

Validacija CFD procedure za procjenu otpora RoPax broda

Matej, Dević, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, R. Boškovića 32, 21000 Split, Hrvatska, matej.devic.00@fesb.hr

Josip Bašić, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, R. Boškovića 32, 21000 Split, Hrvatska, Croatia, jobasic@fesb.hr

Martina, Bašić, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, R. Boškovića 32, 21000 Split, Hrvatska, martina.basic.00@fesb.hr

Branko, Blagojević, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, R. Boškovića 32, 21000 Split, Hrvatska, bblag@fesb.hr

SAŽETAK:

U preliminarnoj fazi projektiranja broda vrlo je važno procijeniti silu otpora broda. Ova studija predstavlja rezultate predviđanja otpora RoPax broda dobivene eksperimentima, koji su uspoređeni s numeričkom procjenom pomoću računalne dinamike fluida (CFD). Numeričko predviđanje otpora broda vrši se rješavačem metode konačnih volumena (FVM). Rješavač se temelji na Reynolds usrednjenj Navier-Stokes jednadžbi (RANS) i shemi volumena fluida (VOF) za definiranje slobodne površine. Otpor broda izračunat je za različite brzine broda kako bi se dobila krivulja otpora. Budući da gustoća mreže utječe na rezultate u bilo kojoj CFD simulaciji, za provjeru rezultata sile otpora korišteno je više različitih mreža. Provjera valjanosti i nesigurnost zbog diskretizacije u primjeni CFD rješavača analizirana je usporedbom numerički dobivenih rezultata sile otpora s eksperimentalnim podacima. Zaključeno je da su trenutni CFD rješavači sposobni dati rezultate vrlo blizu eksperimentima koristeći relativno malu računalnu snagu.

Ključne riječi: projektiranje broda, RoPax, otpor, CFD

Validation of the CFD procedure for RoPax resistance assessment

Matej, Dević, *University of Split, Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture, R. Boškovića 32, 21000 Split, Croatia, matej.devic.00@fesb.hr*

Josip Bašić, *University of Split, Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture, R. Boškovića 32, 21000 Split, Croatia, jobasic@fesb.hr*

Martina, Bašić, *University of Split, Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture, R. Boškovića 32, 21000 Split, Croatia, martina.basic.00@fesb.hr*

Branko, Blagojević, *University of Split, Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture, R. Boškovića 32, 21000 Split, Croatia, bblag@fesb.hr*

ABSTRACT:

In the preliminary stage of ship design is very important to determine the resistance force of a ship. This study presents the results of a RoPax resistance predictions obtained from towing tank experiments, which are compared with a numerical prediction using Computational Fluid Dynamics (CFD). Numerical prediction of the ship resistance is done by Finite-Volume Method (FVM) solver. The solver is based on Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) equations and the Volume of Fluid (VOF) scheme for the free surface capturing. Ship resistance was calculated for a various ship speeds to obtain resistance curve. Since the mesh density affects the results in any CFD simulation, multiple meshes were used to check the results of resistance force. The validation and uncertainty due to discretization in the application of the CFD solver is analysed by comparing the numerically obtained results of the resistance force to the experimental data. In was concluded that used CFD solvers are capable to deliver results very close to experiments using relatively small computing power.

