

# Numerička analiza vlastitog pogona broda za prijevoz rasutog tereta vjetrom potpomognutom propulzijom

---

Tomljenović, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:439004>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-02**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Ivan Tomljenović**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Nikola Vladimir, dipl. ing.

Student:

Ivan Tomljenović

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se Innu Gatinu na pruženoj pomoći prilikom izrade ovog rada kao i cijeloj ekipi firme In silico d.o.o. u sklopu koje je rad izrađen.

Isto tako zahvaljujem se svome mentoru izv. prof. dr. sc. Nikoli Vladimiru, dipl. ing. i asistentici dr. sc. Maji Perčić, mag. ing. na svojoj pruženoj pomoći prilikom izrade rada.

Zahvaljujem se roditeljima i prijateljima.

Ivan Tomljenović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 23 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Ivan Tomljenović** JMBAG: 0035215127

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Numerička analiza vlastitog pogona broda za prijevoz rasutog tereta s vjetrom potpomognutom propulzijom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Numerical analysis of self-propulsion of a bulk carrier with wind-assisted propulsion**

Opis zadatka:

Smanjenje emisija štetnih i stakleničkih plinova i smanjenje s njima povezane potrošnje goriva spadaju u važnije ciljeve brodovlasnika, brodograditelja, regulatornih agencija i ostalih dionika u pomorskom prometu. Jedan od načina kako bi se stariji brodovi mogli uklopiti u nove regulative koje su stupile na snagu početkom 2023. godine i koje propisuju relativno smanjenje emisija ugljikovog dioksida odnosno povećanje energetske učinkovitosti broda, je ugrađivanje jedara na palubu, kao alternativnog i dopunskog pogona. U tom slučaju, uz povoljnu silu u smjeru plovidbe, redovito se u trokutu sila aerodinamičkog profila jedra pojavljuje i manje povoljna bočna sila i ona uzrokuje zanošenje broda i promjenu strujanja fluida oko brodske trupa. U diplomskom radu potrebno je uz pomoć programskog paketa za računalnu dinamiku fluida numerički simulirati promjenu hidrodinamičkih karakteristika broda za rasuti teret prilikom zanošenja. Također, potrebno je ispitati utjecaj jedara na smanjenje potrebne snage koja se dovodi brodom vijku što je direktno povezano s potrošnjom goriva. Uz navedene rezultate računalnih simulacija, diplomski rad treba sadržavati kratak osvrt na trenutno važeće regulative u pomorskom prometu, opis korištenog matematičkog modela i programskog paketa, te pregled ulaznih podataka. Naposljetku, potrebno je dati osvrt na potencijalne uštede u potrošnji goriva, odnosno potencijalno smanjenje emisija korištenjem ovih inovativnih energetski učinkovitih tehnologija. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan: 28. rujna 2023. Datum predaje rada: 30. studenoga 2023. Predviđeni datum obrane: 4. – 8. prosinca 2023.

Zadatak zadao: Izv. prof. dr. sc. Nikola Vladimir Predsjednik Povjerenstva: Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	1
POPIS SLIKA .....	3
POPIS TABLICA.....	4
POPIS OZNAKA .....	5
SAŽETAK.....	7
SUMMARY .....	8
1. UVOD.....	9
2. PREGLED TRENUTNO VAŽEĆIH REGULATIVA U POMORSKOM PROMETU... 11	
3. OPIS KORIŠTENOG PROGRAMA I PREGLED ULAZNIH PODATAKA .....	14
4. MATEMATIČKI MODEL.....	16
4.1. Vremenski osrednjene Navier-Stokesove jednačbe .....	16
4.2. Model turbulencije .....	16
4.3. Zidne funkcije .....	17
4.4. Bezdimenzijske značajke .....	18
4.5. Validacija rezultata .....	19
5. PRIPREMA NUMERIČKIH SIMULACIJA .....	20
5.1. Dimenzije broda za rasuti teret .....	20
5.2. Diskretizacija i rubni uvjeti proračunske domene.....	20
5.3. Actuator disk model .....	23
5.4. Simulacije vlastitog pogona i otpora na mirnoj vodi .....	24
5.5. Dvofazno strujanje, VOF .....	26
5.6. Numerički rješavač i vremenski korak (eng. <i>Solver, Time step</i> ) .....	27
6. VALIDACIJA METODE.....	28
7. PROVEDBA SIMULACIJA I ANALIZA REZULTATA .....	30
7.1. Analiza otpora i momenta pri različitim kutovima zanošenja broda sa neotklonjenim kormilom.....	30

---

7.2. Analiza otpora i momenta pri različitim kutovima zanošenja broda bez kormila .....	33
7.3. Numeričke simulacije vlastitog pogona s otklonjenim kormilom .....	34
7.4. Numeričke simulacije sa otklonjenim kormilom, bez propulzije .....	35
7.5. Sile i momenti jedara .....	36
7.6. Procjena kuta zanošenja broda i otklona kormila .....	38
7.7. Simulacija vlastitog pogona s vjetrom potpomognutom propulzijom .....	39
7.8. Prednosti vjetrom potpomognute propulzije .....	40
8. ZAKLJUČAK .....	43
LITERATURA .....	44

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Primjer rješenja za vjetrom potpomognutu propulziju broda za rasuti teret [3].	9
Slika 2. Reakcijske aerodinamičke sile jedra uslijed strujanja bočnog vjetra.	10
Slika 3. Mjere za smanjenje brodskih emisija.	12
Slika 4. Bezdimezijski profil brzine [28].	17
Slika 5. Forma ispitanog trupa broda za rasuti teret.	20
Slika 6. Određivanje dimenzija domene.	21
Slika 7. Diskretizirana domena, uzdužni presjek broda.	22
Slika 8. Diskretizirana domena, poprečni presjek broda.	22
Slika 9. Granični sloj uz trup broda.	23
Slika 10. Skok tlaka na <i>Actuator disk-u</i> .	24
Slika 11. VOF metoda.	27
Slika 12. Slika valova pri zanošenju od 6 stupnjeva.	29
Slika 13. Slika valova pri zanošenju od 0 stupnjeva.	29
Slika 14. Ovisnost uzdužne sile o kutu zanošenja.	31
Slika 15. Ovisnost bočne sile o kutu zanošenja.	31
Slika 16. Ovisnost momenta o kutu zanošenja.	32
Slika 17. Dinamički tlak bez zanošenja broda.	32
Slika 18. Dinamički tlak sa kutom zanošenja broda od 5 stupnjeva.	33
Slika 19. Ovisnost ukupnog momenta o odklonu kormila.	35
Slika 20. Moguće pozicije jedara na palubi.	37
Slika 21. Sile i momenti koje djeluju na brod prilikom vjetrom potpomognute propulzije.	40
Slika 22. Polje valova u simulaciji s vjetrom potpomognutom propulzijom.	42
Slika 23. Polje valova u simulaciji s konvencionalnom propulzijom.	42



---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Dimenzije broda .....	20
Tablica 2. Dimenzije proračunske domene .....	21
Tablica 3. Koeficijenti određeni pokusom slobodne vožnje brodskog vijka. ....	25
Tablica 4. Rezultati bočnih sila $F_y$ na brod pri različitim kutovima zanošenja.....	28
Tablica 5. Sile i momenti pri tri kuta zanošenja trupa broda. ....	30
Tablica 6. Razlike sila i momenta u ovisnosti o zanošenju simulacija sa i bez kormila.....	33
Tablica 7. Rezultati simulacija sa propulzijom i otklonjenim kormilom. ....	34
Tablica 8. Usporedba momenata simulacija sa i bez propulzije .....	36
Tablica 9. Bočne sile i momenti jedara po pozicijama i broju jedara. ....	37
Tablica 10. Ukupni moment jedara i trupa po kutovima zanošenja broda.....	38
Tablica 11. Postavke simulacije. ....	39
Tablica 12. Izračunati momenti u simulaciji vjetrom potpomognute propulzije. ....	39
Tablica 13. Usporedba karakteristika vjetrom potpomognutog i konvencionalnog pogona....	41

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$A_x$	$m^2$	površina kruga kojeg opisuje brodski vijak
$B$	m	širina broda
$C^+$	-	integracijska konstanta
$c$	-	konstanta
$D$	m	promjer broskog vijka
$EXP$	-	eksperimentalni rezultati
$Fr$	-	Froudeov broj
$F_x$	N	sila u smjeru osi x
$F_y$	N	sila u smjeru osi y
$F_R$	N	rezultantna sila
$F_t$	N	otpor broda
$g$	$m/s^2$	gravitacijska konstanta
$J$	-	koeficijent napredovanja broskog vijka
$K_T$	-	koeficijent poriva broskog vijka
$K_Q$	-	koeficijent momenta broskog vijka
$L_{WL}$	m	duljina vodne linije
$L_{OA}$	m	duljina broda preko svega
$L_{pp}$	m	duljina broda između okomica
$LCG$	m	uzdužni položaj težišta
$M_z$	Nm	moment oko vertikalne osi u težištu broda
$M_r$	Nm	ukupni moment, zbroj momenta kormila i trupa broda
$n$	$^\circ/\text{min}$	broj okretaja
$p$	Pa	tlak
$P_Q$	W	snaga dovedena broskom vijku
$Q$	Nm	okretni moment
$RDF$	-	računalna dinamika fluida
$Re$	-	Reynoldsov broj
$RD$	%	postotna razlika rezultata
$r$	m	radijus broskog vijka
$t$	s	vrijeme
$T_1$	m	gaz
$T_2$	s	omjer duljine i brzine broda
$T$	N	poriv
$u^+$	-	bezdimenzijska brzina
$v_j$	m/s	brzina
$VCG$	m	položaj težišta po visini
$V_a$	m/s	brzina nastrujavanja fluida na brodski vijak

