta istisnine mjereno od kobilice: $V_{CB} = 0,2059$ m.

Koeficijenti forme pri gazu od $T = 0,3929$ m su:

- Koeficijent vodne linije: $C_{AWL} = 0,8555$,
- Koeficijent glavnog rebra: $C_M = 0,9958$,
- Koeficijent punoće: $C_B = 0,7834$,
- uzdužni prizmatički koeficijent: $C_{P,L} = 0,7867$,
- vertikalni prizmatički koeficijent: $C_{P,V} = 0,8772$,
- omjer duljine i širine na vodnoj liniji: $L_{WL}/B_{WL} = 6,0899$,
- omjer širine na vodnoj liniji i gaza: $B_{WL}/T = 3,0301$.

¹ (+) prema pramcu, (-) prema krmi.

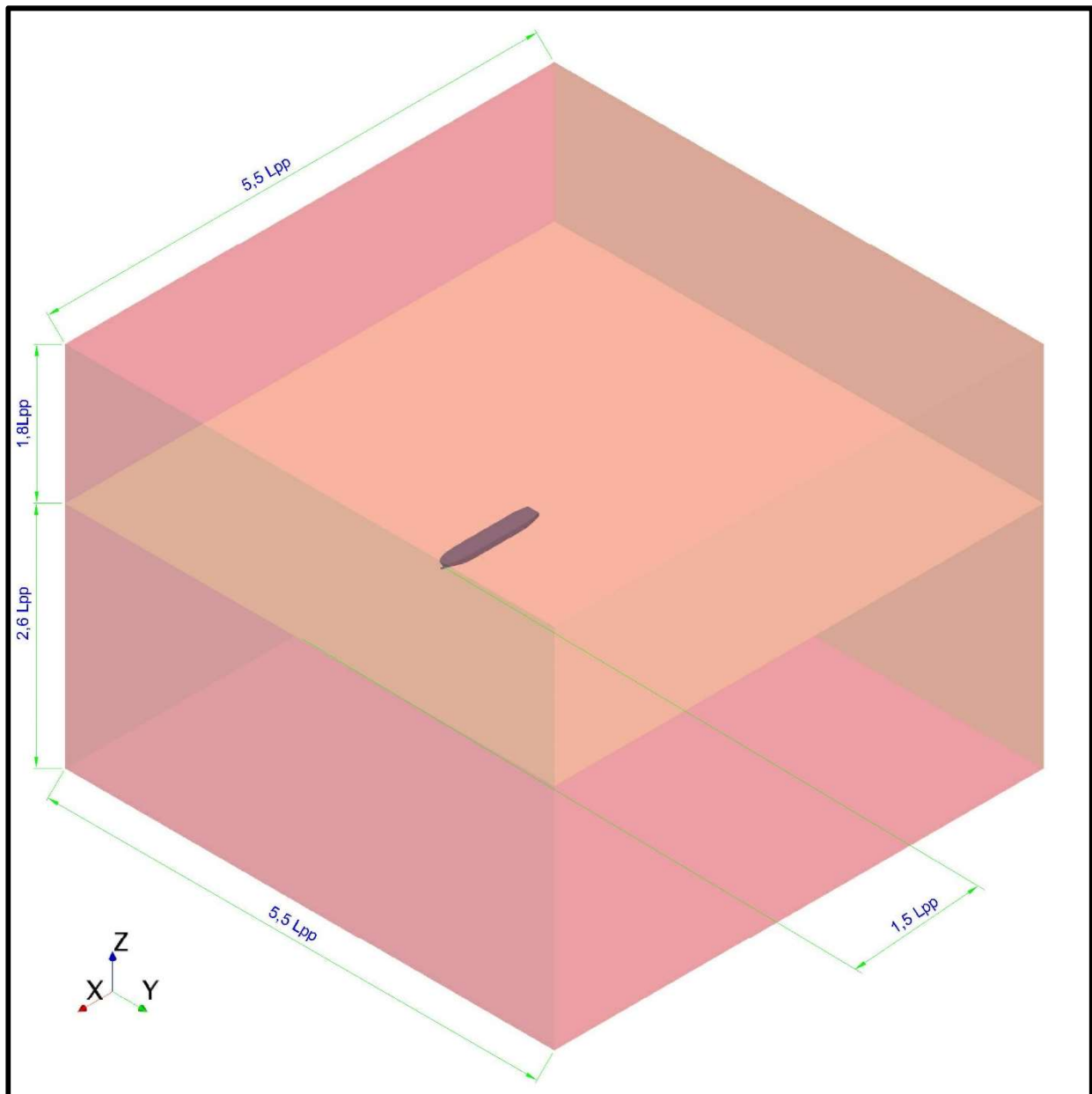


Slika 15. 3D model trupa broda s kormilom

Geometrijsko mjerilo prototipa broda je $\lambda = 25,20$, te su glavne izmjere broda sljedeće:

- duljina između okomica: $L_{PP} = 175$ m,
- duljina na vodnoj liniji: $L_{WL} = 182,69$ m,
- širina na vodnoj liniji: $B_{WL} = 30$ m,
- širina na rebru najveće površine: $B_m = 30$ m,
- površina glavnog rebra: $A_m = 295,72$ m²,
- konstrukcijski gaz: $T = 9,9$ m,
- volumen istisnine: $\nabla = 40716$ m³,
- uzdužni položaj težišta istisnine mjereno od glavnog rebra: $L_{CB} = 1,37$ m,
- vertikalni položaj težišta istisnine mjerno od kobilice: $V_{CB} = 5,19$ m.

Za prototip broda je generirana domena u kojoj će se provoditi numeričke simulacije. Veličina domene je odabrana prema preporuci iz [21]. Slika 16 prikazuje domenu za numeričku simulaciju pokusa vlastitog pogona generiranu u programskom paketu STAR-CCM+ kao i preporučene omjere dimenzija domene i duljine broda između okomica.



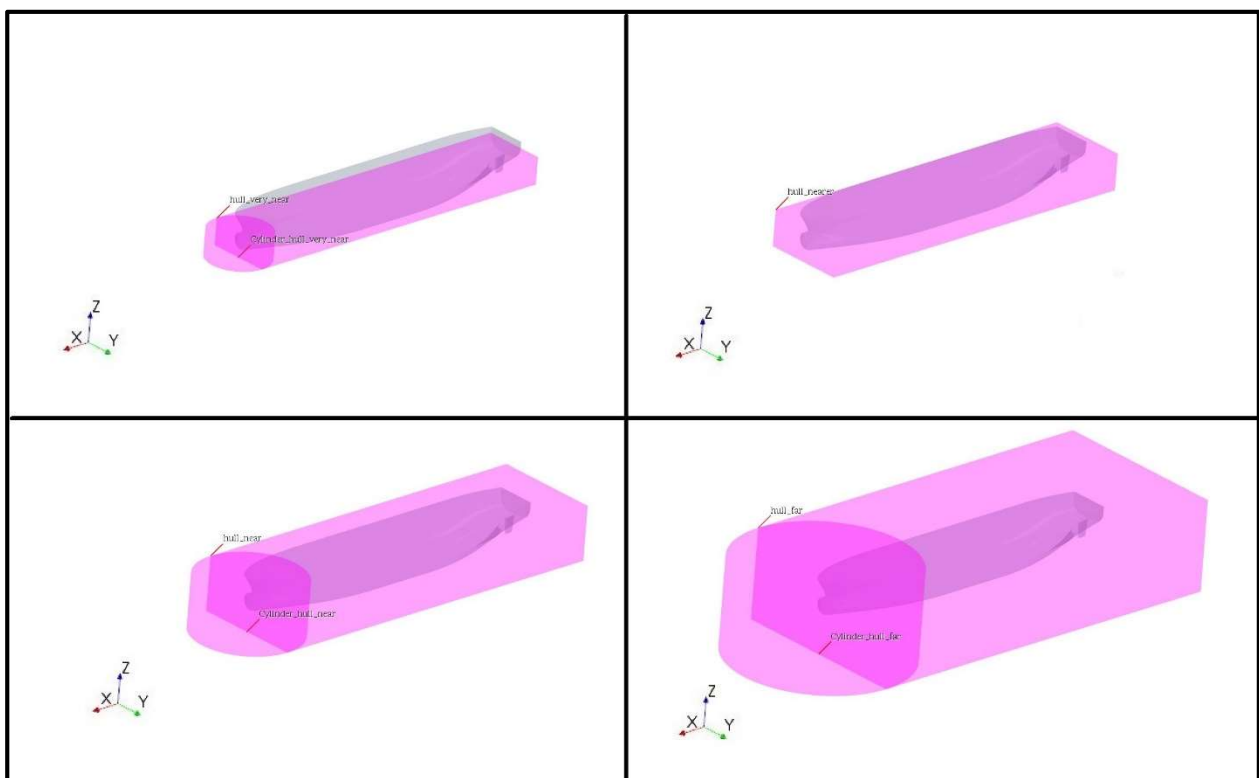
Slika 16. 3D prikaz domene za numeričku simulaciju pokusa vlastitog pogona

5.6. Generiranje mreže konačnih volumena za pokus vlastitog pogona

Kako bi se provela numerička simulacija pokusa vlastitog pogona potrebno je generirati mrežu konačnih volumena unutar proračunske domene. Mreža konačnih volumena je generirana s automatskim diskretizatorom domene unutar programskog paketa STAR-CCM+, te je korištena mreža unutar koje *KV* imaju oblik prizme. Automatski alati za diskretizaciju proračunske domene koji su korišteni u radu su sljedeći:

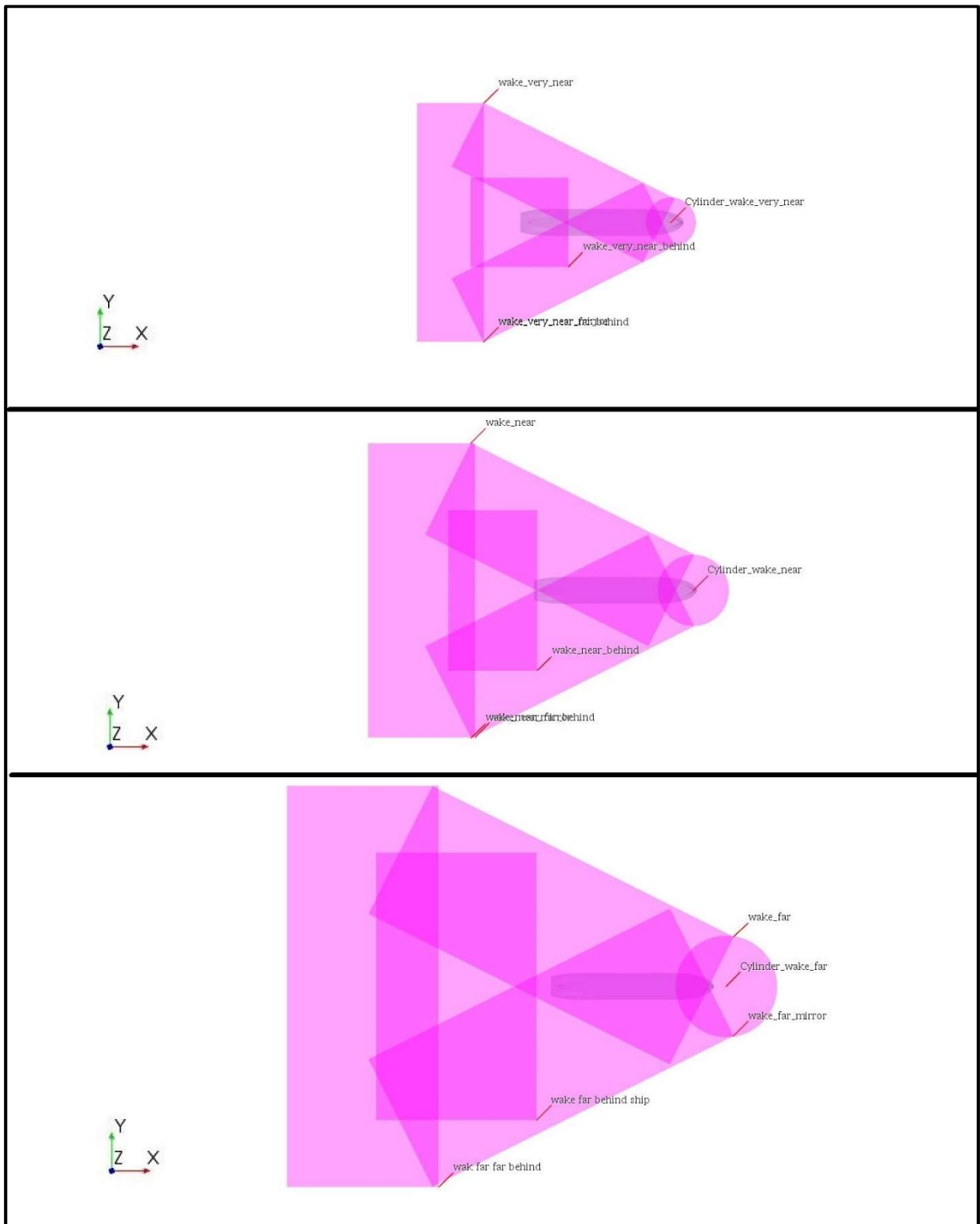
- Surface Remesher,
- Automatic Surface Repair,
- Trimmed Cell Mesher,
- Prism Layer Mesher.

Odabrana osnovna veličina mreže iznosi 2,52 m, a naspram osnovne veličine se određuju ostale veličine prilikom diskretizacije domene. Kako bi se kvalitetno opisao gradijent tlaka i brzine u blizini broskog trupa je korišteno profinjenje mreže konačnih volumena. Slika 17 prikazuje volumene oko trupa broda unutar kojih se profinjuje mreža konačnih volumena. Tako je u neposrednoj blizini broskog trupa veličina svih stranica KV jednaka 50 % osnovne veličine, u idućoj razini korišteno je različito profinjenje u horizontalnom smjeru (100% osnovne veličine) i vertikalnom smjeru (50 % osnovne veličine). Slijedeća razina profinjenja također ima različita profinjenja u horizontalnom smjeru (200% osnovne veličine) i vertikalnom smjeru (100% osnovne veličine), a posljednja razina profinjenja ima veličinu profinjenja u horizontalnom smjeru 400% osnovne veličine te u vertikalnom smjeru 200% osnovne veličine.