Keywords: *ship design, RoPax, resistance, CFD*

1. Uvod

Stalni i brzi napredak računalnih sposobnosti sve efikasnije se koristi u dizajniranju i optimiranju forme broda za kompleksne probleme kao što je procjena otpora trupa. U preliminarnoj projektnoj fazi danas je vrlo učinkovit pristup primjenom računalne dinamike fluida [1, 2, 3, 4, 5]. Opis strujanja fluida oko trupa broda temelji se Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes (URANS) jednadžbama uz razne načine modeliranja turbulencije [6]. Ove jednadžbe se u praksi rješavaju numerički na računalima pomoću specijaliziranih programa (solvera). Kod takvog pristupa, umjesto direktnog rješavanja NS jednadžbi, javljaju se razne numeričke greške u rezultatima koje utječu na točnost procjene otpora broda. Utjecaj diskretizacijskih shema, iteracija, zaokruživanja i drugi parametri se stalno istražuju [7, 8, 9, 10]. Kvantificiranjem ovih numeričkih grešaka (verifikacija) u brojnim studijama se pokazalo da današnji solveri dovoljno dobro predviđaju otpor jednostavnih formi [11, 12, 13]. Kod formi kod kojih postoje složenija strujanja, modeliranje odvajanja strujanja i turbulencije zahtijevaju veće gustoće mreža [14, 15] za što su potrebni i veći računalni resursi. Za postizanje kvalitetnih rezultata simulacija, upotrebljivih za procjenu otpora broda, potrebno je uspostaviti vezu između numeričkih rezultata i stvarnog, fizikalnog, modela. To se postiže kroz validaciju [13]. Kompleksnost strujanja fluida oko trupa broda su uobičajeni validira kroz usporedbu s rezultatima eksperimenata provedenih u bazenima. Takve, validirane, procedure mogu onda dati pouzdanije rezultate u simulacijama modifikacija osnovnih formi, bilo iz razloga razvoja nove forme ili adaptacije postojeće za drugu namjenu i performanse.

U ovom radu uspostavljena je i validirana CFD procedura za procjenu otpora izgrađenog RoPax broda s propelerskom propulzijom. Procjene otpora izmijenjene forme rađene su u sklopu istraživanja mogućnosti ugradnje druge vrste propulzije. Radi se o novom tipu vodomlaznog propulzora sa zakretnim krilima koji bi imao bolju efikasnost u više režima plovidbe. U tu svrhu bilo je potrebno ispitati mogućnost smještaja propulzora u trupu postojećeg broda te definirati modifikacije forme u slučaju gradnje novog, sličnog, broda, a prije eventualnih bazenskih ispitivanja. CFD je u ovom slučaju očita pogodna metoda za simulaciju strujanja te optimiranje krmnog dijela forme i područja oko usisnih otvora vodomlaznog propulzora. Početne vrijednosti parametara i simulacijska procedura temelje se na iskustvu u detaljno analiziranom utjecaju raznih parametara [10]. Postojeći trup je ispitan u bazenu te je dio relevantnih rezultata prikazan u sklopu ovog rada. Optimalan broj propulzijskih jedinica, a time i izgled modificirane forme, razmatra se u drugoj studiji, u sklopu CEKOM projekta.

2. Podaci o brodu

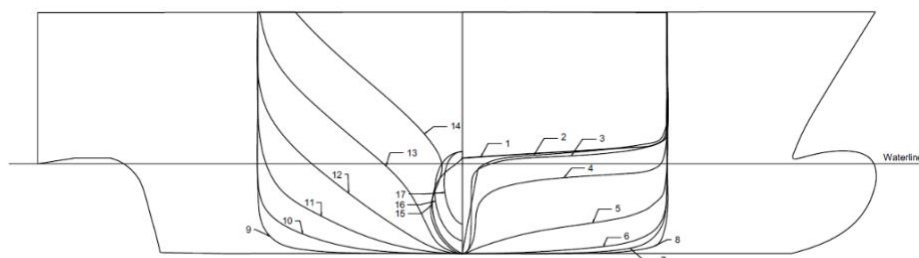
Glavni podaci o brodu prikazani su u nastavku.

Tablica 1/Table 1: Podaci o brodu/RoPax data.