---

$VOF$	-	volume of fluid metoda
$x_j$	m	koordinatne osi
$y^+$	-	bezdimenzijska udaljenost od stijenke
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća
$\mu$	Pa s	koeficijent dinamičke viskoznosti
$\nu$	m <sup>2</sup> /s	koeficijent kinematičke viskoznosti
$\Delta$	kg	masa istisnine

---

**SAŽETAK**

U ovom diplomskom radu provedeno je numeričko istraživanje utjecaja vjetrom potpomognute propulzije broda za rasuti teret na njegove hidrodinamičke i propulzijske karakteristike. Problem je simuliran pomoću računalne dinamike fluida u računalnom paketu OpenFOAM. Matematički model temeljen je na Reynoldsovima osrednjenim Navier-Stokesovim jednadžbama dok je za model turbulencije korišten  $k-\omega$  SST model. Rezultati simulacija zanošenja broda uspoređeni su s eksperimentalnim podacima dostupnim u literaturi. Razrađena je metoda procjene potrebnog otklona kormila i kuta zanošenja broda prilikom plovidbe potpomognute vjetrom pri brzini od 12,5 čvorova. Nadalje, provedene su simulacije vlastitog pogona kako bi se dobio bolji uvid u iznose sila i momenata koje djeluju na brod, pri čemu je brodski vijak idealiziran tzv. modelom *Actuator disk*. Analizirane su sile i momenti koje djeluju na brod sa i bez vlastitog pogona te je dan osvrt na učinak vlastitog pogona prilikom određivanja sila i momenata. Isto tako analiziran je utjecaj uključivanja neotklonjenog kormila na hidrodinamičke značajke te je dana usporedba sa simulacijama bez prisutnosti kormila. Naposljetku, analiziran je vlastiti pogon broda u realnim uvjetima plovidbe s vjetrom potpomognutom propulzijom s ciljem izračuna dovedene snage brodom vijku što je direktno povezano s potrošnjom goriva. Utvrđeno je kako jedra generiraju veliku bočnu silu na brod što uzrokuje njegovo zanošenje i promjenu simetričnog opstrujavanja fluida oko trupa uzrokujući zakretanje broda u vjetar. Zakretanje je potrebno ispraviti otklonom kormila dok će spomenuto zanošenje i otklon kormila utjecati na povećanje otpora broda. Ipak, pokazano je kako će se uz određeno povećanje hidrodinamičkog otpora ostvariti značajne uštede u snazi dovedenoj brodom vijku.

Ključne riječi: brod za rasuti teret, RDF – Računalna dinamika fluida, Navier-Stokesove jednadžbe,  $k-\omega$  SST model turbulencije, *Actuator disk*, vjetrom potpomognuta propulzija, zanošenje, otklon kormila, hidrodinamika.

---

**SUMMARY**

This thesis involved a numerical study of the impact of wind-assisted propulsion on the hydrodynamic and propulsion characteristics of a bulk carrier. The problem was simulated using computational fluid dynamics by means of the OpenFOAM software package. The mathematical model was based on the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations, and the  $k-\omega$  SST turbulence model was used. Ship heeling simulations were validated against available experimental data from the literature. A method for estimating the required rudder deflection and ship drift angle during wind-assisted sailing at a speed of 12.5 knots was developed. Furthermore, self-propulsion simulations were conducted to obtain more realistic values of the forces and moments acting on the ship, with the propeller being modeled as an Actuator disk. The forces and moments acting on the ship with and without self-propulsion were analyzed, and a discussion on the use of self-propulsion in determining these forces and moments was provided. The influence of incorporating an un-deflected rudder on the hydrodynamic characteristics was also analyzed, and a comparison was made with simulations without the presence of the rudder. Finally, the self-propulsion of the ship under real wind-assisted propulsion conditions was analyzed to calculate the delivered power to the ship's propeller, which is directly related to fuel consumption. It was demonstrated that sails generate a significant lateral force on the ship, causing it to drift and altering the symmetric flow of fluid around the hull, resulting in the ship yawing into the wind. The veering needs to be corrected by rudder deflection, which in turn affects an increase in the ship's resistance. Nevertheless, it was shown that significant fuel savings can still be achieved despite a substantial increase in hydrodynamic resistance.

Keywords: bulk carrier, CFD – Computational Fluid Dynamics, Navier-Stokes equations,  $k-\omega$  SST turbulence model, Actuator disk, wind-assisted propulsion, yawing, rudder deflection, hydrodynamics.

## 1. UVOD

Brodski prijevoz čini polovinu svjetskog prijevoza robe prvenstveno zbog mogućnosti prijevoza velikih količina robe odjednom što dovodi do relativno manjih troškova po jedinici prevezenog tereta [1]. Globalizacijom društva sve je veća potreba za brodskim prijevozom te danas flota za prijevoz tereta uključuje oko 55 000 brodova [2]. Gotovo svi brodovi plove na fosilna goriva koja izgaranjem rezultiraju stakleničkim plinovima zbog čega su donesene regulative u pomorskom prometu koje nalažu njihovo smanjenje. Kako bi izbjegli zabranu plovidbe u određenim plovnim područjima, brodovlasnici se odlučuju na razne poteze za smanjenje potrošnje goriva a posljedično i ispuštanje stakleničkih plinova. Jedna od takvih metoda je vjetrom potpomognuta propulzija kod koje se iskorištava snagu vjetra za poriv.

Ovaj diplomski rad izrađen je u suradnji s tvrtkama In silico d.o.o. i francuskom tvrtkom Computed Wing Sail koja se bavi inovativnim rješenjima za vjetrom potpomognutu propulziju. Ideja se zasniva na ugradnji vertikalnih jedara na palubu broda. Kao što se vidi na Slici 1, jedra su kruta i aerodinamičkog profila te su vrlo slična zrakoplovnim krilima.



**Slika 1. Primjer tehničkog rješenja za vjetrom potpomognutu propulziju broda za rasuti teret [3].**

Slika 2 prikazuje kako se postavljanjem jedara na palubu postiže povoljna sila u smjeru plovidbe ali i nepovoljna bočna sila kao produkt trokuta aerodinamičkih sila, koje djeluju na jedra.



**Slika 2. Reakcijske aerodinamičke sile jedra uslijed strujanja bočnog vjetra.**

Upravo ta bočna sila uzrokuje zanošenje broda što za posljedicu ima promjenu simetričnog strujanja fluida oko trupa broda. Promjena strujanja utjecati će na hidrodinamičke sile koje će tada zakretati brod u vjetar [4]. Zakretanje broda potrebno je kompenzirati otklonom kormila koje ne smije biti otklonjeno više od 15 stupnjeva kako bi se ostavilo dovoljno manevarskog prostora u slučaju izvanrednih situacija. U računalnom programu *Microsoft Excel* napravljen je model za odabir optimalnog broja jedara koja će ostvarivati maksimalan poriv pazeći pritom da bočna sila koju uzrokuju jedra ne generira preveliki hidrodinamički moment zakretanja koji kormilo neće moći kompenzirati otklonom do 15 stupnjeva. Aerodinamički dio istraživanja provela je tvrtka *Computed Wing Sail*, koja je za potrebe ovog rada ustupila iznose sila koje ostvaruju jedra kao ulazne podatke za istraživanje hidrodinamičkih karakteristika. Kako je projektna brzina plovidbe 12,5 čvorova, ista brzina je i ispitana u ovom radu. Analizirane su sile i momenti koje djeluju na brod sa i bez vlastitog pogona gdje je brodski vijak idealiziran modelom *Actuator disk*-a. Pokazano je da prisustvo kormila u simulacijama značajno utječe na izračunate hidrodinamičke sile i momente.

Računalna dinamika fluida vrlo je pogodna za ispitivanje ovakvih problema jer omogućuje brza i precizna ispitivanja u ranoj fazi razvoja strategije te brodo vlasniku daje odgovor na pitanje hoće li se odlučiti za uštede goriva i smanjenje stakleničkih plinova vjetrom potpomognutom propulzijom.