Slika 17. Volumeni unutar kojih je profinjena mreža KV

Slika 18 prikazuje volumene unutar kojih je profinjena mreža KV kako bi se mogla što bolje obuhvatiti Kelvinov kut. Unutar volumena koji su najbliži trupu broda je veličina stranica KV u horizontalnom smjeru 100% osnovne veličine, a u idućoj razini profinjenja veličina stranica KV u horizontalnom smjeru iznosi 200% osnovne veličine. Unutar zadnje razine profinjenja KV veličina stranica KV je 400% osnovne veličine.



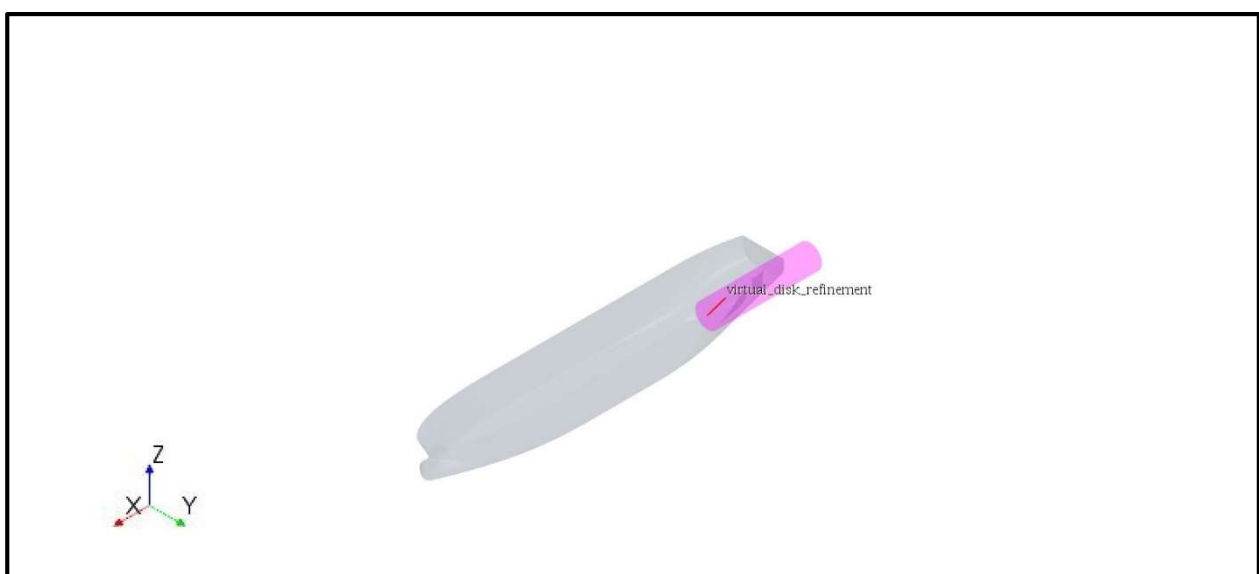
Slika 18. Volumeni za profinjenje mreže KV za obuhvaćanje Kelvinovog kuta

Slika 19 prikazuje volumene unutar kojih je profinjena mreža KV u blizini slobodne površine kako bi se što bolje opisale fizikalne pojave na granici dvaju fluida. Unutar volumena koji je najbliže slobodnoj površini, profinjena mreža KV ima veličinu stranice KV u vertikalnom smjeru 12,5 % osnovne veličine. U idućoj razini profinjenja mreže KV u vertikalnom smjeru ima veličinu stranice

KV jednaku 25% osnovne veličine, a u posljednjoj razini profinjenja u blizini slobodne površine veličina stranice KV u vertikalnom smjeru je 50% osnovne veličine.

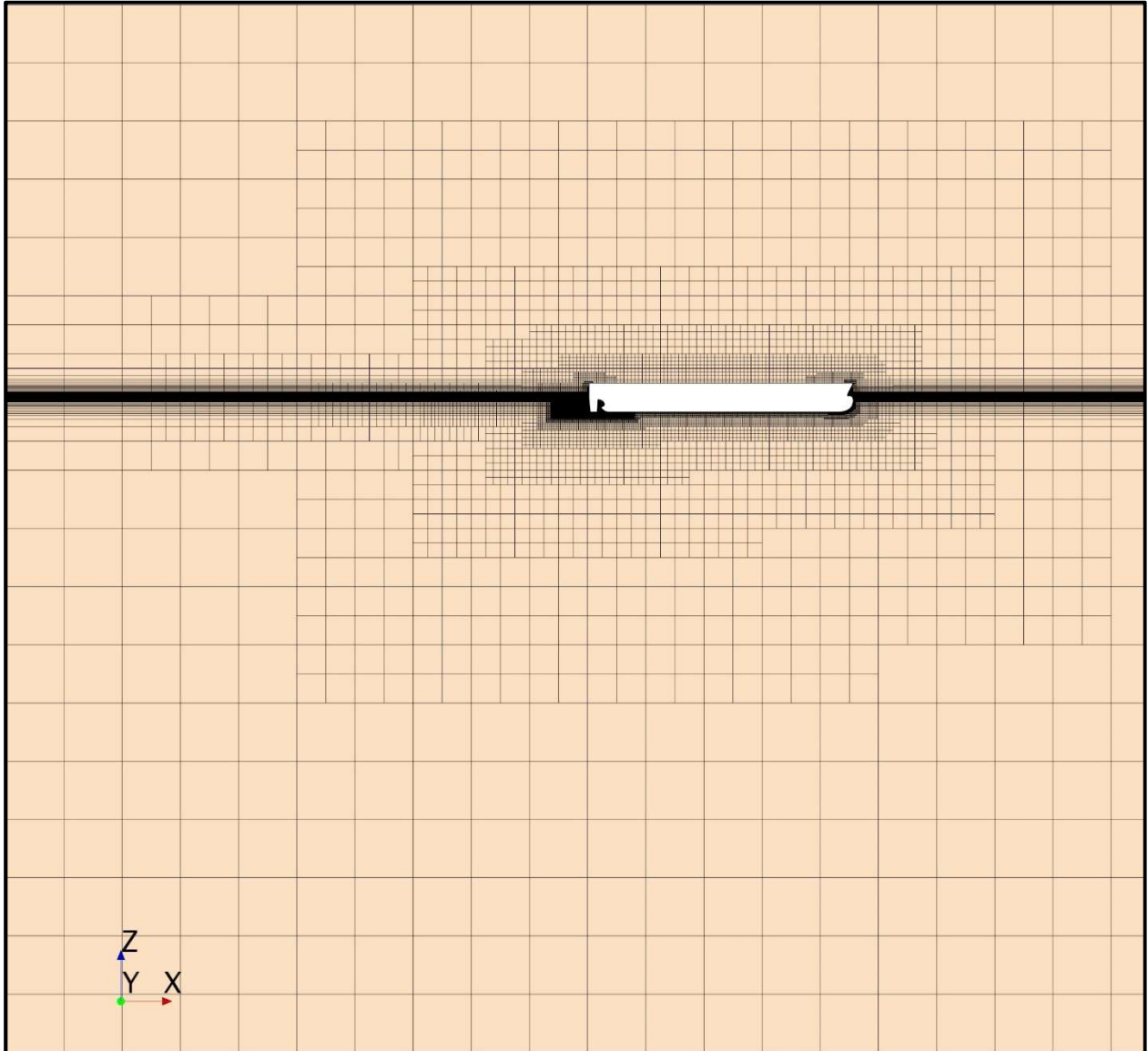


Slika 19. Volumeni za profinjenje mreže KV u blizini slobodne površine



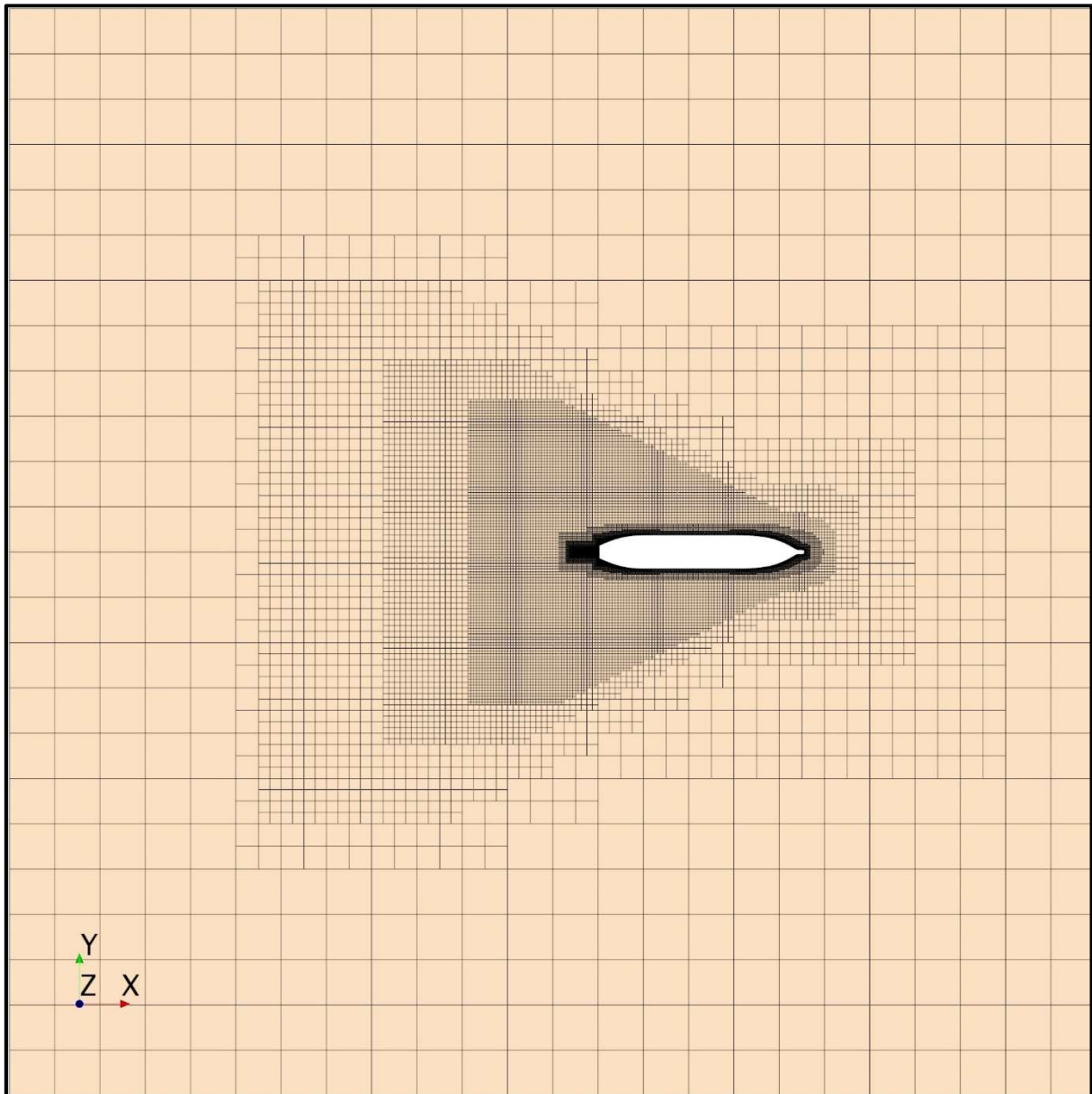
Slika 20. Cilindar za profinjenje mreže KV u blizini broskog vijka

Slika 20 prikazuje cilindar unutar kojeg je profinjena mreža KV zbog blizine broskog vijka kako bi se što bolje opisali gradijenti fizikalnih veličina u blizini vijka za potrebe metode virtualnog diska. Veličina stranica mreže KV unutar cilindra je 6,25% osnovne veličine. Metoda virtualnog diska zahtijeva ulazno polje brzina radi raspodjele poriva vijka po disku vijka.



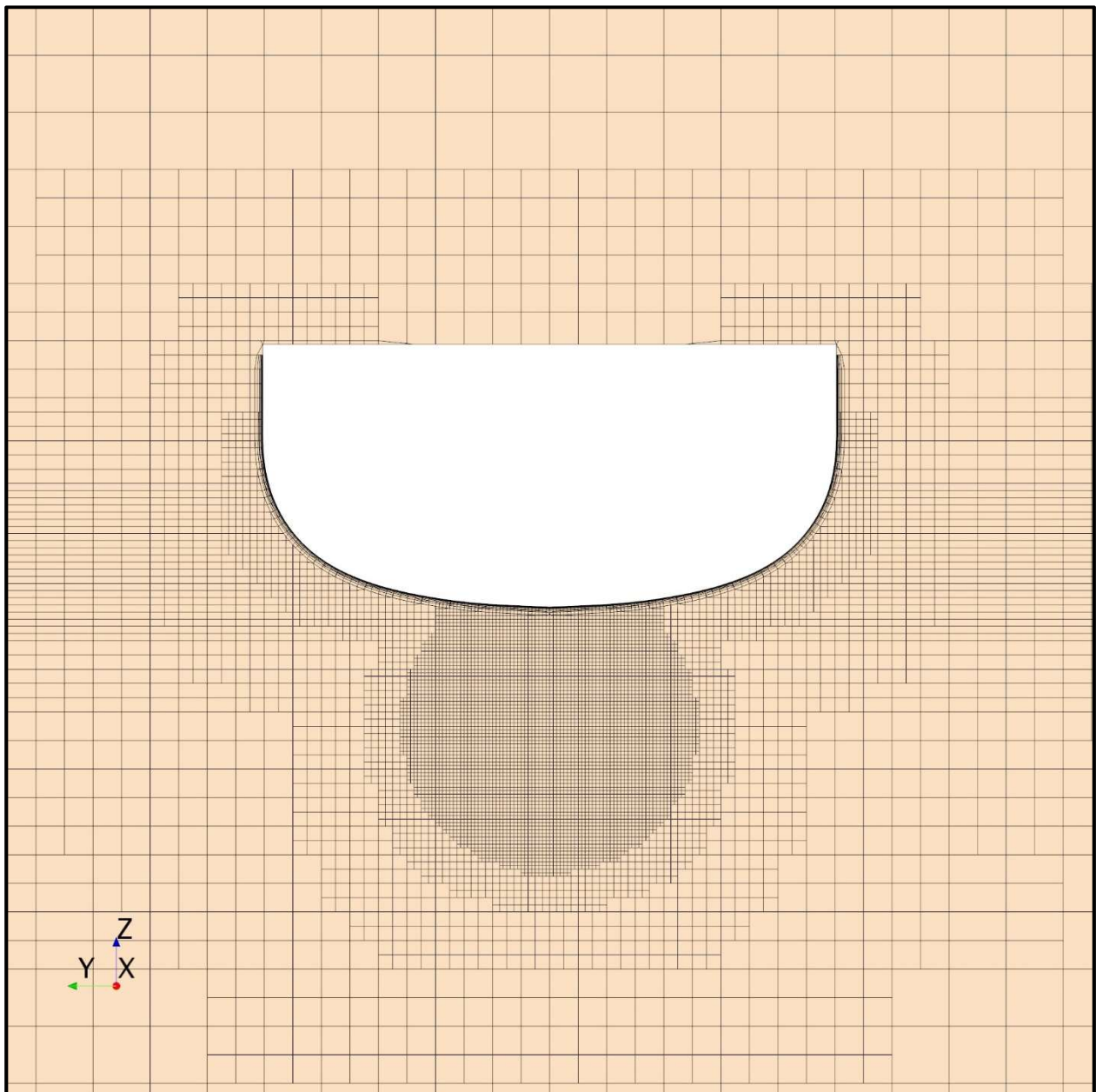
Slika 21. Presjek mreže KV u uzdužnoj vertikalnoj ravnini broda

Slika 21 prikazuje presjek mreže KV u uzdužnoj vertikalnoj ravnini broda te se na slici vidi profinjenje mreže KV u blizini slobodne površine. Slika 22 prikazuje presjek mreže KV u ravnini slobodne površine te se može uočiti da je mreža profinjena prema očekivanom reljefu slobodne površine.