Duljina preko svega, L_{oa}	180m
Širina, B	30.5m
Gaz, D	6.7m
Istisnina (Displacement)	21500t
Instalirana snaga (Power MCR)	38400kW
Brzina u službi (Speed in service)	21 kn
Maksimalna brzina (Maximum speed)	24 kn



Slika 1/Figure 1: 3D model trupa/3D hull model



Slika 2/Figure 2: Plan linija RoPax broda/RoPax lines plan

Tablica 2/Table 2: Podaci o otpor ubroda/Ship resistance data [16]

Brzina, kn	F_n	Ukupni otpor (kN)
22	0.269	1236
23	0.282	1461
24	0.294	1695
25	0.306	1912

3. Metodologija

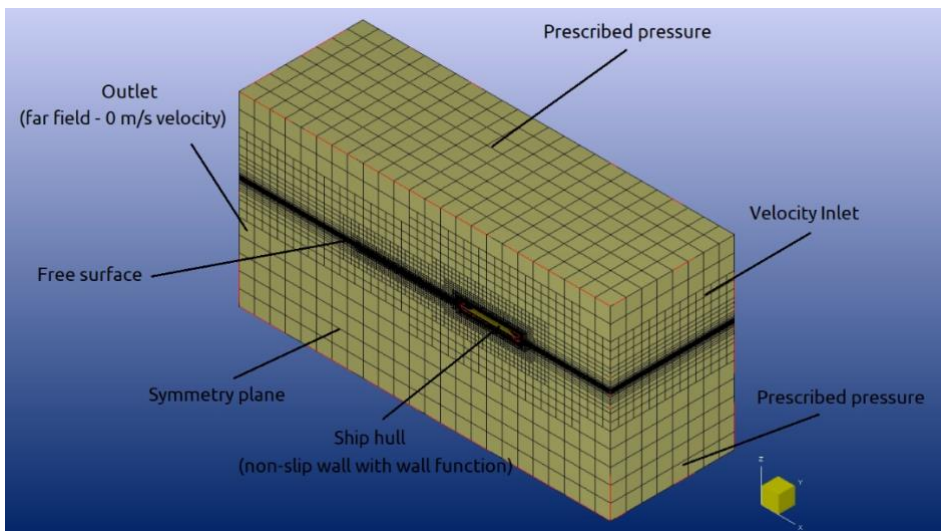
3.1. Geometrija i domena simulacije

CFD procedura za razmatrani RoPax brod definirana je i testirana u programu Numeca Fine/Marine. U predprocesoru HEXPRESS pripremljena je geometrija

za koju se vrše simulacije strujanja. Njime se konstruira proračunsku mrežu (*mesh*), koja se dalje koristi za proračune. Povećanjem broja elemenata mreže, odnosno usitnjavanjem, povećava se i vrijeme trajanja svake simulacije. Važno je naglasiti da se povećanjem broja ćelija ne garantira drastično povećanje točnosti [17].

Simulacije su se izvodile u heksaedarskoj domeni i Kartezijevom koordinatnom sustavu (x, y, z). Brod je u ishodištu na $x, y = 0$ (no-slip boundary condition). Površina vode predstavlja lokaciju slobodne površine na $z = 6.7$ m.

U posljednjem koraku pripreme geometrije domene definirani su *Viscous layers*. U ovom koraku usitnjavamo ćelije u neposrednoj blizini tijela, i to na način da se najbliža ćelija usitni na tanke slojeve koji bi trebali imati dovoljno male dimenzije da se u njima mogu računati promjene u strujanju unutar graničnog sloja, te modelirati viskozni efekti. Ovaj korak je iznimno važan, a Numeca ima integriran kalkulator y^+ bezdimenzijske udaljenosti od zida, a preko čije vrijednosti se automatski preporuča optimalnu debljinu prve ćelije u viskoznom sloju (*Ywall*), te ukupni broj ćelija u viskoznom sloju.



Slika 3/Figure 3: Mreža i domena simulacije/Mesh and computational domain

3.2. Rubni uvjeti

Domena je s vanjske strane modelirana s dva rubna uvjeta. Ulazna površina je modelirana sa *inflow boundary condition*. Za gornju i donju površinu (površine EXT) zadan je hidrostatski tlak, te fluid slobodno struji kroz ove dvije površine. Za sve površine koje imaju rubni uvjet SOL (čvrsta tijela) i u dodiru su s vodom, odabiran je *wall-function* tip rubnog uvjeta. Kod ostalih vanjskih rubova domene postavljen je rubni uvjet *far field* koji se giba u smjeru x -osi (smjer gibanja broda).