## 2. PREGLED TRENUTNO VAŽEĆIH REGULATIVA U POMORSKOM PROMETU

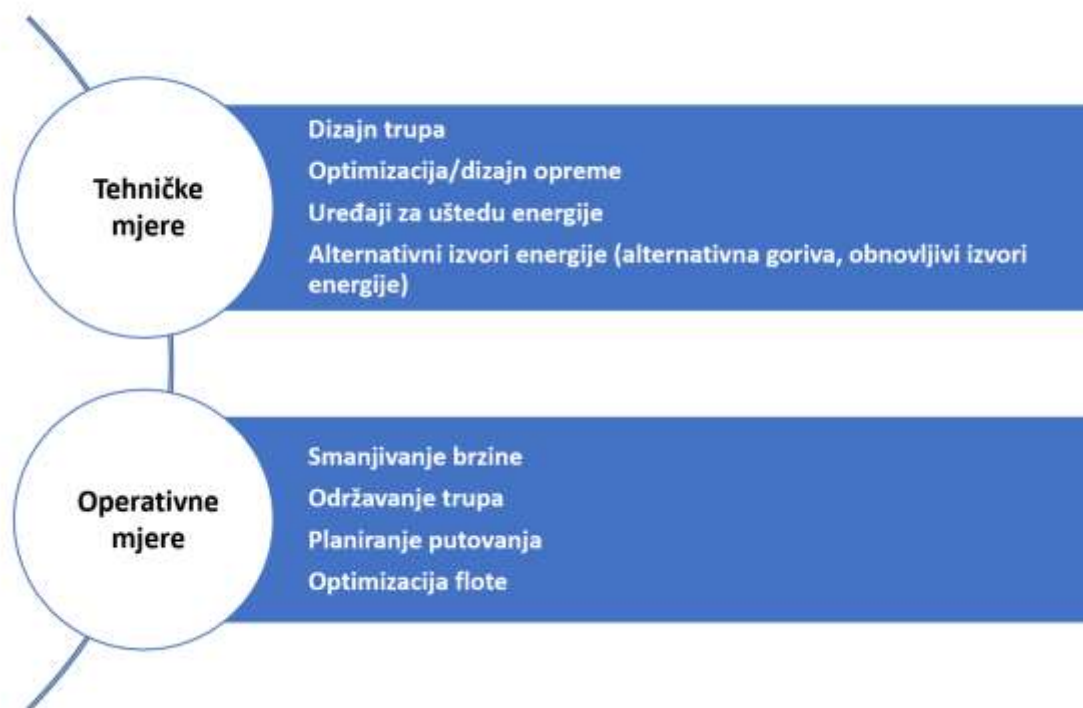
Prekomjerna upotreba fosilnog goriva najveći je izvor atmosferskog onečišćenja [5]. Emisije nastale izgaranjem fosilnog goriva odnose se na štetne emisije poput dušikovih oksida (NO<sub>x</sub>), sumporovih oksida (SO<sub>x</sub>), ugljikovog monoksida (CO), lebdećih čestica, ali i stakleničkih plinova (emisije ugljikovog dioksida (CO<sub>2</sub>) kao glavnog stakleničkog plina, metana (CH<sub>4</sub>), didušikovog oksida (N<sub>2</sub>O) te fluoriranih plinova [6]. Spomenuti plinovi uzrokuju efekt staklenika te njihova povećana koncentracija u atmosferi rezultira globalnim zagrijavanjem. Upravo zato glavni cilj Pariškog sporazuma o klimatskim promjenama je smanjenje stakleničkih plinova u svakoj grani gospodarstva pa tako i u pomorskom sektoru [7].

Ispušni plinovi iz brodskih motora štetno djeluju na ljudsko zdravlje i okoliš, a njihov negativan utjecaj je izraženiji kod brodova koji prometuju u blizini naseljenih područja, poput brodova u priobalnoj i unutarnjoj plovidbi [8], [9], [10], [11], [12]. S ciljem smanjenja onečišćenja s brodova, Međunarodna pomorska organizacija (eng. *International Maritime Organization*, IMO) donijela je niz regulativa. Jedna od njih je uspostava Područja kontrole emisija (eng. *Emission Control Area*, ECA) u kojima su zahtjevi za NO<sub>x</sub> i SO<sub>x</sub> emisijama stroži nego drugdje [13]. SO<sub>x</sub> emisije ograničene su s dopuštenim sadržajem sumpora u gorivu, dok se NO<sub>x</sub> emisije ograničavaju ovisno o maksimalnoj radnoj brzini motora [14]. Trenutno postoje četiri ECA zone (Baltičko more, Sjeverno more, Karipsko more (obala Sjedinjenih Američkih Država (SAD)) te obalne vode Sjeverne Amerike (Kanada i SAD (uključujući Havaje)) [15], [16], a od 2025. godine, Sredozemno more postat će 5. ECA (SO<sub>x</sub> ECA) zona te će svi brodovi koji prometuju tim područjem trebati zadovoljiti stroge zahtjeve glede SO<sub>x</sub> emisija [17].

Ograničavanje brodskih CO<sub>2</sub> emisija uključeno je u regulativu energetske učinkovitosti iz 2011. godine, prema kojoj svi brodovi bruto tonaže veće od 400 tona koji sudjeluju u međunarodnoj plovidbi trebaju imati Međunarodni certifikat energetske učinkovitosti. Kako bi ga dobili, moraju zadovoljavati zahtjeve Projektnog indeksa energetske učinkovitosti (eng. *Energy Efficiency Design Index*, EEDI) i posjedovati Brodski plan upravljanja energetske učinkovitošću (eng. *Ship Energy Efficiency Management Plan*, SEEMP). SEEMP je operativna mjera za poboljšanje energetske učinkovitosti brodova, a EEDI predstavlja tehničku mjeru energetske učinkovitosti i izražava se kao omjer emisije CO<sub>2</sub> i gospodarskog učinka broda (koristi za društvo). EEDI se treba izračunati za svaki novi brod, a njegova vrijednost treba biti niža ili jednaka zahtijevanom EEDI-u [18]. Kako bi se regulativa proširila i na postojeće brodove, od 2023. godine na snagu je stupio Indeks energetske učinkovitosti postojećeg broda



(eng. *Energy Efficiency Existing Ship Index*, EEXI) te Indikator intenziteta ugljika (eng. *Carbon Intensity Indicator*, CII). Dok se EEXI odnosi na tehničku mjeru energetske učinkovitosti kao EEDI, CII predstavlja operativnu mjeru energetske učinkovitosti i potrebno ju je ugraditi u SEEMP [19]. Povećanje energetske učinkovitosti brodova te smanjenje njihovih emisija može se postići primjenom određenih tehničkih i operativnih mjera, Slika 3. Sve mjere odnose se na smanjenje potrošnje goriva koje za posljedicu imaju manje emisije [20].



**Slika 3. Mjere za smanjenje brodskih emisija.**

Tehničke mjere odnose se na fazu projektiranja broda tijekom koje se može utjecati na dizajn i optimizaciju trupa, opreme i energetskog sustava. Tehnička mjera koja rezultira najvećim smanjenjem emisija stakleničkih plinova je zamjena konvencionalnog fosilnog goriva alternativnim gorivom, s nižim ili nultim sadržajem ugljika [21]. Operativne mjere se odnose na eksploataciju broda, a najistaknutija je dobrovoljno smanjenje brzine ispod projektne brzine [22]. IMO je donijela dekarbonizacijsku strategiju prema kojoj brodovi koji plove u međunarodnoj plovidbi moraju smanjiti barem 50% svojih godišnjih emisija stakleničkih plinova do 2050. godine, u usporedbi s razinama iz 2008. godine. Kako bi se postigao taj cilj, strategija je naznačila mjere sa sljedećim rokovima: kratkoročne (2018.-2023.), srednjoročne (2023.-2030.) i dugoročne (2030.-) mjere [23]. Kratkoročne mjere predstavljaju početak smanjenja brodskih emisija pomoću nacionalnih planova, strožim EEDI-om i SEEMP-om, smanjenjem brzine itd. Srednjoročne mjere obuhvaćaju primjenu EEXI-a i CII-a, plan za

primjenu niskougličnih goriva te tržišnu mjeru uvođenje dozvole za emitiranje jedne tone CO<sub>2</sub> u atmosferu [24]. Takvo oporezivanje brodova na snagu stupa od 2024. godine, pri čemu će komercijalni teretni i putnički brodovi bruto tonaže iznad 5000 tona koji plove u Europskoj uniji morati kupiti dozvole za svaku tonu ispuštene emisije CO<sub>2</sub> [24]. Dugoročna mjera smanjenja stakleničkih plinova je primjena inovativnih tehnologija i goriva s nultom razinom emisija ugljikovog dioksida čija bi primjena mogla dovesti do krajnjeg cilja strategije, tj. potpune dekarbonizacije do kraja stoljeća. Jedna od inovativnih mjera za smanjenje utjecaja broda na okoliš je ugradnja jedara na palubu, koja se razmatra u ovom diplomskom radu.

### 3. OPIS KORIŠTENOG PROGRAMA I PREGLED ULAZNIH PODATAKA

Za provođenje numeričkih simulacija korišten je računalni program OpenFOAM koji je danas vrlo zastupljen, kako u akademskoj zajednici, tako i u industriji. To je računalni paket za simuliranje dinamike fluida s kodom otvorenog tipa (eng. *open source*) što korisnicima omogućuje njegovu prilagodbu specifičnim problemima. Upravo zato se često koristi u akademske svrhe gdje se proučavaju specifični problemi dinamike fluida.

Tvrtka In silico d.o.o. usavršila je kroz osam godina svoj vlastiti CFD (eng. *Computational Fluid Dynamics*) program kroz akademske i industrijske projekte. Program se zove *Naval Hydro Pack* te je specijaliziran za probleme brodske hidrodinamike i predstavlja nadogradnju računalnog paketa OpenFOAM te nema korisničko sučelje već se postavke zadaju putem raznih skripti u koje se ručno unose željene postavke simulacija. Prije provođenja simulacije potrebno je pripremiti ulazne podatke koji se unose u skripte. Krećemo od skripte pod nazivom *clientInfo* u koju se zapisuju osnovni podatci o projektu poput firme naručitelja i tipa plovila. Nadalje, u skriptu *shipParticulars* unose se dimenzije broda i bira se hoće li se u simulacijama koristiti simetrija. Simetrija se u simulacijama brodske hidrodinamike često koristi zato što su trup i strujanje fluida najčešće simetrični te se može koristiti samo polovica domene u proračunima, u cilju uštede proračunskog vremena. Karakteristike broda poput mase istisnine, gaza, brzine plovidbe i položaja težišta unose se u zasebnu skriptu *loadConditions*. Nakon što se zadaju osnovni podatci broda potrebno je diskretizirati domenu. Diskretizacija se vrši podešavanjem vrijednosti u skripti *meshDict* gdje se bira maksimalna veličina ćelije domene te se zasebno za svaku površinu broda diskretizira granični sloj odabirom broja ćelija u graničnom sloju i razini profinjenja od 1 – 10 gdje vrijednost 1 na površinu postavlja najveću prvu ćeliju. Diskretizacija domene obavlja se besplatnom verzijom programa CF - MESH. Isto tako, mogu se zadati dodatna profinjenja domene a ono što je korisno u ovakvim simulacijama je profinjenje slobodne površine za koju se postavlja željena debljina i razina profinjenja. Treba pripaziti u kojem mediju ispitanu brod plovi stoga se u skripti *waterProperties* odabire gustoća i viskoznost morske ili slatke vode. Sam program je uvelike automatiziran te se u skripti *reportSettings* odabiru izračunati podatci iz simulacije koje se želi uvrstiti u izvješće automatski generirano po završetku simulacije. Moguće je i generirati slike poput raspodjele tlaka po trupu broda i slike valova iz nekoliko različitih kutova. Slike se generiraju po završetku simulacije uz pomoć besplatnog programa paraView u kojem se prema želji mogu obraditi i dodatne vizualizacije koje automatska funkcija programa ne pruža. Potrebno je još zadati postavke simulacije u

skripti *simulationSettings* gdje se odabire na kolikom broju procesora će se simulacija provoditi te vrijeme trajanja i vremenski korak simulacije.