Slika 22. Presjek mreže KV u ravnini slobodne površine

Za korištenje metode virtualnog diska potrebno je definirati ravninu ispred broskog vijka koja je reprezentativna za efektivno sustrujanje te je potrebno profiniti mrežu KV u blizini broskog vijka (Slika 23).

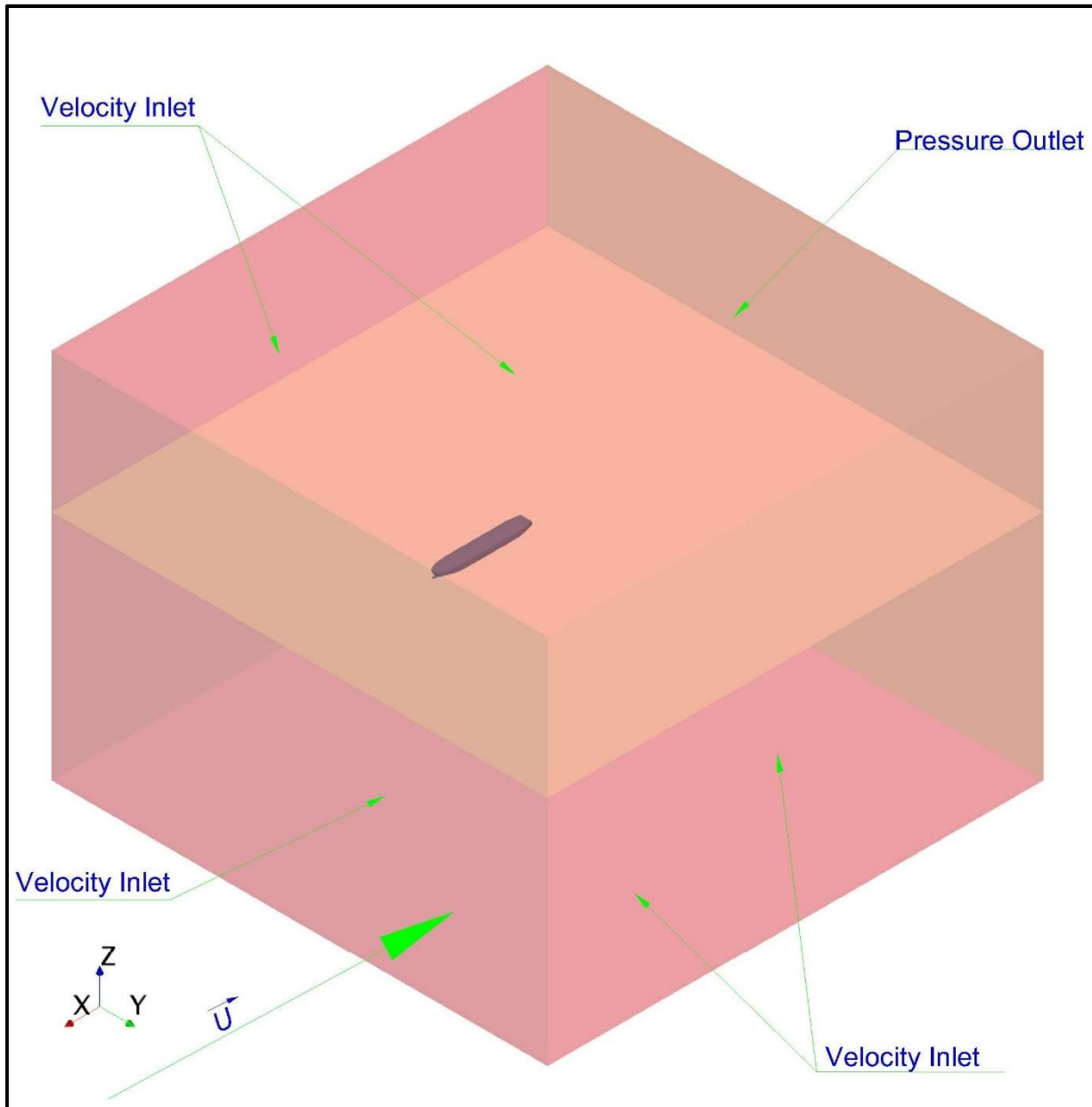


Slika 23. Presjek mreže KV u ravnini u kojoj se računa polje sustrujanja za korištenje metode virtualnog diska

5.7. Rubni uvjeti numeričke simulacije pokusa vlastitog pogona

Za provođenje numeričke simulacije pokusa vlastitog pogona potrebno je definirati rubne uvjete na rubovima domene kao i u početku numeričke simulacije. U numeričkim simulacijama vlastitog pogona domena fluida zajedno s brodom miruje a fluid struji kroz domenu brzinom jednakom brzini broda. Rubni uvjet na ulazu fluida u domenu je iznos brzine koji je jednak iznosu brzine prilikom pokusne plovidbe, a unutar programskog paketa STAR-CCM+ se postavlja kao „velocity inlet“. Na izlasku fluida iz domene postavljen je rubni uvjet „pressure outlet“. Na svim ostalim rubnim plohama domene postavljen je također rubni uvjet „velocity inlet“ prema [22]. Kako je brzina definirana kolinearno s uzdužnom osi broda a gornja, donja te bočne rubne plohe domene

su paralelne s uzdužnom osi broda, nema protoka fluida kroz te granice domene. Takav rubni uvjet oponaša beskonačan fluid u okruženju (Slika 24). U cilju izbjegavanja refleksije valova slobodne površine, valovi su prigušeni koristeći funkciju prigušenja implementiranu unutar programskog paketa STAR-CCM+ [9]. Za duljinu prigušenja odabrana je duljina broda između okomica, a funkcija prigušenja primijenjena je na svim granicama domene osim na gornjoj i donjoj granici.



Slika 24. Prikaz rubnih uvjeta za numeričku simulaciju pokusa vlastitog pogona

Kako bi se mogla koristiti „Body Force“ metoda opisanu u poglavlju 2.10 potrebno je prema preporuci iz [9] definirati ravninu okomitu na aksijalnu os broskog vijka i translateranu uzvodno za 10% promjera virtualnog diska. Također je potrebno definirati radijus diska u toj ravnini unutar kojeg će se osrednjavati fizikalne veličine za očitavanje podataka o porivu, momentu te koeficijentu napredovanja iz definiranog dijagrama pokusa slobodne vožnje vijka. Kako bi se

dobio reljef slobodne površine, a time i povećanje otpora broda uslijed valova potrebno je u VOF modelu definirati rubne uvjete tj. postaviti na ulazu fluida u domenu rubni uvjet „Flat VOF wave“ odnosno definirati da su brzine fluida veće gustoće (more) i fluida manje gustoće (zrak) na ulazu u domenu jednake kako se ne bi stvarali valovi prouzročeni „vjetrom“, već da brod plovi po idealno mirnoj slobodnoj površini.

6 REZULTATI NUMERIČKIH SIMULACIJA POKUSA SLOBODNE VOŽNJE BRODSKOG VIJKA

U ovom poglavlju je prikazana verifikacija gustoće mreže konačnih volumena i validacija rezultata numeričkih simulacija pokusa slobodne vožnje broskog vijka za mjerilo prototipa sa ekstrapoliranim rezultatima eksperimentalnih ispitivanja. Verifikacija i validacija su prikazane tablično i dijagramima.

6.1. Analiza konvergencije mreže

Studija konvergencije je provedena za tri različite gustoće mreže konstantnog omjera profinjenja, tj. omjer broja konačnih volumena unutar proračunske domene dviju uzastopnih mreža je 2. Studija je provedena s istim rubnim uvjetima i istim brojem iteracija za pojedini koeficijent napredovanja vijka, za domenu fluida koji sadrži četvrtinu broskog vijka. Korišteni su periodični rubni uvjeti. Kako bi se provjerila mogućnost korištenja četvrtine domene, tj. korištenja periodičnih rubnih uvjeta, provedene su dvije simulacije za svaki model turbulencije s najgrubljom mrežom za domenu s cijelim vijkom i domenu s četvrtinom vijka. Potom su uspoređene dobivene vrijednosti rezultata za koeficijent poriva K_T i koeficijent momenta K_Q . Tablica 3 prikazuje usporedbu rezultata numeričkih simulacija za domenu s cijelim i s četvrtinom vijka uz korištenje $k - \varepsilon$ realizible modela turbulencije. U tablici se mogu uočiti neznatne razlike u vrijednostima promatranih veličina koje su u većini područja raspona koeficijenta napredovanja ispod 1 %. Tablica 4 prikazuje usporedbu rezultata numeričkih simulacija za četvrtinu i cijeli brodski vijak uz korištenje $k - \omega$ SST modela turbulencije. U tablici se mogu uočiti također zanemarive razlike u promatranim veličinama koje su u većini područja koeficijenta napredovanja ispod 1% vrijednosti promatrane veličine. Kako su uočene devijacije između veličina koeficijenta poriva i koeficijenta momenta izračunatih korištenjem domene s četvrtinom vijka i domene s cijelim vijkom zanemarive, za analizu konvergencije mreže korištena je domena s četvrtinom broskog vijka i periodičnim rubnim uvjetima. Ovo je prvenstveno odabrano zbog ograničenih računalnih resursa i skraćanja vremena trajanja numeričkih simulacija za potrebe verifikacije gustoće mreže.

Tablica 3. Usporedba rezultata numeričkih simulacija s četvrtinom vijka i s cijelim vijkom za $k - \varepsilon$ realizable model turbulencije

J	Domena s cijelim vijkom		Domena s 1/4 vijka		Relativna devijacija	
	K_T vijak	$10K_Q$ vijak	K_T 1/4 vijka	$10K_Q$ 1/4 vijka	RD $_{KT}$, %	RD $_{KQ}$, %
0,08	0,3413	0,3914	0,3402	0,3898	-0,35	-0,41
0,16	0,3181	0,3719	0,3170	0,3703	-0,35	-0,41
0,24	0,2920	0,3495	0,2911	0,3482	-0,30	-0,36
0,32	0,2641	0,3251	0,2632	0,3238	-0,34	-0,41
0,40	0,2343	0,2981	0,2337	0,2971	-0,27	-0,33
0,48	0,2038	0,2700	0,2033	0,2692	-0,26	-0,31
0,56	0,1726	0,2399	0,1721	0,2392	-0,29	-0,32
0,64	0,1401	0,2060	0,1396	0,2052	-0,36	-0,38
0,72	0,1061	0,1675	0,1056	0,1668	-0,44	-0,45
0,80	0,0700	0,1240	0,0696	0,1233	-0,56	-0,57
0,88	0,0305	0,0746	0,0302	0,0739	-1,26	-0,93

Tablica 4. Usporedba rezultata numeričkih simulacija s četvrtinom vijka i s cijelim vijkom za $k - \omega$ SST model turbulencije

J	Domena s cijelim vijkom		Domena s 1/4 vijka		Relativna devijacija	
	K_T cijeli vijak	$10K_Q$ cijeli vijak	K_T 1/4 vijka	$10K_Q$ 1/4 vijka	RD $_{KT}$, %	RD $_{KQ}$, %
0,08	0,3411	0,3905	0,3398	0,3888	-0,37	-0,45
0,16	0,3182	0,3713	0,3170	0,3697	-0,36	-0,43
0,24	0,2923	0,3493	0,2914	0,3481	-0,30	-0,35
0,32	0,2643	0,3250	0,2635	0,3239	-0,31	-0,34
0,40	0,2347	0,2983	0,2340	0,2972	-0,33	-0,39
0,48	0,2038	0,2693	0,2032	0,2684	-0,29	-0,33
0,56	0,1725	0,2391	0,1720	0,2383	-0,32	-0,36
0,64	0,1401	0,2053	0,1395	0,2044	-0,40	-0,42
0,72	0,1060	0,1668	0,1055	0,1660	-0,48	-0,49
0,80	0,0699	0,1233	0,0695	0,1226	-0,62	-0,59
0,88	0,0302	0,0736	0,0298	0,0729	-1,40	-1,00

Nakon provedenih numeričkih simulacija za domenu s četvrtinom vijka i s različitim gustoćama mreže konačnih volumena, prema postupku opisanom u poglavlju 3.5 određen je tip konvergencije za pojedini koeficijent napredovanja. Studija konvergencije mreže provedena je za dva različita modela turbulencije. Za koeficijente napredovanja u području interesa se prema jednadžbama (3.15), (3.16) i (3.17) odredio tip konvergencije za veličine K_T i K_Q . Nadalje se prema odgovarajućim jednadžbama (3.18-3.22), ovisno o tipu konvergencije, izračunala nesigurnost rješenja promatrane fizikalne veličine pri čemu je odabran faktor sigurnosti $F_S = 2$. Tablica 5

prikazuje procjenu nesigurnosti rezultata koeficijenta poriva za područje koeficijenta napredovanja od interesa za $k - \varepsilon$ *realizable* model turbulencije. Može se uočiti da je procijenjena relativna nesigurnost rezultata vrlo mala tj. ispod 1 % vrijednosti koeficijenta poriva izračunatog numeričkom simulacijom korištenjem najfinije mreže konačnih volumena. Tablica 6 prikazuje procjenu nesigurnosti rezultata za koeficijent momenta u rasponu vrijednosti koeficijenta napredovanja od interesa za $k - \varepsilon$ *realizable* model turbulencije. Moguće je uočiti da je vrijednost relativne nesigurnosti rezultata ispod 1 % rješenja koeficijenta momenta izračunatog korištenjem fine mreže konačnih volumena.