Za ravninu simetrije ostavljen je rubni uvjet zrcala (*mirror*). Time se kod proračuna simetričnih brodova omogućava da se potrebni broj ćelija prepolovi, a samim time smanji i vrijeme potrebno za proračun.

3.3. Postavke simulacije

Za početne simulacije se može koristiti i preporučene postavke programa Numeca FineMarine [18]. S raznim varijacijama mreže, te kod kompleksnije fizike strujanja, diskretizacijske sheme treba dodatno evaluirati. Glavni problem kod primjene metode konačnih volumena, koja se najčešće koristi u praksi za procjene otpora broda, je u strukturi mreže. U radu su korištene gradijentne diskretizacijske sheme, za koje je poznato da nemaju većeg utjecaja na određivanje otpora pravilnih brodskih formi [9, 10], sličnih razmatranoj. Korišteni turbulencijski model je $k-\omega$ (SST - Menter) koji se uobičajeno koristi u CFD simulacijama za proračune otpora broda [19]. U simulacijama su definirana dva fluida (*multi-fluid option*) i to prema podacima koji su isti kao i kod eksperimenta: temperatura vode je 16°C gustoće 1025.7967 kg/m^3 i kinematičkog viskoziteta $1.159 \cdot 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$, a zrak je dinamičkog viskoziteta $1.85 \cdot 10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$ i gustoće 1.2 kg/m^3 .

U simulacijama, brod se giba isključivo translatorno u smjeru x-osi. Gibanja u svim drugim osima, translacijska i rotacijska, su fiksirana. Brod ubrzava 55 sekundi od 0 m/s do brzine odabrane za proračun, tako da brzina raste po pravilu pola sinusoide. Taj način se pokazao izuzetno dobrim, jer su na početku i na kraju ubrzavanja broda sama ubrzanja vrlo mala, a taj parametar smanjuje greške u proračunu. Mreža se giba s brodom, te da se pri tom ne deformira (*Rigid motion* parametar gibanja mreže).

Položaj slobodne površine mora biti jednak položaju površine koja se kreira pri izradi mreže u programu HEXPRESS. Ukoliko se želi mijenjati gaz pri proračunu, mora se ponovo raditi novu mrežu, u protivnom se dobije mrežu usitnjenu na krivom položaju. Najveći utjecaj na točnost proračuna ima modeliranje mreže na slobodnoj površini [9, 10, 17] te je tom dijelu posebno posvećena pažnja. Poželjno je imati nejednaku usitnjenost u različitim smjerovima, tj. da ćelije po visini budu što sitnije, dok po širini mogu imati puno veće dimenzije. U ovom slučaju ćelije po z osi imaju postavljen prag minimalne veličine od 15 cm, dok ćelije po x i y osi imaju prag postavljen na 1 m.

Preciznost numeričkog proračuna određena je kontrolnim parametrima programa. Postavljen je maksimalni broj nelienarnih iteracija koji određuje broj izračuna u jednom vremenskom koraku. Parametar konvergenције kontrolira zaustavljanje iteracija, nakon čega se usvaja postignuto rješenje. Parametar vremenskog koraka bitno utječe na trajanje simulacija. Vrijeme plovidbe broda računa se tako da se broj vremenskih koraka pomnoži s vrijednosti vremenskog koraka (*Time step value*). Pri odabiru ova dva parametra važno je imati na umu odabrano vrijeme ubrzavanja broda.

Numeca FineMarine preporuča korištenje vremenskog koraka vrijednosti $T = 0.005 \left(\frac{L_{oa}}{V} \right)$ što se i koristilo u simulacijama. Maksimalni broj nelineranih iteracija je 5, a kriterij konvergencije je 2 reda.

CFD simulacije trupa bez privjesaka rađene su za dvije brzine broda 21kn i 24kn. Razmotrene su tri razine kvalitete (gustoće) mreže: gruba s 1.8M ćelija, srednja s 3.1M ćelija i fina mreža s 4.7M ćelija. Osnovna mreža se dodatno rafinirala pri čemu viši stupanj označava veću kvalitetu mreže.