Jednadžba kontinuiteta i Navier Stokes-ove jednadžbe diskretizirane su kontrolnim volumenima te opisuju dvofazno, nestlačivo, turbulentno i viskozno strujanje fluida. Kako bi se izbjegla refleksija valova od rubova proračunske domene implementirane su relaksacijske zone uz rubove domene u kojima se valovi apsorbiraju te ne interferiraju s granicama domene. Rubne uvjete moguće je zadati za pojedinu granicu sustava kao i za pojedine dijelove analiziranoga plovila. Dopuštena su dva stupnja slobode, to jest poniranje i posrtanje dok je gibanje broda uslijed djelovanja valova opisano jednadžbama za gibanje krutog tijela [25]. U simulacijama vlastitog pogona najčešće se koristi *Actuator disk* koji predstavlja brodski vijak s beskonačno mnogo krila te uzrokuje nagli porast tlaka na lokaciji samog vijka u simulacijama. U suradnji s francuskom tvrtkom Computed WIng Sail analiziran je problem hidrodinamike kod vjetrom potpomognute propulzije broda za rasuti teret. Brodu za rasuti teret jednostavnije je ugraditi jedra na palubu jer sav teret prevozi u unutrašnjosti što palubu ostavlja slobodnom. Isto tako flota brodova za rasuti teret poprilično je velika a sličnost njihovih trupova osigurava primjenjivost rezultata iz ovoga rada na mnoge druge brodove bez dodatnih proračuna. Tvrtka Computed Wing Sail za analizu je preporučila relativno nepovoljne uvjete plovidbe za koje je procijenjena najveća bočna sila uz najmanji poriv jedara prilikom plovidbom projektnom brzinom broda od 12,5 čvorova.

## 4. MATEMATIČKI MODEL

### 4.1. Vremenski osrednjene Navier-Stokesove jednadžbe

Vremenski osrednjene Navier – Stokesove jednadžbe poznate i kao Reynoldsove osrednjene Navier – Stokesove jednadžbe (eng. *RANSE*), primjenjuju se u računalnoj dinamici fluida kako bi se opisalo viskozno strujanje fluida. One su fizikalni izrazi koji opisuju zakon očuvanja mase i zakon očuvanja količine gibanja fluida. Vremenski se osrednjuju radi pojednostavljenja proračuna kao i zbog primjene osrednjenih vrijednosti u inženjerskoj praksi a jednadžbe se formuliraju na sljedeći način [26]:

$$\frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

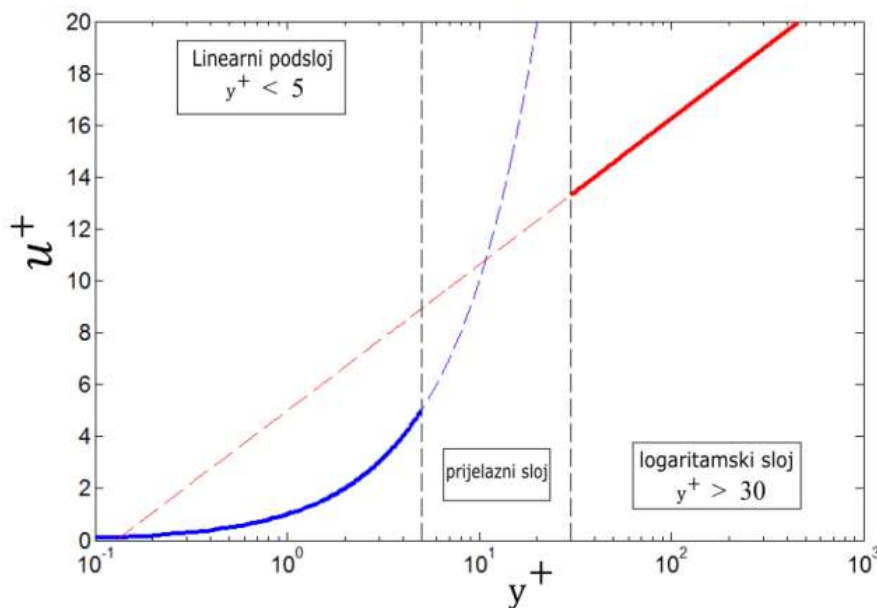
$$\rho \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{v}_j \bar{v}_i) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho v'_i v'_j} \right] \quad (2)$$

$v_i$  predstavlja komponente brzine,  $p$  je tlak,  $\rho$  označava gustoću fluida, a  $\mu$  predstavlja dinamički koeficijent viskoznosti. Element  $\overline{\rho v'_i v'_j}$  predstavlja tenzor Reynoldsovih naprezanja koji dodaje nove nepoznanice u sustav jednadžbi. Tenzor Reynoldsovih naprezanja opisuje pulsirajuće strujanje a kako imamo više nepoznanica nego jednadžbi sustav jednadžbi nije zatvoren. Sustav se dopunjuje dodatnim jednadžbama za modeliranje turbulencije, pri čemu je u ovom radu korišten  $k - \omega$  SST (*Shear Stress Transport*) model turbulencije, koji pruža učinkovita rješenja za linearni i logaritamski podsloj graničnog sloja.

### 4.2. Model turbulencije

U numeričkim simulacijama koristi se  $k - \omega$  SST model turbulencije, koji se sastoji od dva modela, to su  $k - \varepsilon$  i  $k - \omega$  modeli turbulencije [27]. Na područjima niskih lokalnih vrijednosti Reynoldsova broja, što predstavlja linearni podsloj graničnog sloja, primjenjuje se  $k - \omega$  model turbulencije. S druge strane,  $k - \varepsilon$  model turbulencije koristi se u područjima s visokim vrijednostima Reynoldsovih brojeva što je izvan graničnog sloja. Iz tih razloga je  $k - \omega$  SST model turbulencije pogodan je za primjenu u logaritamskom i linearnom podsloju bezdimenzijskog profila brzina na stijenci. Tako se ovisno o simuliranom problemu može

odlučiti hoće li se prva ćelija na stijenci postavljati u linearni ili logaritamski sloj. Slika 4 prikazuje ovisnost bezdimenzijske brzine ( $u^+$ ) o udaljenosti od stijenke ( $y^+$ ) [27].



Slika 4. Bezdimezijski profil brzine [28].

### 4.3. Zidne funkcije

Kada se za opisivanje strujanja u graničnom sloju koristi model turbulencije tada je potrebno definirati područje njegove primjene. To je bitno iz razloga što se u svakom podsloju graničnog sloja bezdimenzijska brzina računa na različiti način. Na Slici 4 uočavamo podjelu slojeva od stijenke prema području izvan graničnog sloja, razlikujući linearni, prijelazni i logaritamski podsloj. U svim provedenim simulacijama postavljeno je da vrijedi  $y^+ > 30$ , što postavlja prvu ćeliju u logaritamski sloj, gdje je bezdimenzijska brzina definirana kao [29]:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + C^+ \quad (3)$$

Simbol  $\kappa$  predstavlja eksperimentalno dobivenu von Karmanovu konstantu, dok je  $C^+$  konstanta integracije. Bezdimezijska udaljenost od stijenke označena je kao  $y^+$ .

#### 4.4. Bezdimenzijske značajke

U brodskoj hidrodinamici često se koriste bezdimenzijske značajke poput Reynoldsovog i Froudeovog broja. Reynoldsov broj predstavlja omjer inercijskih i viskoznih sila i te se u brodskoj hidrodinamici izračunava kao [30]:

$$Re = \frac{v L_{WL}}{\nu} \quad (3)$$

gdje je  $L_{WL}$  duljina vodne linije broda,  $v$  je brzina broda a  $\nu$  kinematički koeficijent viskoznosti fluida.

Reynoldsov broj važan je u određivanju tipa strujanja, odnosno utvrđivanju je li strujanje laminarno ili turbulentno. Kritičnu vrijednost Reynoldsovog broja, pri kojoj laminarno strujanje prelazi u turbulentno teško je odrediti te je važno istaknuti da je mehanizam prijelaza iz laminarnog u turbulentno strujanje izrazito složen, što znači da točna točka prijelaza nije egzaktno određiva.

Froudeov broj, s druge strane, predstavlja omjer inercijske i gravitacijske sile, a u brodskoj hidrodinamici se često izražava na sljedeći način [30]:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g L_{WL}}} \quad (4)$$

$g$  je gravitacijska konstanta a  $v$  brzina plovidbe broda.