Tablica 7 prikazuje procjenu nesigurnosti rezultata koeficijenta poriva izračunatog s $k - \omega$ *SST* modelom turbulencije za koeficijente napredovanja u području od interesa. Procijenjena relativna nesigurnost rezultata je zanemariva tj. ispod 1 % vrijednosti koeficijenta poriva izračunatog numeričkom simulacijom korištenjem najfinije mreže konačnih volumena. Tablica 8 prikazuje procjenu nesigurnosti rezultata za koeficijent momenta u rasponu vrijednosti koeficijenta napredovanja od interesa za $k - \omega$ *SST* model turbulencije. Moguće je uočiti da su vrijednosti relativne nesigurnosti rezultata ispod 1 % koeficijenta momenta izračunatog korištenjem fine mreže konačnih volumena.

Tablica 5. Procjena nesigurnosti rezultata za K_T izračunatih korištenjem $k - \varepsilon$ *realizable* modela turbulencije

Procjena nesigurnosti rezultata za K_T ($k-\varepsilon$ <i>realizable</i>)						
J	$\varepsilon_{i,21}$	$\varepsilon_{i,32}$	R_i	tip kon.	U_i	\bar{U} , %
0,48	-0,001049	0,000509	-2,062	o.d ² .	0,002099	1,03
0,56	-0,000719	0,000452	-1,592	o.d.	0,001438	0,83
0,64	-0,000529	0,000362	-1,462	o.d.	0,001057	0,76
0,72	-0,000431	0,000250	-1,725	o.d.	0,000863	0,82

Tablica 6. Procjena nesigurnosti rezultata za K_Q izračunatih korištenjem $k - \varepsilon$ *realizable* modela turbulencije

Procjena nesigurnosti rezultata za K_Q ($k-\varepsilon$ <i>realizable</i>)						
J	$\varepsilon_{i,21}$	$\varepsilon_{i,32}$	R_i	tip kon.	U_i	\bar{U} , %
0,48	-0,000828	0,001859	-0,445	o.k.	0,001859	0,69
0,56	-0,000659	0,001291	-0,510	o.k.	0,001291	0,54
0,64	-0,000486	0,001070	-0,454	o.k.	0,001070	0,52
0,72	-0,000270	0,001105	-0,244	o.k.	0,001105	0,67

² o.d.-oscilatorna divergencija, o.k.-oscilatorna konvergencija

Tablica 7. Procjena nesigurnosti rezultata za K_T izračunatih korištenjem $k - \omega$ SST modela turbulencije

Procjena nesigurnosti rezultata za K_T ($k-\omega$ SST)						
J	$\varepsilon_{i,21}$	$\varepsilon_{i,32}$	R_i	tip kon.	U_i	$\bar{U}_i, \%$
0,48	-0,000919	0,000740	-1,242	o.d.	0,00184	0,90
0,56	-0,000571	0,000573	-0,997	o.k.	0,00057	0,33
0,64	-0,000505	0,000497	-1,016	o.d.	0,00101	0,72
0,72	-0,000383	0,000382	-1,000	o.d.	0,00077	0,73

Tablica 8. Procjena nesigurnosti rezultata za K_Q izračunatih korištenjem $k - \omega$ SST modela turbulencije

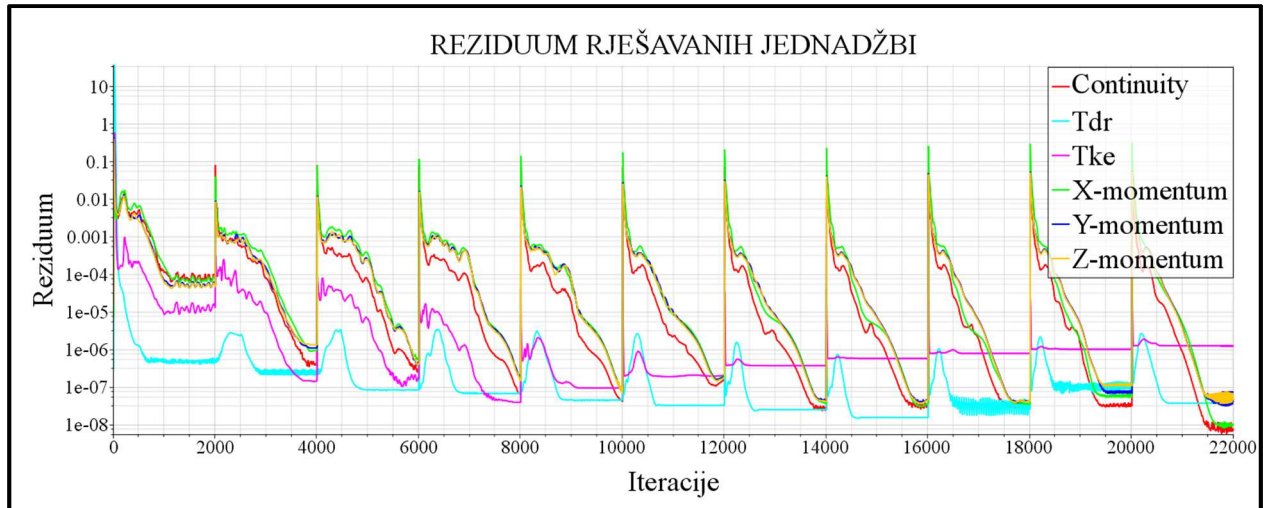
Procjena nesigurnosti rezultata za K_Q ($k-\omega$ SST)						
J	$\varepsilon_{i,21}$	$\varepsilon_{i,32}$	R_i	tip kon.	U_i	$\bar{U}_i, \%$
0,48	-0,000652	0,002301	-0,283	o.k.	0,002301	0,86
0,56	-0,000464	0,001497	-0,310	o.k.	0,001497	0,63
0,64	-0,000473	0,001291	-0,366	o.k.	0,001291	0,63
0,72	-0,000225	0,001333	-0,169	o.k.	0,001333	0,81

Iz prikazanih procjena nesigurnosti rezultata za koeficijent poriva i koeficijent momenta vidljivo je da su rješenja dobivena numeričkim simulacijama dovoljno točna i s najgrubljom mrežom KV. Iz tog razloga moguće je koristiti mreže konačnih volumena gustoće ekvivalentne gustoći grube mreže. Takvim odabirom mreže konačnih volumena može se i s ograničenim računalnim resursima te u prihvatljivom vremenskom periodu dobiti rezultat pokusa slobodne vožnje broskog vijka.

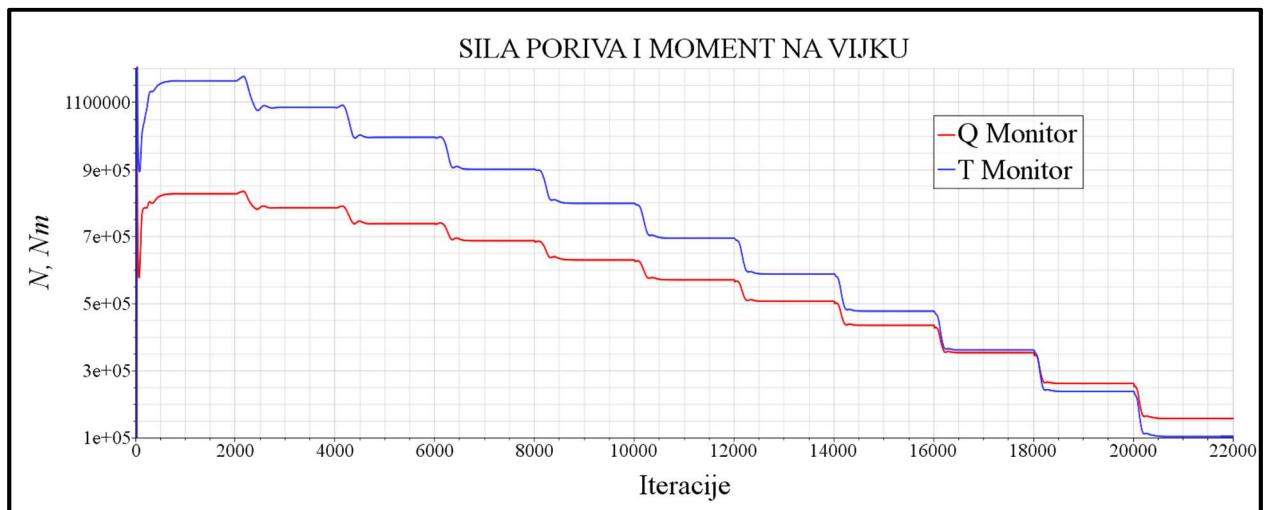
6.2. Konvergencija fizikalnih veličina

Stacionarno strujanje je obilježeno stacionarnim fizikalnim veličinama, tj. slika strujanja je tijekom vremena ista. Pokus slobodne vožnje broskog vijka može se promatrati kao stacionaran za pojedini koeficijent napredovanja broskog vijka. Iako je turbulentno strujanje nestacionarno, njegovim osrednjavanjem korištenjem modela turbulencije i turbulentno strujanje se može predstaviti kao stacionarno. Valjana provjera stacionarnosti je praćenje konvergencije integralnih veličina kao što su sile i momenti. Kada se sile i momenti prestanu mijenjati kroz iteracije postignuto je solenoidno polje brzina i tlakova koje zadovoljava osnovne fizikalne zakone strujanja tekućine. Slika 25 prikazuje konvergenciju reziduuma jednadžbi količine gibanja, jednadžbe kontinuiteta i jednadžbi koje opisuju distribuciju kinetičke energije turbulencije i brzinu disipacije

kinetičke energije turbulencije unutar domene. Može se zaključiti da je za pojedini koeficijent napredovanja broskog vijka dovoljan broj iteracija 2000. Slika 26 prikazuje konvergenciju sile poriva i momenta na vijku kroz iteracije. Moguće je vidjeti kako se svakih 2000 iteracija mijenja koeficijent napredovanja vijka. Također je vidljivo da se integralne veličine sile poriva i momenta na vijku nakon određenog broja iteracija ne mijenjaju. Stoga se može zaključiti da se za problem slobodne vožnje broskog vijka mogu koristiti RANS jednadžbe za stacionarno strujanje.



Slika 25. Reziduumi jednadžbi



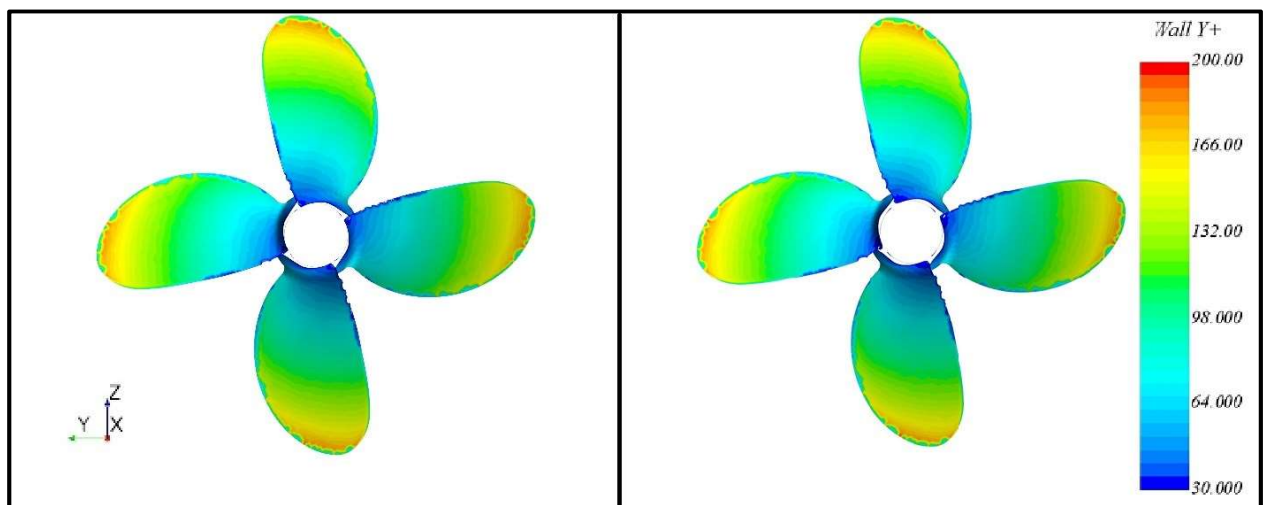
Slika 26. Konvergencija sile poriva i momenta na vijku kroz iteracije

6.3. Rezultati numeričke simulacije pokusa slobodne vožnje broskog vijka

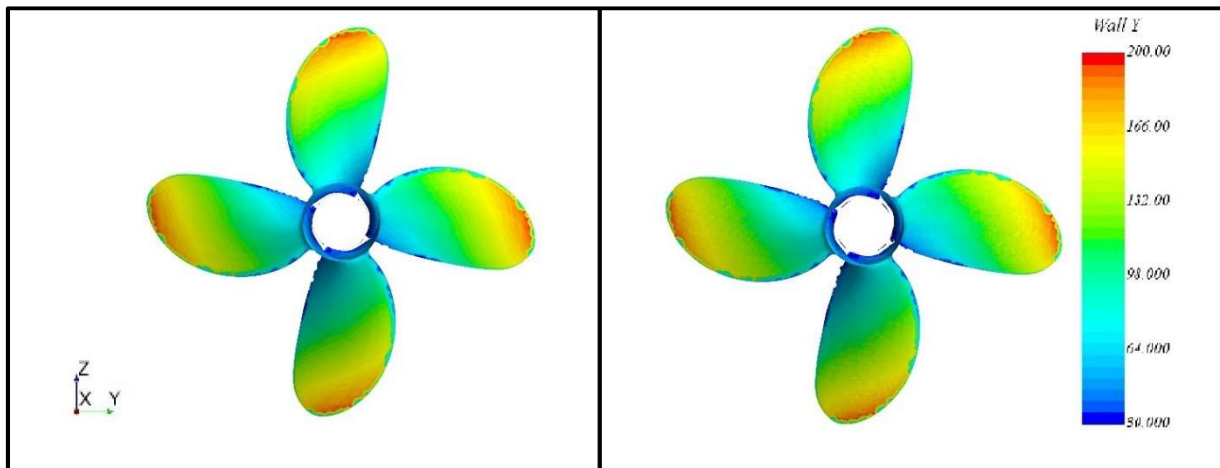
U ovom poglavlju detaljno su analizirani rezultati numeričke simulacije pokusa slobodne vožnje za koeficijent napredovanja $J = 0,64$ broskog vijka u mjerilu prototipa. Numerička simulacija viskoznog strujanja pruža uvid u polje strujanja oko broskog vijka, što može biti od koristi projektantu broskog vijka. Također su prikazane razdiobe fizikalnih veličina na broskom vijku

i u blizini brodskog vijka dobivene numeričkim simulacijama s $k - \varepsilon$ realizible i $k - \omega$ SST modelom turbulencije.