Tablica 3/Table 3: Stupanj usitnjavanja mreže za pojedine dijelove geometrije / The level of mesh refinement for different parts of geometry

Područje	Fina mreža	Srednja mreža	Gruba mreža
Globalno rafiniranje	12	12	12
Krmeno zrcalo	7	7	7
Trup	6	5	5
Paluba	4	4	4
Pramčani bulb	7	7	6
Slobodna površina	9	9	7

Broj viskoznih slojeva za tri razine rafiniranja mreže je: gruba 21 sloj, srednja 23 sloja i fina s 24 viskozna sloja. Viskozni slojevi postavljeni su na sve dijelove geometrije jednako, osim na palubi gdje nema viskoznih slojeva radi uštede na broju ćelija te smanjenja vremena provođenja proračuna.

3.4. Verifikacija

Za verifikaciju procedure korištene su gore navedene tri veličine mreže. Koristile su se iste dimenzije domene, a jedini parametar različit za sve tri mreže bio usitnjenost mreže u pojedinim dijelovima. Glavni kriterij za provjeru verifikacije je kriterij konvergencije GCI [18]. U ocjenu verifikacije ulaze isključivo simulacije koje su postigle konvergenciju po principu interaktivnog konvergiranja, tj. da su ostatci matematičkih jednadžbi (*Residuals*) u četiri koraka postigla konvergenciju. Prvi korak za procjenu pogreške diskretizacije je definiranje veličine mreže [23] koji se primjenjuje na sve tri mreže.

$$h = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta V_i) \right]^{\frac{1}{3}}$$

gdje je ΔV_i volumen mreže, a N ukupan broj ćelija.
Indeks konvergencije je:

$$GCI_{fine}^{21} = \frac{1.25e_a^{21}}{r_{21}^p - 1}$$

Tablica 4/Table 4: Broj ćelija za različite mreže/Number of cells

Ukupan broj ćelija mreže, N1 (fine mesh)	4735890
Ukupan broj ćelija mreže, N2 (medium mesh)	3358861
Ukupan broj ćelija mreže, N3 (coarse mesh)	1766114
Volumen mreže, V (m ³)	228760640

Tablica 5/Table 5: Vrijednost otpora za različitu gustoću mreže/Calculated resistance for different mesh size

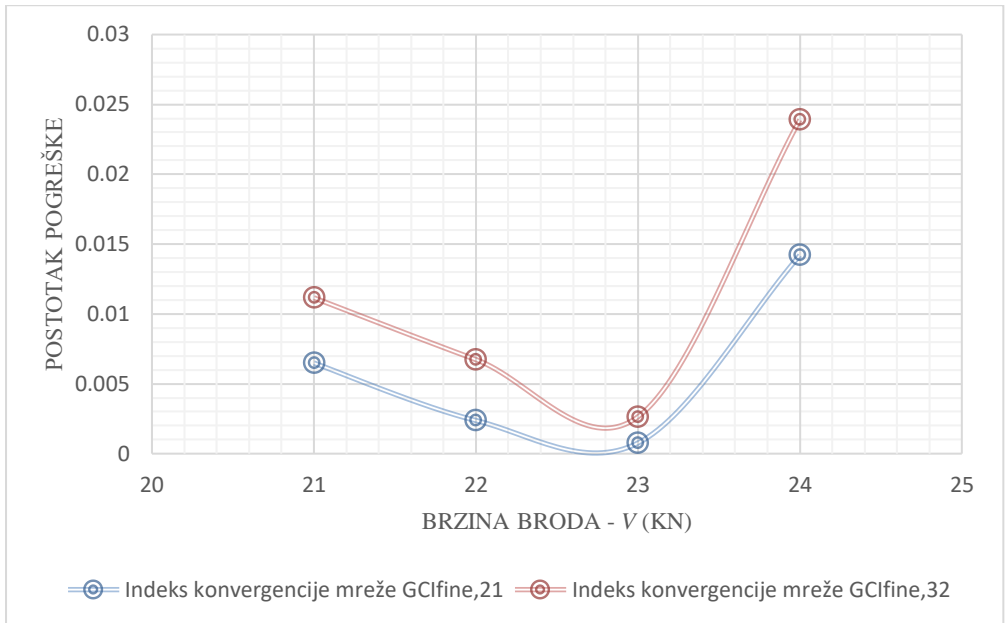
Brzina (kn)	21	24
Varijabla, Otpor $\phi 1$ (kN)	926.91	1990.07
Varijabla, Otpor $\phi 2$ (kN)	930.41	1915.80
Varijabla, Otpor $\phi 3$ (kN)	945.16	1890.66