Froudeov broj određuje vrstu plovila prema režimu u kojemu plovi. Taj režim određuje se prema udjelu inercijskih i gravitacijskih sila na trup broda te se tako prema iznosu Froudeovog broja plovila dijele na:

- $Fr < 1$       Deplasmanske
- $1 < Fr < 3$     Poludeplasmanske
- $Fr > 3$       Glisirajuće

#### 4.5. Validacija rezultata

Rezultati proračuna zanošenja broda u ovom numeričkom istraživanju uspoređeni su s eksperimentalnim rezultatima dostupnim u literaturi [31]. Relativna odstupanja numeričkih rezultata u odnosu na eksperimentalne izračunata su kao:

$$RD = \frac{\Phi_{RDF} - \Phi_{EXP}}{\Phi_{EXP}} \cdot 100\% \quad (9)$$

$RD$  označava relativno postotno odstupanje, gdje je  $\Phi_{RDF}$  rezultat dobiven numeričkom simulacijom, dok je  $\Phi_{EXP}$  eksperimentalno dobiven rezultat.



## 5. PRIPREMA NUMERIČKIH SIMULACIJA

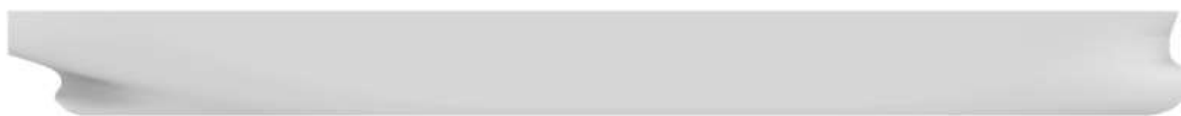
### 5.1. Dimenzije broda za rasuti teret

Odabir broda za numeričku analizu prepušten je firmi Computed Wing Sail koja je procijenila kako su brodovi za prijevoz rasutog tereta veoma povoljni za ugradnju jedara na palubu. Isto tako, flota brodova za prijevoz rasutog tereta je dovoljno velika a forme i dimenzije brodova su slične što omogućuje primjenu ovoga istraživanja na slične forme. Odabrani brod spada u kategoriju *Supramax* te su njegove dimenzije i specifikacije dane u Tablici 1.

Tablica 1. Dimenzije broda

Duljina preko svega, $L_{OA}$	230 m
Širina trupa, $B$	33 m
Gaz, $T_I$	14,6 m
Duljina između okomica, $L_{PP}$	225 m
Masa istisnine, $\Delta$	92 807 582 kg
Vertikalni položaj težišta, $VCG$	10 m
Uzdužni položaj težišta, $LCG$	118,37 m

Na Slici 5 prikazana je forma analiziranog broda.



Slika 5. Forma ispitanog trupa broda za rasuti teret.

### 5.2. Diskretizacija i rubni uvjeti proračunske domene

Kako bi se kvalitetno zabilježile hidrodinamičke karakteristike, slike valova te izbjegla refleksija valova od rubova domene potrebno je odabrati dovoljno veliku domenu [32]. Za određivanje dimenzija proračunske domene korištene su *in house* veličine koje se koriste pri

svim standardnim simulacijama provedenim u firmi te iskustveno daju pouzdane rezultate.

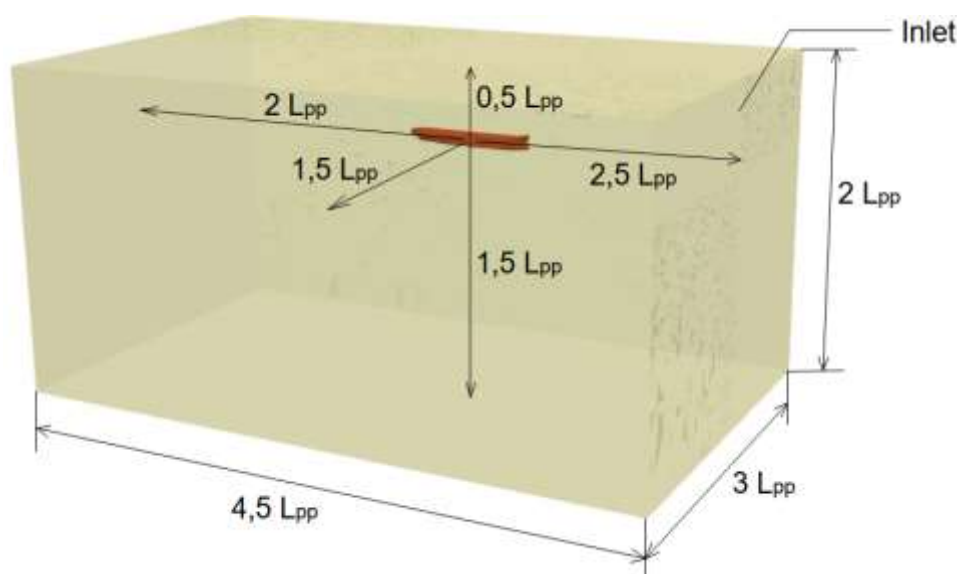
Domena je dimenzionirana prema sljedećim iskustvenim izrazima prikazanim u Tablici 2.

**Tablica 2. Dimenzije proračunske domene**

Granice proračunske domene	Udaljenost od broda
Vrh	$0,5 L_{PP}$
Dno	$1,5 L_{PP}$
Ulaz	$2,5 L_{PP}$
Izlaz	$2,0 L_{PP}$
Bočno	$1,5 L_{PP}$

Odabranim dimenzijama domene osigurano je da domena sadrži optimalan broj ćelija kako vrijeme trajanja simulacija ne bi bilo predugačko.

Na rubovima proračunske domene potrebno je još zadati rubne uvjete. U ovome radu korišteni su sljedeći rubni uvjeti. Na ulazu, izlazu, dnu i bočnim granicama domene postavljen je rubni uvjet konstantne brzine i *zeroGradient* za polje tlaka koji preslikava vrijednost iz rubnih kontrolnih volumena na granicu sustava. Trup broda opisan je rubnim uvjetom *wall* koji ne dopušta maseni transport kroz njegove granice dok za brzinu koristi fiksnu vrijednost 0 a polje tlaka opisuje kao *zeroGradient*. Vrh proračunske domene koristi rubne uvjete atmosfere oponašajući stvarnu atmosferu.



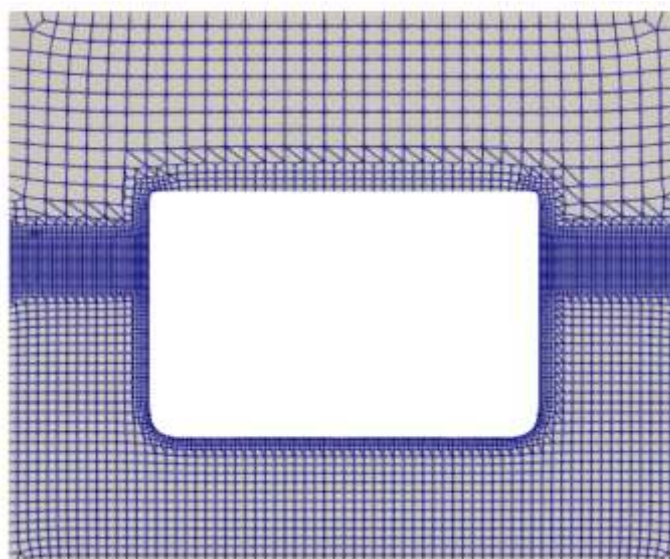
**Slika 6. Određivanje dimenzija domene.**

Prilikom diskretizacije domene potrebno je pažljivo odabrati dijelovi koji se finije a koji grublje diskretiziraju. Naime, mjesta na kojima se očekuju brze promjene fizikalnih veličina potrebno je finije diskretizirati kako bi se kvalitetno zabilježila njihova promjena što će nepovoljno utjecati na računalnu zahtjevnost simulacije. Stoga je poželjno područja domene gdje se ne očekuju nagle promjene fizikalnih veličina grublje diskretizirati te u konačnici imati razuman broj ćelija i vrijeme trajanja simulacije. Kao što prikazuje Slika 7, zbog razmatranja hidrodinamičkih karakteristika kao i većeg Reynoldsovog broja voda je finije diskretizirana nego zrak.



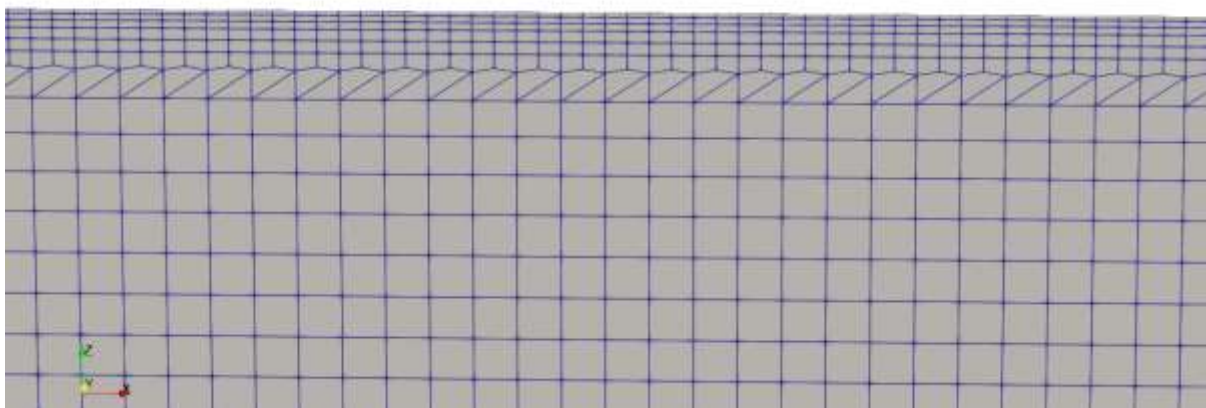
**Slika 7. Diskretizirana domena, uzdužni presjek broda.**

Uz trup broda razvija se granični sloj u kojem zapažamo gradijent brzine stoga se granični sloj dodatno diskretizira. Slika 8 prikazuje područje uz trup broda te njegovu finiju diskretizaciju u odnosu na ostatak fluida. Na sam trup broda postavljena je veličina prve ćelija čije se središte nalazi u logaritamskom sloju. Na slobodnoj površini očekuju se valovi stoga je slobodna površina finije diskretizirana kako bi se zabilježila kvalitetna slika valova.