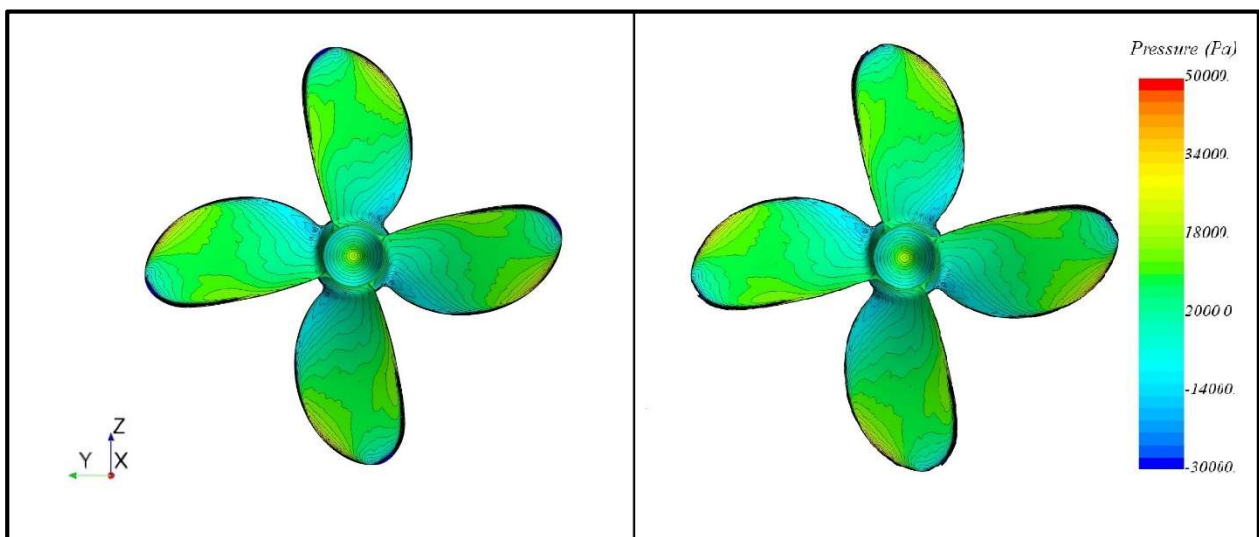
Slika 27 prikazuje vrijednosti bezdimenzijske udaljenosti težišta kontrolnih volumena najbližih stijenci od stijenke (y^+). Vrijednost bezdimenzijske udaljenosti je na većini tlačne strane brodskog vijka veća od 30 te je stoga moguće koristiti funkcije zida s dovoljnom pouzdanošću. Slika 28 također prikazuje vrijednost bezdimenzijske udaljenosti težišta konačnih volumena najbližih stijenci na podtlačnoj strani vijka, gdje je vrijednost bezdimenzijske udaljenosti također veća od 30. Slika 29 prikazuje razdiobu tlaka na tlačnoj strani brodskog vijka pri referentnom tlaku $p_{ref} = 0 Pa$. Slika 30 prikazuje razdiobu tlaka na podtlačnoj strani (naličju) brodskog vijka pri referentnom tlaku $p_{ref} = 0 Pa$. Usporedbom raspodjele tlaka na tlačnoj i podtlačnoj strani vijka, može se zaključiti da je veći pad tlaka na podtlačnoj strani vijka nego prirast tlaka na tlačnoj strani vijka. To znači da se veći dio poriva ostvaruje padom tlaka na podtlačnoj strani vijka. Slika 31 prikazuje razdiobu kinetičke energije turbulencije na presjeku $0,7R$ krila vijka. Moguće je uočiti da je iznos kinetičke energije turbulencije u slobodnoj struji fluida veći kod $k - \omega$ SST modela turbulencije.



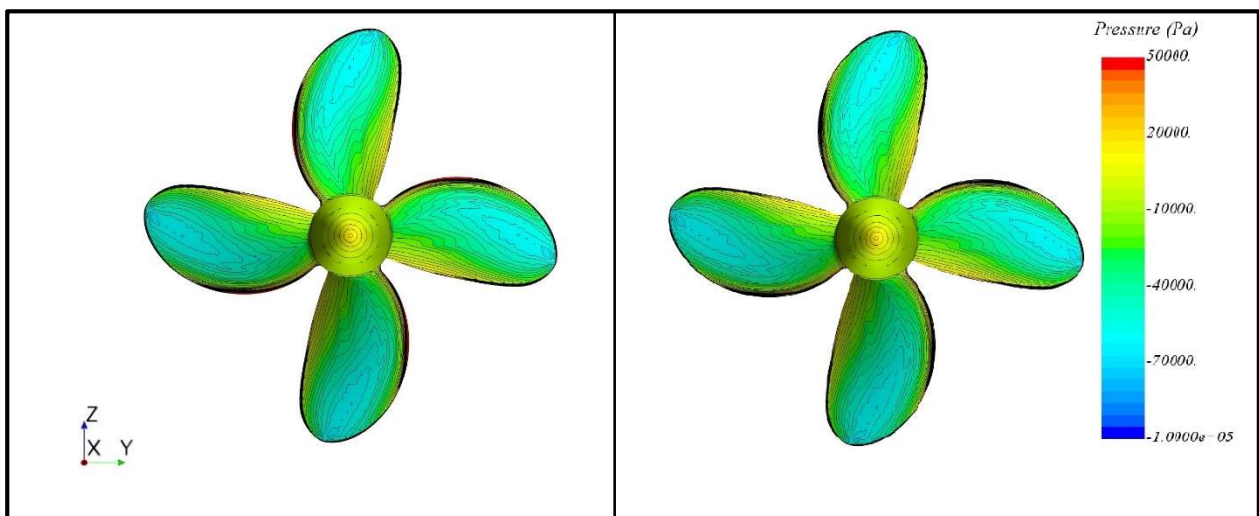
Slika 27. Vrijednost bezdimenzijske udaljenosti y^+ na tlačnoj strani vijka dobivena korištenjem $k - \varepsilon$ realizible (lijevo) i $k - \omega$ SST (desno) modela turbulencije



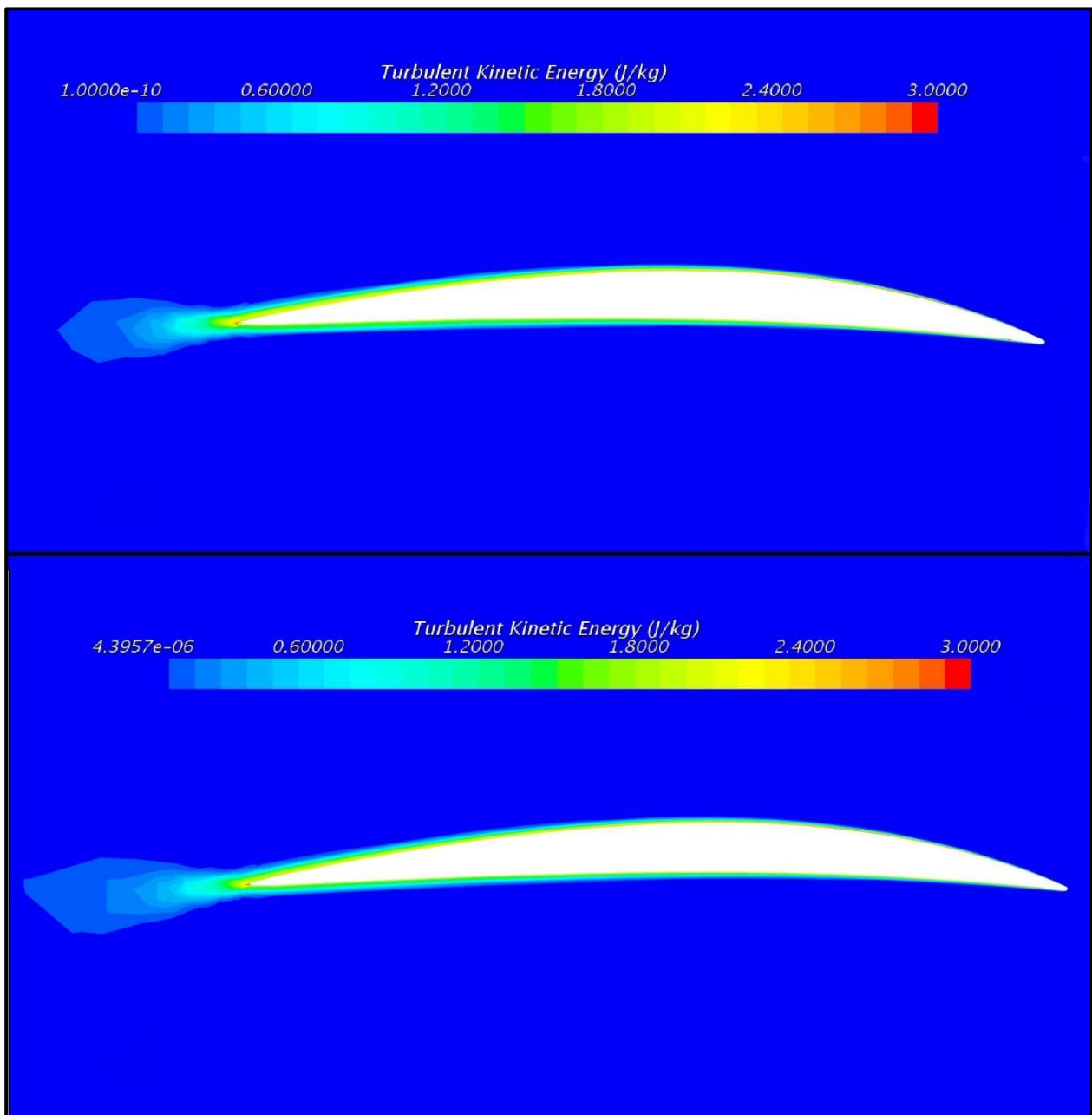
Slika 28. Vrijednost bezdimenzijske udaljenosti y^+ na podtlačnoj strani vijka dobivena korištenjem $k - \epsilon$ realizable (lijevo) i $k - \omega$ SST (desno) modela turbulencije



Slika 29. Tlak na tlačnoj strani broskog vijka dobiven korištenjem $k - \epsilon$ realizable (lijevo) i $k - \omega$ SST (desno) modela turbulencije

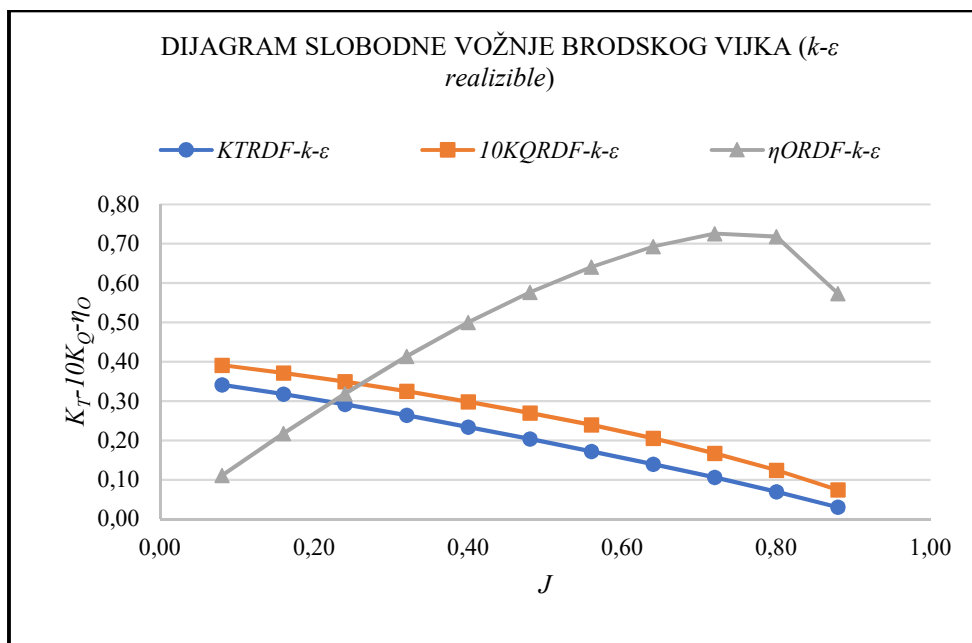


Slika 30. Tlak na podtlačnoj strani broskog vijka dobiven korištenjem $k - \epsilon$ realizable (lijevo) i $k - \omega$ SST (desno) modela turbulencije

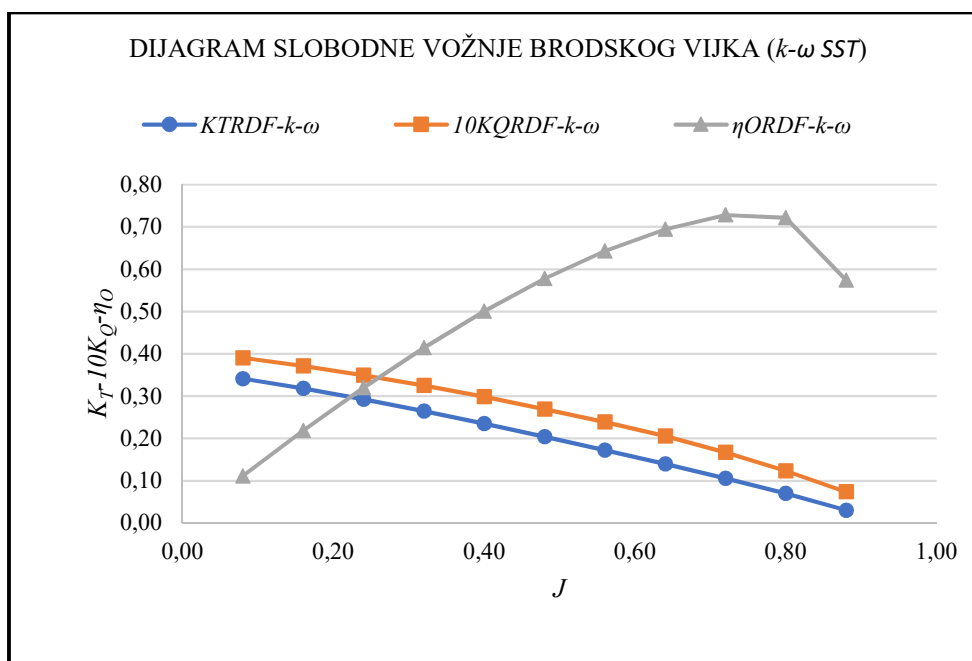


Slika 31. Razdioba kinetičke energije turbulencije na $0,7R$ vijka dobivena korištenjem $k - \varepsilon$ realizible (gore) i $k - \omega$ SST (dolje) modela turbulencije

Validacija rezultata numeričke simulacije pokusa slobodne vožnje broskog vijka provedena je za koeficijent poriva K_T , koeficijent momenta K_Q i stupanj djelovanja broskog vijka u slobodnoj vožnji η_0 . Rezultati numeričkih simulacija pokusa slobodne vožnje broskog vijka prikazuju se dijagramom slobodne vožnje broskog vijka (Slika 32 i Slika 33).