Tablica 6/Table 6: Veličina mreže i faktor rafiniranja/Size of meshes and refinement factor

Veličina mreže 1, h1 (fine mesh)	3.64
Veličina mreže 2, h2 (medium mesh)	4.08
Veličina mreže 3, h3 (coarse mesh)	5.06
Faktor rafiniranja mreže 2 i 1, r21	1.12
Faktor rafiniranja mreže 3 i 2, r32	1.19

Tablica 7/Table 7: Ulazni podatci za procjenu verifikacija proračuna/Input data for verification procedure

Brzina (kn)	21	24
Varijabla ϵ_{21} (kN)	-11.16	-74.27
Varijabla ϵ_{32} (kN)	-31.84	-25.14
Koeficijent p	4.099	24.323
Koeficijent s	1.00	1.00
Koeficijent q(p)	-0.60	-1.60
Faktor rafiniranja mreže 2 i 1 za koef. p, r_{21}^p	1.57	14.59
Faktor rafiniranja mreže 3 i 2 za koef. p, r_{32}^p	2.04	68.10
Ekstrapolirana vrijednost $\phi_{ext,21}$	1132.79	1995.54
Ekstrapolirana vrijednost $\phi_{ext,32}$	1132.79	1916.18
Aproksimirana relativna greška $e_{a,21}$	1.00%	3.73%
Aproksimirana relativna greška $e_{a,32}$	2.89%	1.31%
Ekstrapolirana relativna greška $e_{ext, 21}$	1.73%	0.27%
Ekstrapolirana relativna greška $e_{ext, 32}$	2.71%	0.02%
Indeks konvergencije mreže GCI _{fine,21}	2.20%	0.34%
Indeks konvergencije mreže GCI _{fine,32}	3.48%	0.02%



Slika 4/Figure 4: Konvergenjski indeksi simulacija

Preporučeno je da konvergenjski indeks bude ispod 5% [18], što i je ostvareno. Može se vidjeti da su prema istom kriteriju dobri rezultati i za grublju mrežu, stoga je validacija provedena i s mrežama manje gustoće, skraćujući time trajanje simulacija.

4. Validacija i rezultati

Na temelju verificirane procedure provedena je i validacija usporedbom otpora proračunatog primjenom CFD-a s poznatim eksperimentalnim podacima za brod. Validacijske simulacije su rađene za proračun otpora za više brzina. Za dodatnu usporedbu, ukupni otpor broda proračunat je i programom Maxsurf Resistance koji podržava klasične empirijske i statističke metode.

Broj ćelija za različite mreže u validacijskim simulacijama je uzet kao i u postupku verifikacije. I ovdje je dobiveni indeks konvergencije bio u okvirima preporučenih vrijednosti.

Tablica 8/Table 8: Indeks konvergencije u validacijskim simulacijama /Convergence indeks in validation simulations

V (kn)	21	22	23	24
Indeks konvergencije mreže GCIfine,21	0.006	0.002	0.001	0.014
Indeks konvergencije mreže GCIfine,32	0.011	0.007	0.003	0.024