**Slika 8. Diskretizirana domena, poprečni presjek broda.**

Slika 9 pobliže prikazuje granični sloj uz trup broda. Trup broda nalazi se na gornjoj stani slike gdje je mreža finije diskretizirana. Isto tako osiguran je postupan rast veličine ćelija od trupa prema fluidu zbog kvalitetnog bilježenja fizikalnih promjena koje se odvijaju u blizini stijenke.



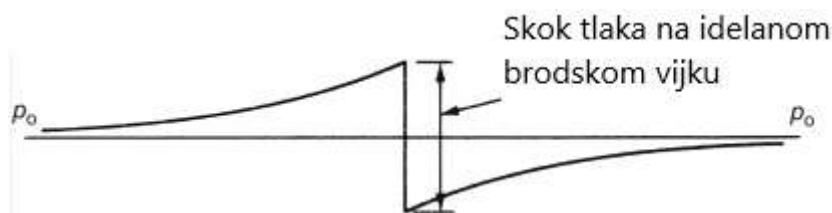
**Slika 9. Granični sloj uz trup broda.**

### 5.3. Actuator disk model

Model *Actuator disk* predstavlja pojednostavljen matematički model koji opisuje dvije najvažnije karakteristike brodskog vijka: poriv i okretni moment. Model se temelji na pretpostavci brodskog vijka s beskonačno mnogo krila te se idealni vijak prikazuje kao površina diska definirana radijusom, položajem i smjerom poriva. Ovakva implementacija se pokazala pogodnom za primjenu pri korištenju metode konačnih volumena [33], [34]. Disk ubrzava strujanje fluida čime se mijenja polje tlaka te dolazi do naglog skoka tlaka koji je opisan sljedećom jednačbom [35].

$$\Delta p = A_x r \sqrt{1 - r}, \quad (10)$$

gdje  $p$  predstavlja tlak,  $A_x$  je površina brodskog vijka dok  $r$  predstavlja njegov normalizirani radijus. Slika 10 prikazuje skok tlaka na brodskom vijku.



Slika 10. Skok tlaka na *Actuator disk-u*.

#### 5.4. Simulacije vlastitog pogona i otpora na mirnoj vodi

Za sve provedene simulacije zadana su svojstva zraka i morske vode te je korišten model dvofaznog strujanja koji opisuje interakciju dva fluida. Brod je fiksiran dok fluid nastrojava na njega te ima dva stupnja slobode, poniranje i posrtanje. Iako bi zbog djelovanja aerodinamičke sile na jedra valjanje broda moglo biti značajno ono nije analizirano u ovom radu.

Provođenju simulacija vlastitog pogona prethodi simulacija otpora broda na mirnoj vodi iz koje se dobivaju ulazni podatci poput brzine nastrojavanja fluida na brodski vijak.

Nadalje, uz podatke o brodskom vijku s pokusa slobodne vožnje vijka provodi se simulacija vlastitog pogona pomoću *Actuator disk-a*. Podatci s pokusa slobodne vožnje vijka prikazani su u Tablici 3 i prikazuju redom koeficijent napredovanja brodskog vijka, koeficijent poriva brodskog vijka i koeficijent momenta brodskog vijka.

**Tablica 3. Koeficijenti određeni pokusom slobodne vožnje brodskog vijka.**

Koeficijent napredovanja brodskog vijka, $J$	Koeficijent poriva brodskog vijka, $K_T$	Koeficijent momenta brodskog vijka, $K_Q$
-100	0	0
0,01	0,2942	0,0312
0,1	0,2698	0,0290
0,2	0,2388	0,0262
0,3	0,2042	0,0230
0,4	0,1663	0,0195
0,5	0,1256	0,0156
0,6	0,0827	0,0115
0,7	0,0378	0,0070
100	0	0

Prikazani koeficijenti dobiveni su ispitivanjem brodskog vijka pri različitim brzinama vrtnje a sljedeće jednadžbe opisuju redom koeficijent napredovanja brodskog vijka, koeficijent poriva brodskog vijka i koeficijent momenta brodskog vijka [36]:

$$J = \frac{V_a}{n D} \quad (11)$$

gdje  $V_a$  predstavlja prosječnu brzinu nastrujavanja fluida na brodski vijak,  $n$  je broj okretaja brodskog vijka a  $D$  njegov promjer.

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (12)$$

$T$  označava ostvareni poriv za narinuti broj okretaja brodskog vijka dok  $\rho$  označava gustoću vode.

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (13)$$

$Q$  označava moment potreban za okretanje broskog vijka pri određenom broju okretaja.

Nakon provođenja simulacije otpora na mirnoj vodi uključuje se *Actuator disk* te se povećanjem broja okretaja traži radna točka u kojoj će poriv vijka svladavati otpor broda. Radom broskog vijka mijenja se strujanje fluida ponajviše oko krme i kormila na koje brodski vijak direktno ubrzava fluid. Spomenute promjene u strujanju mijenjati će otpor broda što uzrokuje traženje nove radne točke u kojoj poriv savladava otpor. Kada se prestanu dobivati velike oscilacije poriva vijka simulacija se završava i konačno se dobivaju podatci o porivu, broju okretaja, okretnom momentu, otporu i dovedenoj snazi broskom vijku. Jednadžba (14) prikazuje izračun snage dovedene broskom vijku [37]:

$$P_Q = n * Q, \quad (14)$$

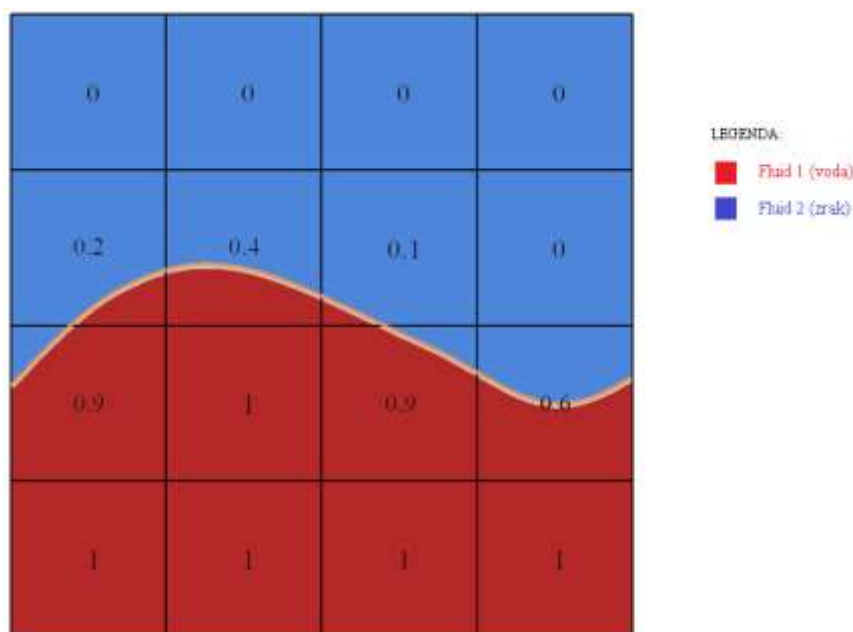
gdje  $n$  predstavlja broj okretaja broskog vijka a  $Q$  okretni moment potreban za njegovo zakretanje.

## 5.5. Dvofazno strujanje, VOF

Dvofazno strujanje proračunski je zahtijevanije od monofaznog strujanja a kako se fluidi međusobno ne miješaju potrebno je opisati njihovu slobodnu površinu. Na dodiru vode i zraka odnosno na slobodnoj površini generiraju se valovi koje je veoma bitno dobro opisati jer utječu na ukupni otpor broda a nekada su i glavni predmet razmatranja.

Slobodna površina opisuje se VOF metodom koja prati ponašanje slobodne površine na dodiru dvaju ne miješajućih fluida [38].

Metoda funkcionira na način da je svakom diskretiziranom volumenu pridodan jedan broj od 0 do 1 gdje 0 označava stopostotan udio zraka a 1 stopostotan udio vode. Na taj način može vrlo točno odrediti slobodnu površinu i pratiti njezine promjene. Shematski prikaz VOF metode prikazan je na Slici 11 gdje različite boje prikazuju različiti fluid a granica između njih je slobodna površina.



Slika 11. VOF metoda.

### 5.6. Numerički rješavač i vremenski korak (eng. *Solver, Time step*)

Za rješavanje ne-stacionarnih jednadžbi korištena je implicitna Eulerova shema te je vremenski korak određen prema [32]:

$$\Delta t = \frac{T_2}{c} \quad (15)$$

Gdje je period  $T_2$  definiran kao omjer duljine i brzine broda dok koeficijent  $c$  određuje koliko veliki vremenski korak želimo te je u ovome radu vrijednost  $c$  jednaka 50. Procijenjeno je da takav iznos vremenskog koraka neće biti premalen i oduživati trajanje simulacija niti prevelik da ne uspijeva zabilježiti fizikalne promjene.

Maksimalno vrijeme trajanje simulacija bez vlastitog pogona postavljeno je na 1000 sekundi dok je za one koje uključuju vlastiti pogon postavljeno vrijeme trajanja od 2000 sekundi gdje pola otpada na simulacije otpora broda na mirnoj vodi a pola na simulacije vlastitog pogona.