Slika 32. Dijagram pokusa slobodne vožnje broskog vijka dobiven numeričkom simulacijom s $k - \varepsilon$ realizible modelom turbulencije



Slika 33. Dijagram pokusa slobodne vožnje broskog vijka dobiven numeričkom simulacijom s $k - \omega$ SST modelom turbulencije

6.4. Usporedba rezultata pokusa slobodne vožnje dobivenih numeričkom simulacijom i rezultata modelskih ispitivanja ekstrapoliranih na prototip

U ovom poglavlju prikazani su rezultati numeričkih simulacija slobodne vožnje vijka za dva različita modela turbulencije. Dobiveni rezultati uspoređeni su s rezultatima modelskih ispitivanja ekstrapoliranih na prototip, prema preporuci iz [19], a kako je prikazano u odlomku 3.4. Tablica 9 prikazuje usporedbu eksperimentalnih rezultata za mjerilo prototipa i rezultata numeričkih

simulacija s $k - \varepsilon$ *realizable* i $k - \omega$ *SST* modelima turbulencije. Najveća relativna pogreška za oba modela turbulencije dobivena je za koeficijent napredovanja $J = 0,88$. Za $k - \varepsilon$ *realizable* model turbulencije ona iznosi 12,26 %, dok za $k - \omega$ *SST* iznosi 13,32 %. Pri drugim vrijednostima koeficijenta napredovanja relativna greška ne prelazi 8 %. Za pokus vlastitog pogona su potrebne vrijednosti koeficijenta poriva na nižim vrijednostima koeficijenta napredovanja, gdje su relativne devijacije rezultata numeričkih simulacija zadovoljavajuće.

Tablica 10 prikazuje usporedbu rezultata numeričkih simulacija za dva različita modela turbulencije i ekstrapoliranih rezultata za koeficijent momenta vijka. Moguće je uočiti da su najveće relativne devijacije pri najvišem i najnižem koeficijentu napredovanja tj. u području gdje je vijak jako opterećen i u području gdje je vijak slabo opterećen. Tablica 11 prikazuje usporedbu numeričkih i ekstrapoliranih rezultata za stupanj djelovanja broskog vijka u slobodnoj vožnji. Moguće je uočiti da je za većinu koeficijenata napredovanja stupanj djelovanja broskog vijka u slobodnoj vožnji precijenjena. Ovo je posljedica toga što je vrijednost koeficijenta momenta dobivena numeričkom simulacijom više podcijenjena nego vrijednost koeficijenta poriva, a prema jednadžbi (3.7) stupanj djelovanja broskog vijka je omjer koeficijenta poriva i koeficijenta momenta. Slika 34 prikazuje dijagram slobodne vožnje broskog vijka u kojem su prikazani ekstrapolirani rezultati kao i rezultati numeričkih simulacija slobodne vožnje broskog vijka. Numeričkim simulacijama su dobro predviđeni trendovi hidrodinamičkih koeficijenata slobodne vožnje broskog vijka kao i njihove vrijednosti (Slika 34).

Tablica 9. Usporedba ekstrapoliranih rezultata i rezultata dobivenih numeričkom simulacijom za koeficijent poriva

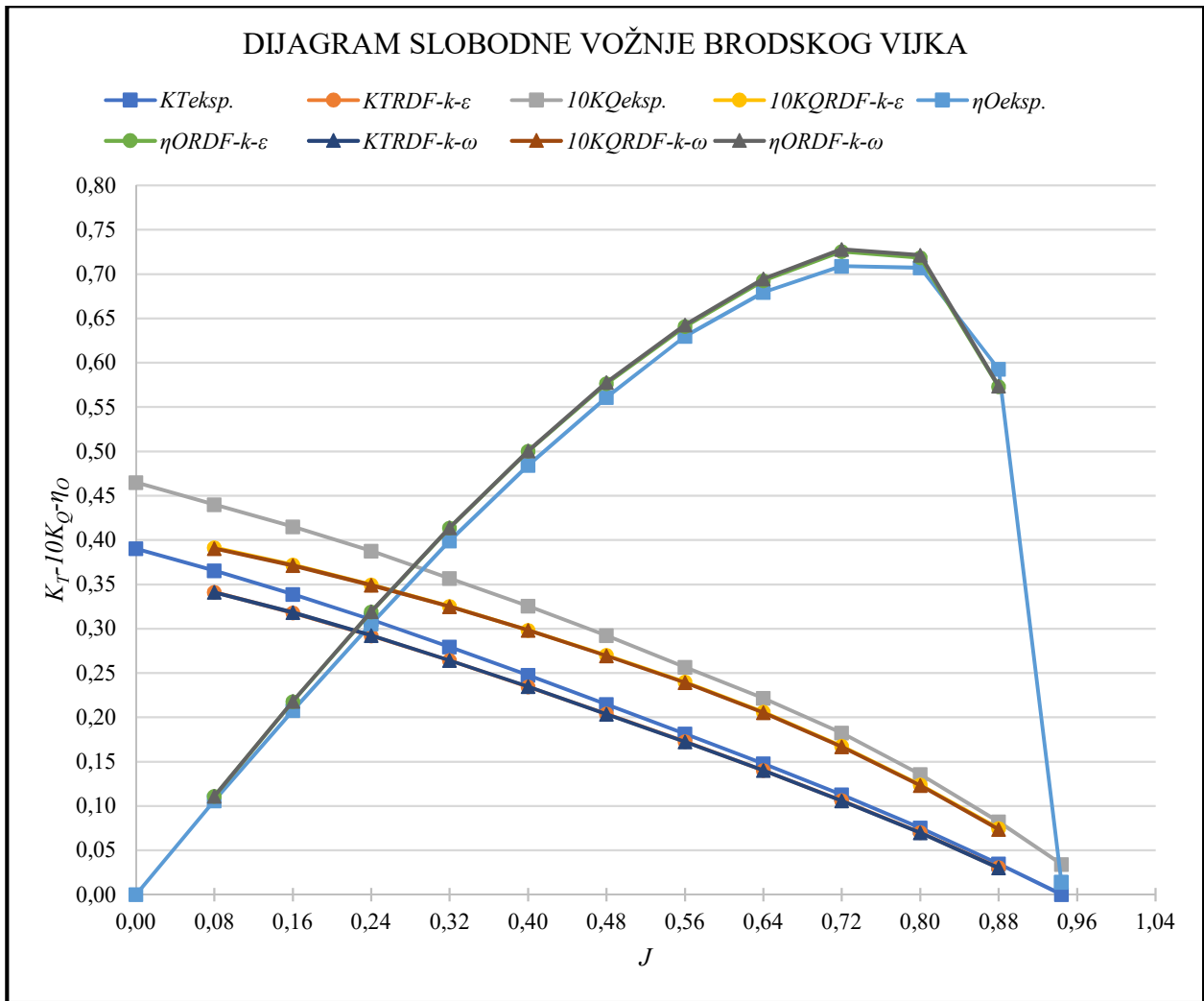
J	K_T				
	EKSP	RDF $k-\varepsilon$	RDF $k-\omega$	RD $k-\varepsilon$, %	RD $k-\omega$, %
0,08	0,3653	0,3413	0,3411	-6,57	-6,63
0,16	0,3388	0,3181	0,3182	-6,11	-6,09
0,24	0,3102	0,2920	0,2923	-5,88	-5,78
0,32	0,2795	0,2641	0,2643	-5,52	-5,44
0,40	0,2476	0,2343	0,2347	-5,39	-5,21
0,48	0,2147	0,2038	0,2038	-5,07	-5,11
0,56	0,1814	0,1726	0,1725	-4,85	-4,91
0,64	0,1478	0,1401	0,1401	-5,21	-5,26
0,72	0,1128	0,1061	0,1060	-5,96	-6,02
0,80	0,0754	0,0700	0,0699	-7,17	-7,34
0,88	0,0348	0,0305	0,0302	-12,26	-13,32

Tablica 10. Usporedba ekstrapoliranih rezultata i rezultata dobivenih numeričkom simulacijom za koeficijent momenta

$10K_Q$					
J	EKSP	RDF $k-\varepsilon$	RDF $k-\omega$	RD $k-\varepsilon$, %	RD $k-\omega$, %
0,08	0,4400	0,3914	0,3905	-11,03	-11,24
0,16	0,4151	0,3719	0,3713	-10,40	-10,54
0,24	0,3878	0,3495	0,3493	-9,87	-9,92
0,32	0,3568	0,3251	0,3250	-8,87	-8,92
0,40	0,3255	0,2981	0,2983	-8,42	-8,34
0,48	0,2924	0,2700	0,2693	-7,65	-7,89
0,56	0,2567	0,2399	0,2391	-6,53	-6,84
0,64	0,2216	0,2060	0,2053	-7,05	-7,37
0,72	0,1823	0,1675	0,1668	-8,13	-8,51
0,80	0,1358	0,1240	0,1233	-8,64	-9,16
0,88	0,0823	0,0746	0,0736	-9,31	-10,51

Tablica 11. Usporedba ekstrapoliranih rezultata i rezultata dobivenih numeričkom simulacijom za stupanj djelovanja broskog vijka u slobodnoj vožnji

η_0					
J	EKSP	RDF $k-\varepsilon$	RDF $k-\omega$	RD $k-\varepsilon$, %	RD $k-\omega$, %
0,08	0,1057	0,1110	0,1112	4,97	5,16
0,16	0,2079	0,2177	0,2181	4,75	4,93
0,24	0,3056	0,3190	0,3195	4,39	4,55
0,32	0,3990	0,4135	0,4141	3,64	3,77
0,40	0,4843	0,5001	0,5007	3,26	3,38
0,48	0,5610	0,5764	0,5777	2,74	2,98
0,56	0,6299	0,6410	0,6427	1,76	2,04
0,64	0,6794	0,6925	0,6946	1,94	2,24
0,72	0,7090	0,7255	0,7280	2,33	2,68
0,80	0,7073	0,7184	0,7212	1,57	1,97
0,88	0,5926	0,5731	0,5738	-3,30	-3,18



Slika 34. Dijagram slobodne vožnje broskog vijka

7 REZULTATI NUMERIČKIH SIMULACIJA POKUSA VLASTITOG POGONA

U ovom poglavlju je prikazana validacija numeričkih simulacija pokusa vlastitog pogona za dva modela turbulencije s ekstrapoliranim rezultatima dobivenim temeljem eksperimentalnih ispitivanja [20]. Kao ulazni podatci za numeričke simulacije pokusa vlastitog pogona korišteni su rezultati numeričkih simulacija pokusa slobodne vožnje broskog vijka, prikazani u poglavlju 6.3., te brzina broda prilikom pokusne vožnje.

7.1. Konvergencija integralnih veličina

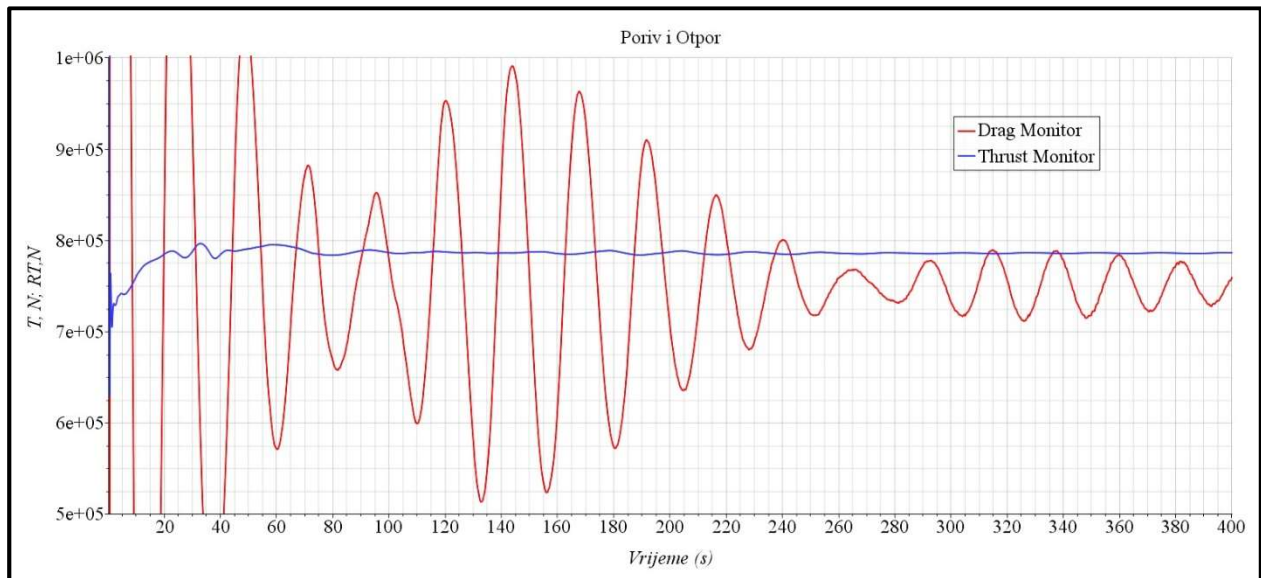
Prema preporuci iz [9] potrebno fizičko vrijeme proračuna je $20T$ pri čemu je T period potreban da tekućina prijeđe duljinu broda. U radu je proveden pokus vlastitog pogona za brzinu koja je predviđena modelskim ispitivanjima pri snazi motora $P_B = 7575$ kW (75% MCR) i gazu broda $T = 9,9$ m, a iznosi $V_{PP} = 16,32$ čv. Period T iznosi:

$$T = \frac{L_{PP}}{V_{PP} \cdot 0,5144} = \frac{175}{16,32 \cdot 0,5144} \approx 20 \text{ s}, \quad (7.1)$$

Dakle, fizičko vrijeme numeričke simulacije iznosi 400 s. Vremenski korak se prema preporuci iz [9] definira kao 200 vremenskih koraka unutar jednog perioda i iznosi:

$$\Delta t = \frac{T}{200} = 0,1 \text{ s}. \quad (7.2)$$

Kako bi se odredila srednja sila otpora uobičajeno je vrijednost sile otpora u posljednjih 20 % proračunskog fizičkog vremena osrednjiti. Također je i silu poriva vijka potrebno osrednjiti u posljednjih 20% fizičkog vremena numeričke simulacije. Slika 35 prikazuje promjenu poriva i otpora kroz fizičko vrijeme simulacije.