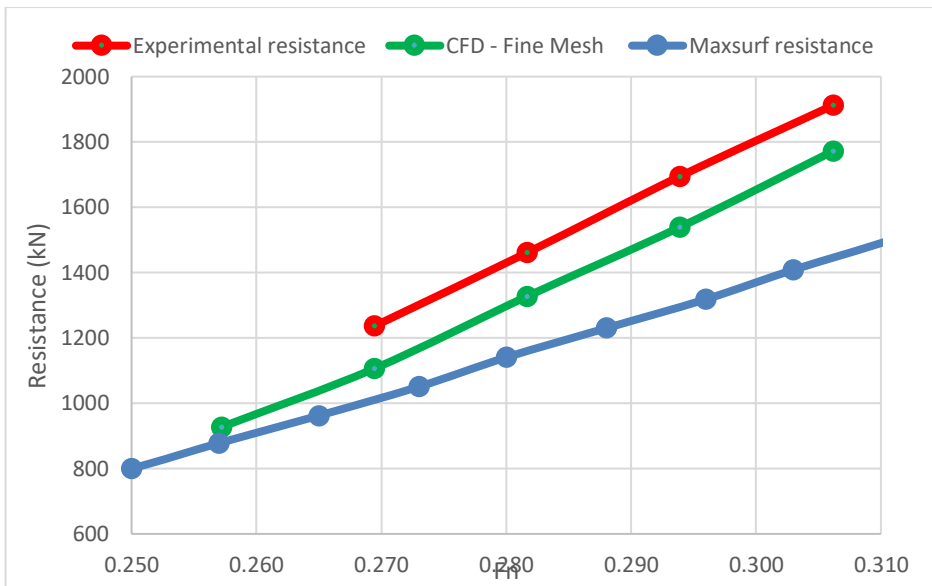
Tablica 9/Table 9: Vrijednost otpora CFD postupka za različitu gustoću mreže/The CFD calculated resistance for different mesh size

Brzina (kn)	21	22	23	24
Otpor $\phi 1$ (kN)	926.91	1105.94	1327.37	1539.44
Otpor $\phi 2$ (kN)	930.41	1109.82	1324.34	1551.61
Otpor $\phi 3$ (kN)	945.16	1146.17	1373.28	1601.63

Tablica 10/Table 10: Razlika otpora od eksperimenta/Difference from the experiment

V (kn)	F_n	CFD (gruba)	CFD (srednja)	CFD (fina)
22	0.269	11.11%	10.76%	7.54%
23	0.281	9.58%	9.81%	6.19%
24	0.293	9.62%	8.83%	5.66%

Osjetljivost rezultata obzirom na izbor turbulencijskog modela nije dodatno ispitivana. Razlike između izgrađenog SST (*Shear Stress Transport*) i raspoloživih EASTM (*Explicit Algebraic Stress Turbulence Model*) i KSKL (*K-square-root K-L*) ne bi trebale biti značajne za ovu primjenu [15].



Slika 5/Figure 5: Usporedba krivulja otpora RoPax (trup bez privjesaka)

5. Zaključci/Conclusions

Zaključno se može potvrditi da je predstavljena simulacijska CFD procedura za proračun otpora RoPax broda uspješno validirana. Izabrani parametri simulacije

dali su vrlo dobre rezultate. Odstupanja su u granicama od 5.6% do 7.5% u odnosu na eksperiment. Greške klasičnih proračuna otpora su dvostruko veće u području brzina od interesa za ovaj slučaj. Dodatno, krivulje otpora broda proračunate CFD metodom pokazuju korektan trend i slijede krivulju otpora dobivenu eksperimentom. Može se zaključiti da bi se rezultati dobiveni ovom procedurom mogli uspješno ekstrapolirati za veće brzine od 27 ili 28 kn. To je posebno bitno za razvoj novog vodomlaznog propulzijskog sustava koji bi bio efikasniji na većim brzinama. Zaključak je da se, u tom slučaju, validirana procedura se može dobro iskoristiti u simulacijama modificiranih formi novog projekta, a sličnog ovdje obrađenom RoPax brodu.

6. Zahvale/Acknowledgements

Ovaj rad je napravljen u sklopu projekta "Centar kompetencija za naprednu mobilnost" (CEKOM), projekt IRA 3 "Inovativno rješenje vodomlaznog propulzora". Broj ugovora: KK.01.2.2.03.002.