Kako je brzina plovidbe 12,5 čvorova a duljina plovila između okomica 225 metara, vremenski korak koji je korišten u simulacijama tada iznosi 0,6998 sekundi.



## 6. VALIDACIJA METODE

Ovo poglavlje daje usporedbu rezultata numeričke analize provedene u sklopu ovoga diplomskog rada i eksperimenta [31] prilikom određivanja bočne sile broda. U Tablici 4 uspoređeni su iznosi bočnih sila pri tri različita kuta zanošenja broda i iznosu Froudeovog broja  $Fr = 0,142$  što odgovara deplasmanskom režimu plovidbe.

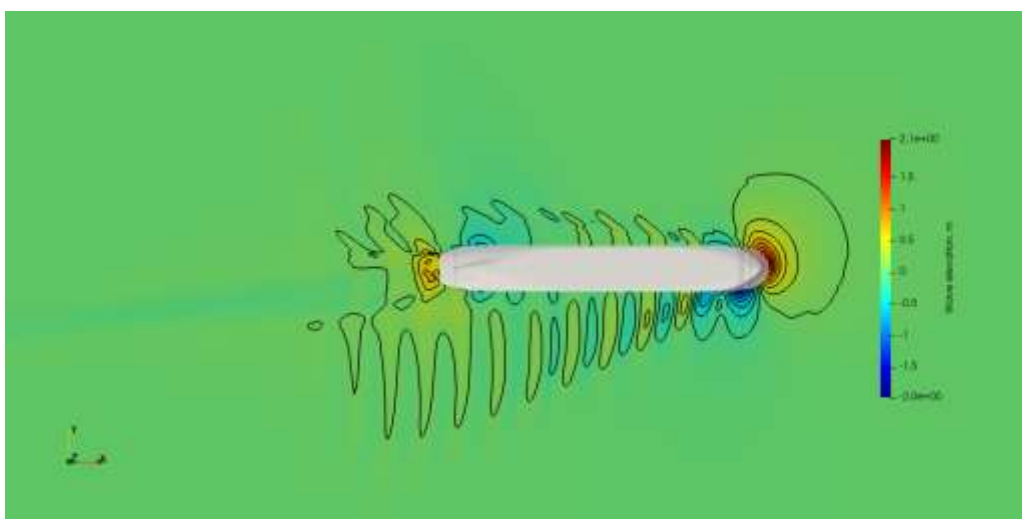
**Tablica 4. Rezultati bočnih sila  $F_y$  na brod pri različitim kutovima zanošenja.**

Zanošenje broda	Eksperimentalni rezultati, N	Rezultati numeričke simulacije, N	RD, %
2°	-1,801	-2,4896	≈ 27,0
4°	-4,314	-4,1269	≈ 4,0
6°	-7,187	-6,9277	≈ 3,5

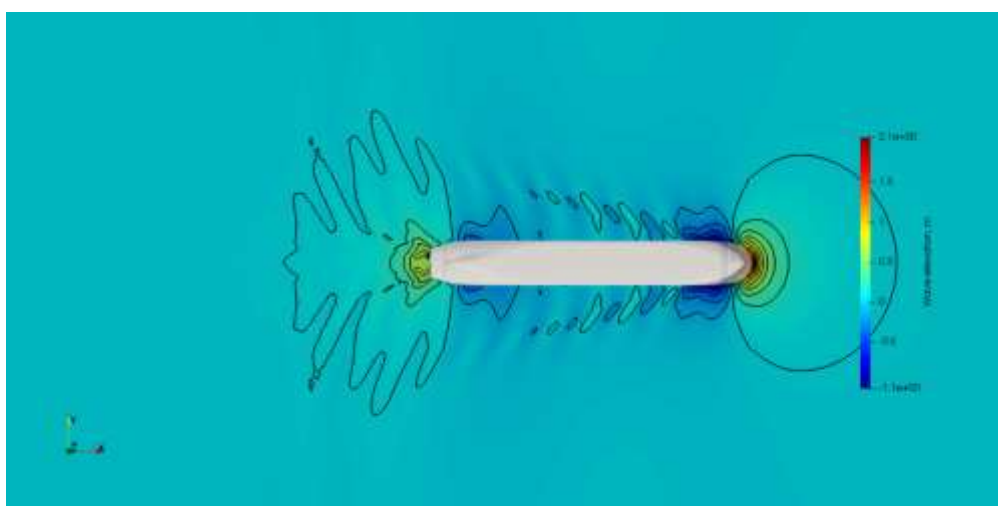
Nakon provedenih numeričkih simulacija izračunata je postotna razlika prema formuli (9). Greška se nalazi unutar 5% te numeričke simulacije vrlo dobro predviđaju bočnu silu uz iznimku nešto većeg odudaranja pri najmanjem kutu zanošenja gdje je bilježena i najmanja bočna sila. Mali iznos bočne sile uzrokuje veliko postotno odstupanje rezultata pri kutu zanošenja od 2°.

Nažalost, pokusom nisu određene sile otpora broda koje bi bilo zanimljivo usporediti sa numeričkim rezultatima ovoga rada.

Za validaciju metode odabran je identičan brod KVLCC2 kao iz pokusa. Slika 12 prikazuje sliku valova broda za rasuti teret prilikom zanošenja od 6 stupnjeva dok Slika 13 prikazuje sliku valova za isti brod bez zanošenja. Jasno je uočljiva promjena simetričnog strujanja fluida oko tupa broda prilikom zanošenja broda što će utjecati na hidrodinamičke sile i momente koji djeluju na sami brod.



**Slika 12. Slika valova pri zanošenju od 6 stupnjeva.**



**Slika 13. Slika valova pri zanošenju od 0 stupnjeva.**

## 7. PROVEDBA SIMULACIJA I ANALIZA REZULTATA

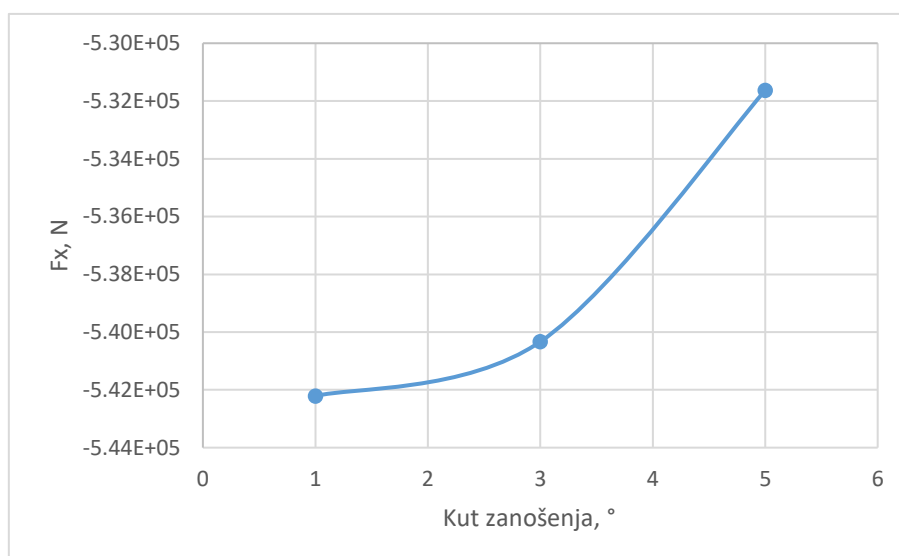
### 7.1. Analiza otpora i momenta pri različitim kutovima zanošenja broda sa neotklonjenim kormilom

Simulacije su provedene proračunima ne stacionarnog strujanja a indeksi x, y i z odgovaraju globalnom koordinatnom sustavu numeričke postavke kao što je prikazano na Slici 12. U numeričkim simulacijama brod je fiksiran dok fluid nastrujava na njega pod zadanim kutom. Na taj način simulirana je plovidba broda u uvjetima djelovanja bočne sile koja uzrokuje zanošenje broda te je dobivena ovisnost bočne sile o kutu zanošenja broda. Ispitana su tri kuta zanošenja broda pri brzini od 12,5 čvorova što odgovara Froudeovom broju  $Fr = 0,135$  te su dobiveni podaci o silama i momentu prikazani u Tablici 5. U simulacijama kormilo nije otklonjeno kako bi se omogućilo izolirano ispitivanje sila i momenta koji djeluju na trup broda.