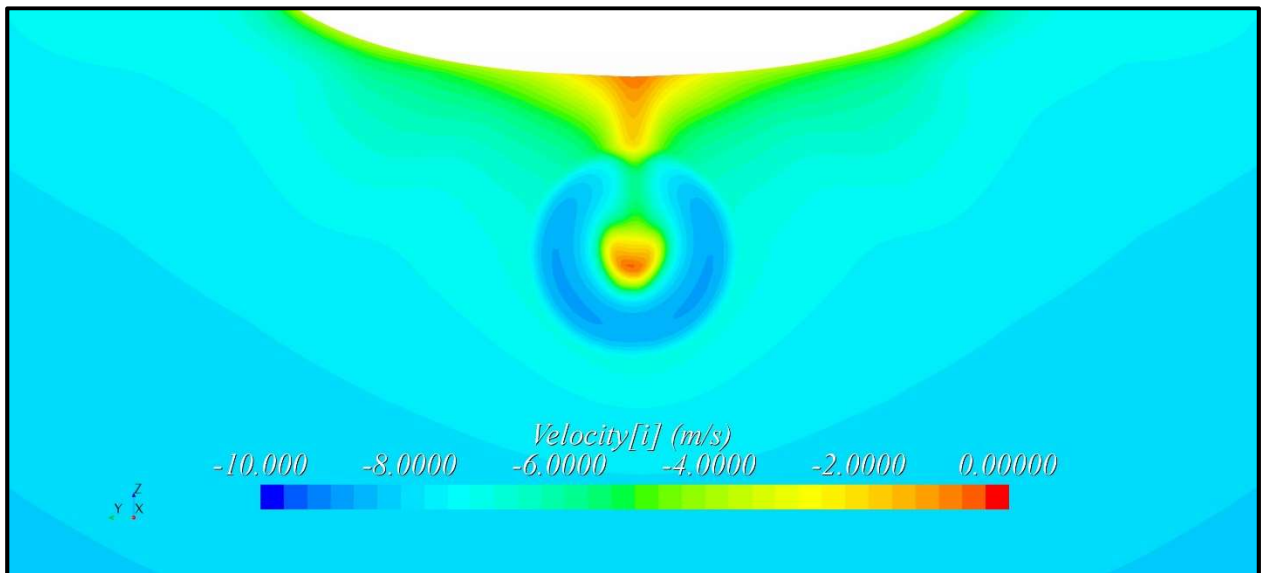


Slika 35. Vrijednost poriva i otpora kroz fizičko vrijeme simulacije

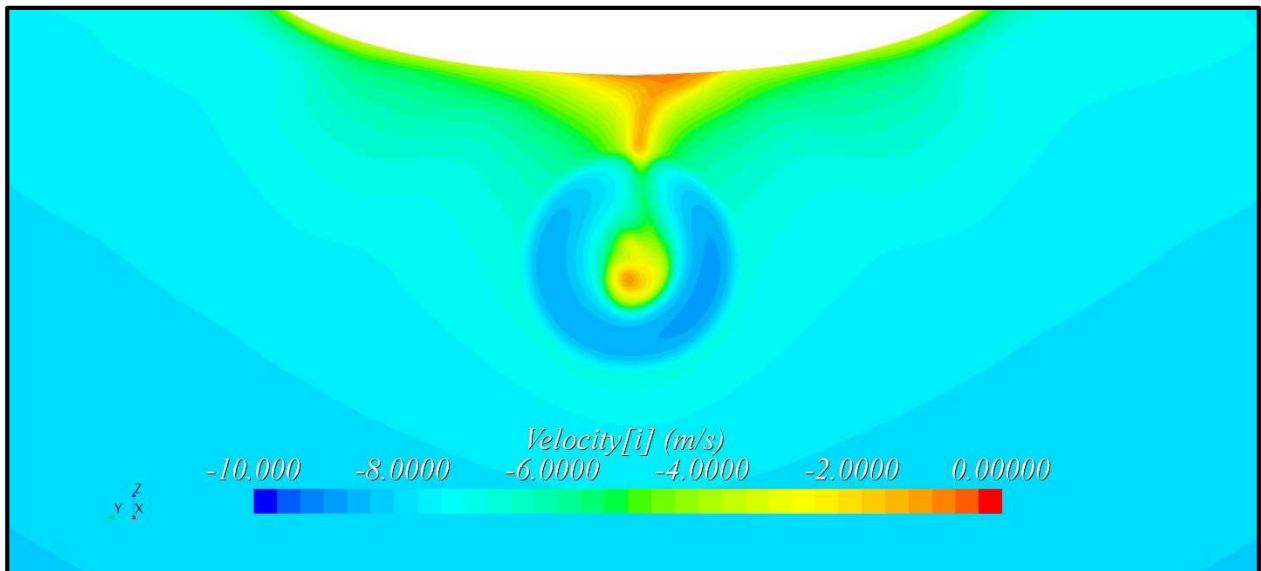
7.2. Rezultati numeričke simulacije pokusa vlastitog pogona

U okviru rezultata numeričke simulacije pokusa vlastitog pogona dan je prikaz slika strujanja, polja tlaka, reljefa slobodne površine te iznosa sile poriva broskog vijka u radu iza trupa broda i sile otpora broda. Numeričke simulacije pokusa vlastitog pogona su provedene s $k - \varepsilon$ *realizable* i $k - \omega$ *SST* modelom turbulencije. Za provođenje numeričke simulacije potrebno je predvidjeti broj okretaja broskog vijka. Pretpostavljeni broj okretaja broskog vijka za prvu numeričku simulaciju iznosi $N = 107$ o/min.

Polje sustrujanja prikazuje raspored brzina u ravnini okomitoj na aksijalnu os broskog vijka. Profil dostrujavanja tekućine broskom vijku utječe na rad broskog vijka iza krme broda. Slika 36 i Slika 37 prikazuju polje sustrujanja u ravnini ispred diska vijka, za dva modela turbulencije. U toj ravnini je određena vrijednost brzine sustrujanja potrebna za raspodjelu sile poriva po disku vijka u „*Body Force*“ metodi. Ovisno o modelu turbulencije mogu se uočiti razlike u sustrujanju te se može primijetiti da numerička simulacija s $k - \omega$ *SST* modelom turbulencije daje fizikalniju sliku polja sustrujanja, jer se može uočiti blaga nesimetričnost polja uzrokovana rotacijom vijka (Slika 37).

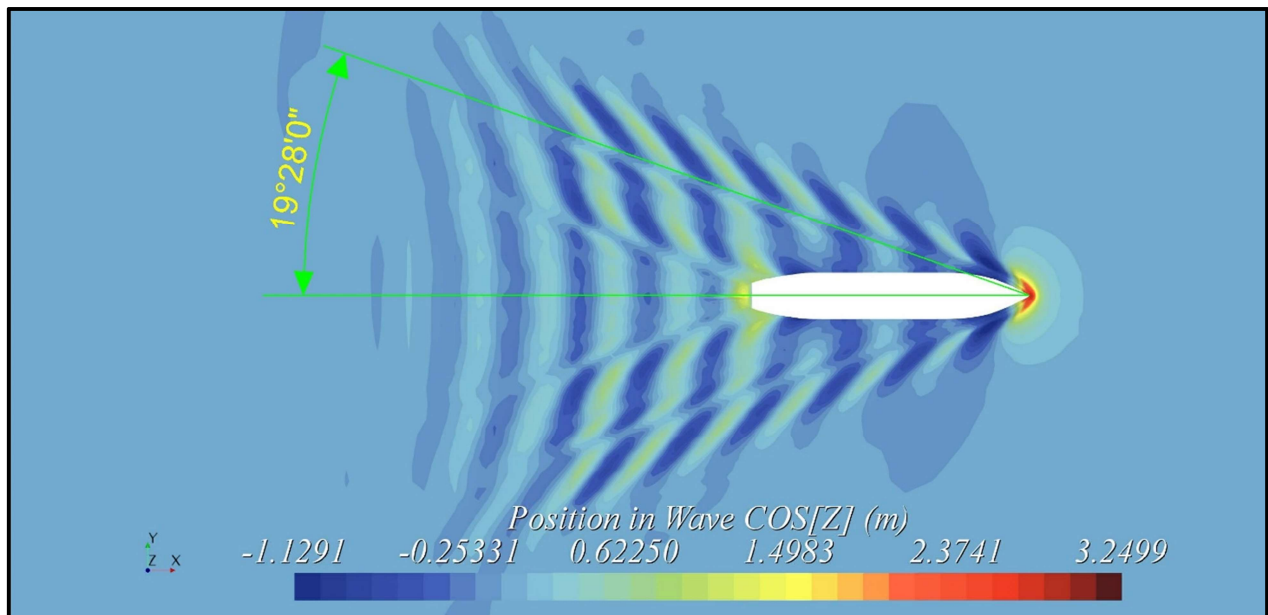


Slika 36. Polje sustrujanja ispred diska vijka pri 108 o/min ($k - \epsilon$ realizable)



Slika 37 Polje sustrujanja ispred diska vijka pri 108 o/min ($k - \omega$ SST)

Numerička simulacija s VOF metodom ima mogućnost prikaza reljefa slobodne površine. Na reljefu slobodne površine je moguće uočiti kut razilaženja pramčanih valova (Slika 38) koji odgovara iznosu Kelvinova kuta za tekućinu neograničene dubine.



Slika 38. Reljef slobodne površine i Kelvinov kut

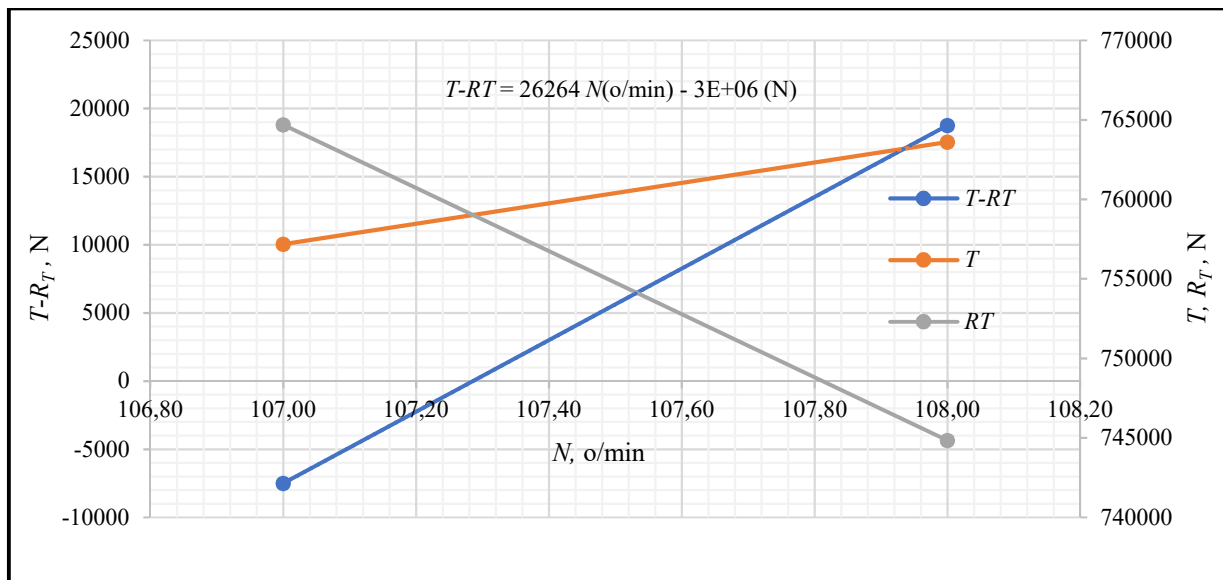
7.3. Usporedba rezultata numeričkih simulacija vlastitog pogona i ekstrapoliranih rezultata vlastitog pogona na temelju modelskih ispitivanja

Za pokus vlastitog pogona provedene su dvije numeričke simulacije za svaki model turbulencije pri brojevima okretaja brodskog vijka: 107 o/min i 108 o/min. Ulazni podatci za „Body force“ metodu su dijagrami slobodne vožnje dobiveni numeričkim simulacijama pokusa slobodne vožnje brodskog vijka. Za svaku numeričku simulaciju je izračunata srednja vrijednost otpora i poriva u posljednjih 20 % fizičkog vremena numeričke simulacije te je određena razlika srednje vrijednosti sile poriva i srednje vrijednosti otpora. Navedene razlike su ucrtane u dijagram (Slika 39), iz kojeg se potom određuje broj okretaja brodskog vijka za koji je ova razlika jednaka nuli. Broj okretaja vijka za numeričku simulaciju s $k - \omega$ SST modelom turbulencije u točki vlastitog pogona za brzinu broda $V_{PP} = 16,32$ čv iznosi:

$$N_{PP(k-\omega SST)} = 107,29 \text{ o/min} ,$$

pri čemu je poriv brodskog vijka:

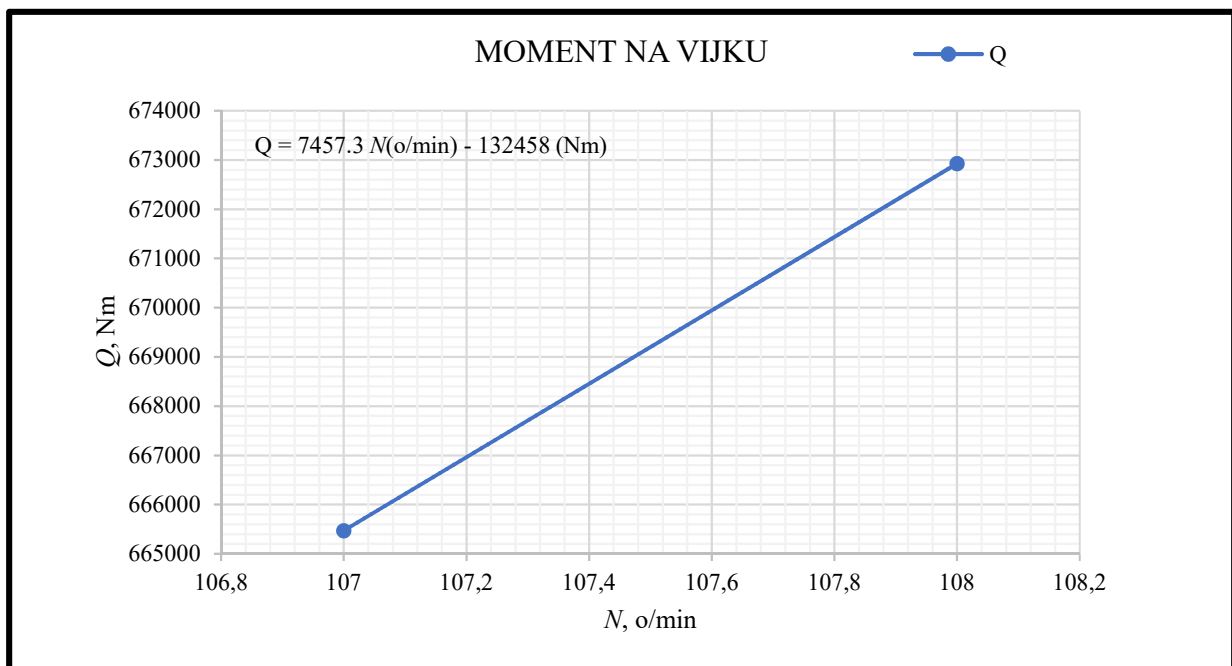
$$T_{PP(k-\omega SST)} = 759018 \text{ N} .$$



Slika 39. Dijagram ovisnosti razlike poriva i otpora o broju okretaja vijka ($k - \omega SST$)

Kako bi se izračunala snaga predana vijku također je u numeričkim simulacijama pokusa vlastitog pogona određen i moment na vijku za 107 i 108 o/min. Interpolirana vrijednost iz dijagrama (Slika 40) pri brzini broda na pokusnoj plovidbi i broju okretaja u točki vlastitog pogona iznosi:

$$Q_{PP(k-\omega SST)} = 667602 Nm.$$



Slika 40. Dijagram ovisnosti momenta na vijku o broju okretaja vijka ($k - \omega SST$)

Iz poznatog broja okretaja brodskog vijka i momenta na vijku može se izračunati snaga predana vijku pri brzini broda na pokusnoj plovidbi, te ona iznosi:

$$P_{D(PP(k-\omega SST))} = Q_{PP(k-\omega SST)} \cdot \frac{\pi N_{PP(k-\omega SST)}}{30 \cdot 1000} = 7500,47 \text{ kW}.$$

Prema prije opisanom postupku određena je točka vlastitog pogona i za numeričke simulacije s $k - \varepsilon$ *realizable* modelom turbulencije. Vrijednosti broja okretaja vijka, sile poriva, momenta na vijku i snage predane vijku u točki vlastitog pogona iz numeričkih simulacija s $k - \varepsilon$ *realizable* modelom turbulencije iznose redom:

$$N_{PP(k-\varepsilon \text{ realizable})} = 107,71 \text{ o/min} ,$$

$$T_{PP(k-\varepsilon \text{ realizable})} = 759477 \text{ N} ,$$

$$Q_{PP(k-\varepsilon \text{ realizable})} = 671317 \text{ Nm} .$$

$$P_{D(PP(k-\varepsilon \text{ realizable}))} = Q_{TRIAL(k-\varepsilon \text{ realizable})} \cdot \frac{\pi N_{PP(k-\varepsilon \text{ realizable})}}{30 \cdot 1000} = 7572,37 \text{ kW}.$$

Iz ekstrapoliranih rezultata pokusa vlastitog pogona vrijednosti broja okretaja vijka, poriva te snage predane vijku za brzinu na pokusnoj plovidbi iznose redom:

$$N_{PP(eksp.)} = 101,07 \text{ o/min} ,$$

$$T_{PP(eksp.)} = 845220 \text{ N} ,$$

$$P_{D(PP(eksp.))} = 7543,28 \text{ kW}.$$

Tablica 12 prikazuje usporedbu rezultata numeričkih simulacija pokusa vlastitog pogona i eksperimentalnih rezultata ekstrapoliranih na veličinu prototipa. Moguće je uočiti zadovoljavajuće slaganje rezultata za snagu predanu vijku te broj okretaja vijka pri brzini pokusne plovidbe.

Tablica 12: Usporedba rezultata pokusa vlastitog pogona

	EKSP	RDF $k-\omega SST$	RDF $k-\varepsilon realiz.$	RD $k-\omega SST$, %	RD $k-\varepsilon realiz.$, %
P_D , kW	7543,28	7500,47	7572,37	-0,57	0,39
N , o/min	101,07	107,29	107,71	6,15	6,58

7.4. Određivanje hidrodinamičkih koeficijenata propulzije

Koeficijenti propulzije su određeni prema postupku navedenom u poglavlju 4.5. Rezultati numeričkih simulacija otpora broda u mirnoj vodi su ustupljeni od strane Katedre za hidrodinamiku plovniha objekata pri Zavodu za brodogradnju i pomorsku tehniku. Tablica 13 prikazuje koeficijente propulzije određene iz ekstrapoliranih rezultata kao i koeficijente propulzije određene iz rezultata numeričkih simulacija te njihovu relativnu devijaciju. Iako koeficijenti

propulzije izračunati pomoću rezultata numeričkih simulacija pokazuju određena odstupanja od koeficijenta propulzije određenih ekstrapolacijom rezultata modelskih ispitivanja, isporučena snaga i broj okretaja vijka su zadovoljavajuće točnosti.

Tablica 13: Usporedba rezultata komponenata propulzije

	EKSP	RDF $k-\omega SST$	RDF $k-\epsilon realiz.$	RD $k-\omega SST, \%$	RD $k-\epsilon realiz., \%$
$1-w_T$	0,7192	0,7909	0,7978	9,97	10,93
t	0,2101	0,2418	0,2197	15,07	4,55
η_H	1,0983	0,9587	0,9781	-12,71	-10,95
η_R	1,0410	1,0014	0,9984	-3,80	-4,09
η_O	0,6010	0,6680	0,6699	11,16	11,47

8 ZAKLJUČAK

U ovom radu je ispitana mogućnost primjene numeričkih metoda temeljenih na RANS jednadžbama u sprezi s modelima turbulencije za predviđanje vlastitog pogona broda tj. određivanje potrebne snage i broja okretaja brodskog vijka za postizanje željene brzine broda. Pokazano je da je numeričke simulacije viskoznog strujanja moguće provoditi u stvarnoj veličini te ostvariti zadovoljavajuću točnost rezultata. Numeričke simulacije pokusa slobodne vožnje brodskog vijka provedene su metodom višestrukih referentnih koordinatnih sustava (eng. *Multiple Reference Frame*). Na taj način je izbjegnuto modeliranje nestacionarne pojave rotacije vijka te se skratilo vrijeme potrebno za provođenje numeričkih simulacija viskoznog strujanja tekućine oko brodskog vijka u uvjetima slobodne vožnje. Studija verifikacije je provedena za tri različite gustoće mreže konačnih volumena konstantnog omjera profinjenja te je pokazano da gruba mreža konačnih volumena daje zadovoljavajuće rezultate, stoga se u daljnjim simulacijama koristila isključivo gruba mreža zbog skraćivanja trajanja numeričkih simulacija i ograničenih računalnih resursa. Numeričke simulacije slobodne vožnje provedene su za stvarnu veličinu brodskog vijka te su rezultati uspoređeni s ekstrapoliranim rezultatima modelskih ispitivanja pokusa slobodne vožnje brodskog vijka. Usporedbom rezultata pokusa slobodne vožnje vijka je uočeno zadovoljavajuće slaganje rezultata numeričkih simulacija i ekstrapoliranih vrijednosti za koeficijent poriva, koeficijent momenta i stupanj djelovanja brodskog vijka u slobodno vožnji. Provedene su numeričke simulacije nestacionarnog strujanja zbog postojanja slobodne površine i stvaranja valova uslijed gibanja broda kroz tekućinu. S ciljem smanjenja vremena potrebnog za provođenje numeričkih simulacija te zbog ograničenih računalnih resursa, numeričke simulacije pokusa vlastitog pogona broda su provedene primjenom „Body force“ metode (tj. metode virtualnog diska). „Body force“ metoda ne zahtijeva modeliranje geometrije brodskog vijka iza krme broda, već koristi dijagram slobodne vožnje brodskog vijka kao ulazni podatak. U ovom radu, kao ulazni podatak za „Body force“ metodu korišten je dijagram slobodne vožnje brodskog vijka dobiven numeričkom simulacijom. Snaga predana brodskom vijku i broj okretaja brodskog vijka za pokusnu plovidbu broda, određeni numeričkim simulacijama, ukazuju na zadovoljavajuće slaganje s ekstrapoliranim rezultatima modelskih ispitivanja. Koeficijenti propulzije određeni numeričkim simulacijama pokusa vlastitog pogona ukazuju na određeno odstupanje od ekstrapoliranih rezultata modelskih ispitivanja. Na temelju provedenih numeričkih simulacija može se zaključiti da rezultati numeričkih simulacija viskoznog strujanja, temeljenih na RANS jednadžbama, mogu biti od velikog značaja prilikom preliminarnog projektiranja trupa broda i brodskog vijka. Na taj način moguće je smanjiti broj modelskih ispitivanja u bazenu koja su dugotrajna i skupa.

LITERATURA

- [1] Carrica, P. M., Castro, A. M., Stern, F., Self-propulsion computations using a speed controller and a discretized propeller with dynamic overset grids, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 15, No. 4, 2010, pp. 316-330.
- [2] Gao, Q., Jin, W., Vassalos, D., The Calculations of Propeller Induced Velocity by RANS and Momentum Theory, *Journal of Marine Science and Application*, Vol. 11, No. 2, 2012, pp. 164-168.
- [3] Bugalski, T., Hoffmann, P., Numerical Simulation of the Self-Propulsion Model Tests, *Second International Symposium on Marine Propulsors*, Hamburg, Germany, 2011, pp. 1-7.
- [4] Islam, M., Jahra, F., Doucet, M., Optimization of RANS Solver Simulation Setup for Propeller Open Water Performance Prediction, *34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, St. John's, Newfoundland, Canada, 2015, pp. 1-11.
- [5] Califano, A., Steen, S., Numerical simulations of a fully submerged propeller subjected to ventilation, *Ocean Engineering*, Vol. 38, No. 14-15, 2011, pp. 1582-1599.
- [6] Seo, J. H., Seol, D. M., Lee, J. H., Rhee, S. H., Flexible CFD meshing strategy for prediction of ship resistance and propulsion performance, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Vol. 2, No. 3, 2010, pp. 139-145.
- [7] Müller, S. B., Abdel-Maksoud, M., Hilbert, G., Scale effects on propellers for large container vessels, *First International Symposium on Marine Propulsors*, Trondheim, 2009, pp. 1-8.
- [8] Ferziger, J. H., Perić, M., *Computational Methods for Fluid Dynamics*, 3rd edition, Springer, Berlin, 2002.
- [9] STAR-CCM+, *User Guide*, CD-adapco, 2016.
- [10] Virag, Z., Džijan, I., *Računalna dinamika fluida*, Interna skripta, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [11] Sambolek, M., *Propulzija broda*, Brodarski institut, Zagreb, 2012.

- [12] Carlton, J. S., *Marine Propellers and Propulsion*, Second Edition, Elsevier Ltd., Oxford, 2007.
- [13] ITTC-Recommended Procedures and Guidelines, Testing and Extrapolation Methods, Propulsion, Propulsor, Open Water Test, 2002.
- [14] ITTC-Recommended Procedures and Guidelines, 1978 ITTC Performance Prediction Method, 2011.
- [15] ITTC-Recommended Procedures and Guidelines, Uncertainty Analysis in CFD, Verification and Validation, Methodology and Procedures, 2008.
- [16] Eça, L., Hoekstra, M., A procedure for the estimation of the numerical uncertainty of CFD calculations based on grid refinement studies, *Journal of Computational Physics*, Vol. 262, 2014, pp. 104-130.
- [17] 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*, Vol. 123, No. 4, 2001, pp. 793-802.
- [18] Simonsen, C. D., Otzen, J. F., Joncquez, S., Stern, F., EFD and CFD for KCS heaving and pitching in regular head waves, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 18, No. 4, 2013, pp. 435-459.
- [19] ITTC-Recommended Procedures and Guidelines, Testing and Extrapolation Methods, Propulsion, Performance, Propulsion Test, 2008.
- [20] Brodarski institut, Izvještaj 3689-M ,Resistance, Self propulsion, streamlines and 3D wake measurements test results, Zagreb, 2014.
- [21] ITTC-Recommended Procedures and Guidelines, Practical Guidelines for Ship CFD Applications, 2011.
- [22] Tezdogan, T., Demirel, Y. K., Kellet, 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*, Vol. 97, 2015, pp. 186-206.