7. Literatura/References

- [1] Kim Sungeun Peter: „*CFD as a seakeeping tool for ship design*“, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Volume 3, Issue 1, March 2011.
- [2] Aksenov, Andrey; Pechenyuk, A.; Vucinic, Dean: „*Ship hull form design and optimization based on CFD*“, Towards Green Marine Technology and Transport, 2015.
- [3] Ozdemir, Yavuz Hakan; Barlas, Baris: „*Free surface flow simulation around an appended ship hull*“, Brodogradnja, 69, 3, 2018.
- [4] Niklas, K; Pruszko, H.: „*Full-scale CFD simulations for the determination of ship resistance as a rational, alternative method to towing tank experiments*“, Ocean Engineering, Volume 190, 15, 2019.
- [5] Deshpande, S; Sundsbø, P.; Das, S.: „*Ship resistance analysis using CFD simulations in Flow-3D*“, Int. Jnl. of Multiphysics, Volume 14, Number 3, 2020.
- [6] Van Nguyen, Trieu; Ibata, Satowa, He Ngo Van, Ikeda, Yoshiho: „*Effects of Turbulence Models on the CFD Results of Ship Resistance and Wake*“, Proceedings of JASNAOE Annual Autumn Meeting, 2017.
- [7] Ec a, Luis; Hoekstra, M.: „*On the Influence of the Iterative Error in the Numerical Uncertainty of Ship Viscous Flow Calculations*“, 26th Symposium on Naval Hydrodynamics, 17–22, 2006.
- [8] Celik, Ismail B. et. al: „*Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications*“, J. Fluids Eng., 130(7), 2008.
- [9] Andrun, Martina; Blagojević, Branko; Bašić, Josip: „*The Influence of Momentum Discretization Schemes in the Finite-Volume Method on the Wigley*

Hull Resistance“, Proceedings of the 23rd Symposium on Theory and Practice of Shipbuilding, Split, 51-59, 2018

[10] Andrun, Martina; Blagojević, Branko; Bašić, Josip: „*The influence of numerical parameters in the finite-volume method on the Wigley hull resistance*“, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M-Journal of Engineering for the Maritime Environment, 233 (2018).

[11] Perez, C.A.; Tan, G, M.; Wilson, P.A.: „*Validation and verification of hull resistance components using a commercial CFD code*“, University of Southampton, 2008.

[12] Hamid Sadat-Hosseini et al: "*CFD verification and validation of added resistance and motions of KVLCC2 with fixed and free surge in short and long head waves*", Ocean Engineering, 2013.

[13] Oberkampf, William L.; Trucano, Timothy G.: "*Verification and validation in computational fluid dynamics*", Progress in Aerospace Sciences 38, 2002.

[14] F. Stern, S. Bhushan, P. Carrica, and J. Yang: "*Large Scale Parallel Computing and Scalability Study for Surface Combatant Static Maneuver and Straight Ahead Conditions Using CFD*", Parallel Computational Fluid Dynamics: Recent Advances and Future Directions, 2009.

[15] Schot, Joost; Vaz, Guilherme; Toxopeus, Serge: "*A Verification and Validation Study of CFD Simulations for the Flow Around a Tug*", Conference: NuTTS, Wageningen, Netherlands 2017.

[16] RO-PAX FERRY: Calm water model tests, Final Report, MARIN, Wageningen, 2009.

[17] Andrun, Martina; Blagojević, Branko; Bašić, Josip; Klarin, Branko: "*Impact of CFD Simulation Parameters in Prediction of Ventilated Flow on a Surface-Piercing Hydrofoil*", Ship Technology Research - Schiffstechnik, 68 (2020).

[18] NUMECA Fine/Marine User Guide 2021.

[19] Deng, G.; Duvigneau, Régis; Queutey, Patrick; Visonneau, Michel: "*Assessment of turbulence models for ship flow at full scale*", Computational Mechanics, APCOM conference, Beijing, China, September 2004.