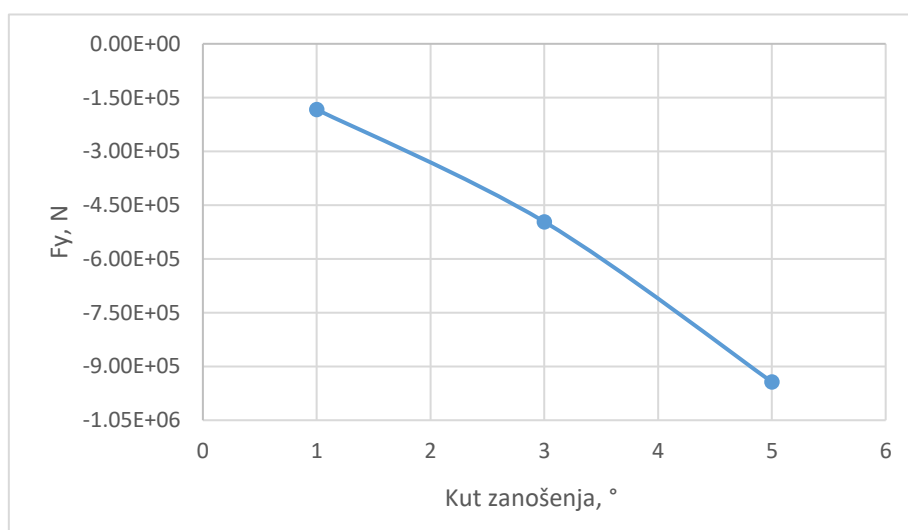
**Tablica 5. Sile i momenti pri tri kuta zanošenja trupa broda.**

Kut zanošenja, °	$F_x$ , N	$F_y$ , N	$M_z$ , Nm	$F_R$ , N
1	$-5,53 \cdot 10^5$	$-2,32 \cdot 10^5$	$-4,28 \cdot 10^7$	$5,99 \cdot 10^5$
2	$-5,45 \cdot 10^5$	$-6,54 \cdot 10^5$	$-1,34 \cdot 10^8$	$8,51 \cdot 10^5$
3	$-5,32 \cdot 10^5$	$-1,20 \cdot 10^6$	$-2,13 \cdot 10^8$	$1,31 \cdot 10^6$

Jasno je kako povećanjem kuta zanošenja bočna sila, prikazana kao  $F_y$ , raste dok sila u smjeru osi x opada. Kod plovidbe bez zanošenja moment oko vertikalne osi z jednak je nuli zbog simetrije trupa broda te je i strujanje simetrično. Prilikom zanošenja strujanje oko trupa broda prestaje biti simetrično te hidrodinamičke sile uzrokuju povećanje momenta oko vertikalne osi z što je vidljivo iz Tablice 5.  $F_R$  predstavlja rezultantu silu bočne i uzdužne sile.

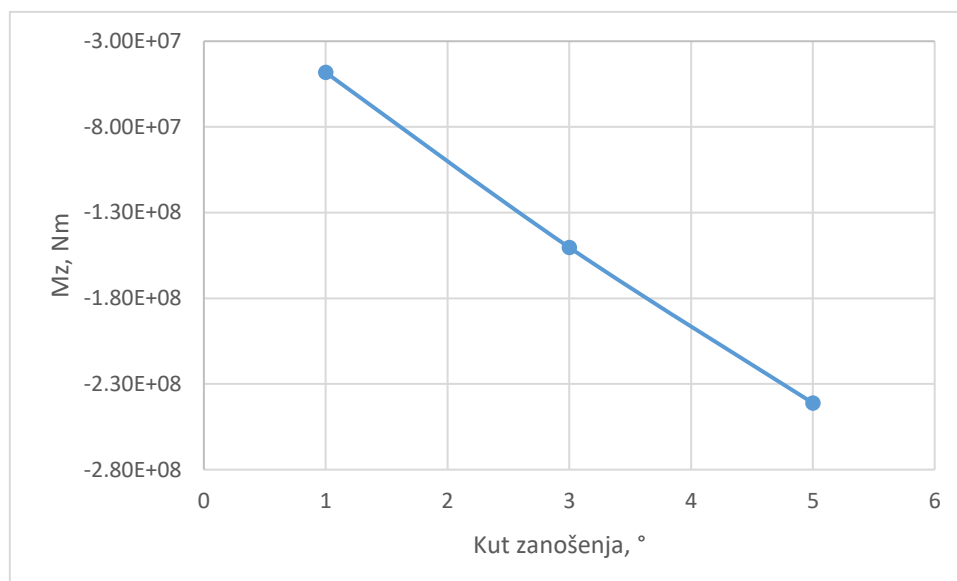


**Slika 14. Ovisnost uzdužne sile o kutu zanošenja.**



**Slika 15. Ovisnost bočne sile o kutu zanošenja.**

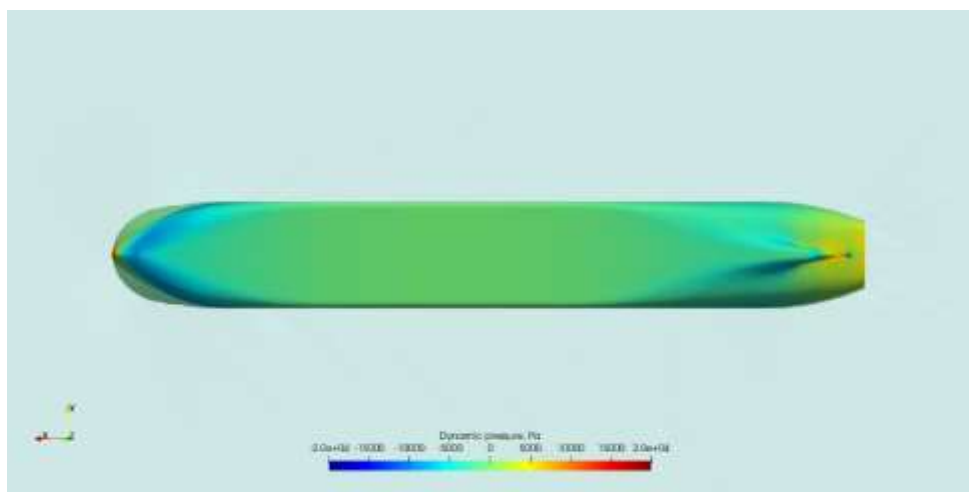
Na Slikama 14 i 15 uočavamo povećanje bočne sile i smanjenje longitudinalne sile na trup broda prilikom povećavanja kuta zanošenja. Slika 16 prikazuje ovisnost momenta o kutu zanošenja te se jasno vidi kako se moment povećava sa povećanjem kuta zbog asimetričnog strujanja oko trupa broda što uzrokuje zakretanje broda.



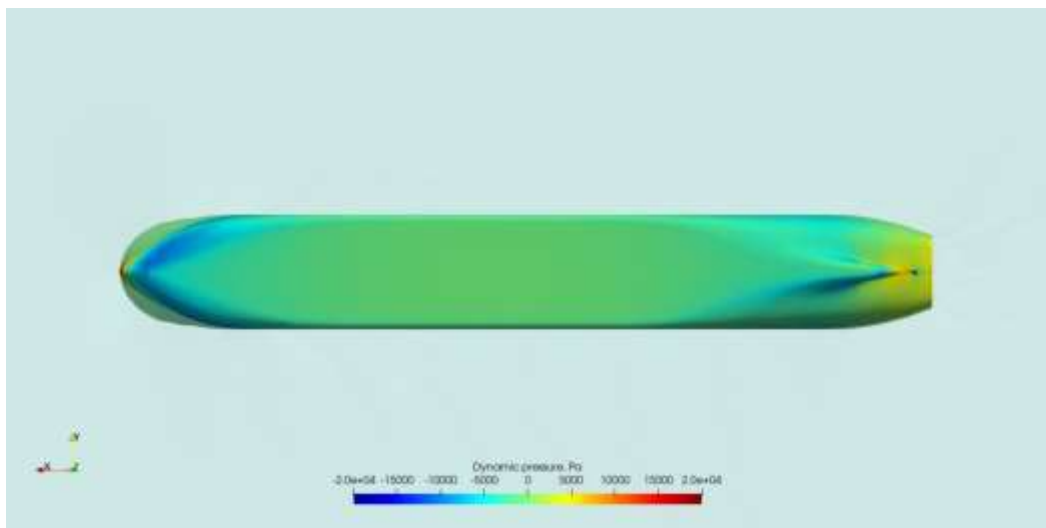
**Slika 16. Ovisnost momenta o kutu zanošenja.**

Slike 17 i 18 prikazuju raspodjelu dinamičkog tlaka duž dna broda. Na Slici 17 kut zanošenja broda je nula dok Slika 18 prikazuje raspodjelu tlaka pri kut zanošenja od 5 stupnjeva. Bez kuta zanošenja distribucija dinamičkog tlaka je simetrična, kao što se i očekivalo. U simulaciji s kutom zanošenja od 5 stupnjeva dinamički tlak nije simetrično raspoređen, što je uzrokovano promjenom strujanja fluida oko trupa i uzrokovati će pomicanje hidrodinamičkog centra opterećenja ispred longitudinalnog težišta broda što će za posljedicu imati zakretanje plovila u vjetar.

Takvo zakretanje je nepoželjno te će se morati kompenzirati otklonom kormila kako bi brod zadržao željeni smjer plovidbe.



**Slika 17. Dinamički tlak bez zanošenja broda.**



Slika 18. Dinamički tlak sa kutom zanošenja broda od 5 stupnjeva.

## 7.2. Analiza otpora i momenta pri različitim kutovima zanošenja broda bez kormila

Osim simulacija s kormilom provedene su i simulacije zanošenja bez kormila u režimu ne-stacionarnog strujanja. Cilj je bolje razumijevanje utjecaj kormila na ukupne reaktivne sile i moment koji djeluju na trup kada je izložen kosom strujanju. Promatrani rezultati značajno se razlikuju od rezultata prikazanih u odjeljku 7.1. gdje su prikazani rezultati sa prisustvom kormila. U Tablici 6 prikazani su rezultati bočne sile i momenta u ovisnosti o kutu zanošenja te je dana postotna razlika između proračuna provedenih sa i bez prisustva kormila.

Tablica 6. Razlike sila i momenta u ovisnosti o zanošenju između simulacija sa i bez kormila.

Kut zanošenja, °	$F_y$ , N S kormilom	$F_y$ , N Bez kormila	$M_z$ , Nm S kormilom	$M_z$ , Nm Bez kormila	$F_y$ , % Odstupanje	$M_z$ , % Odstupanje
1	$-2,32 \cdot 10^5$	$-1,83 \cdot 10^5$	$-4,28 \cdot 10^7$	$-4,82 \cdot 10^7$	- 20,9	+ 11,2
3	$-6,54 \cdot 10^5$	$-4,96 \cdot 10^5$	$-1,34 \cdot 10^8$	$-1,50 \cdot 10^8$	- 24,1	+ 11,1
5	$-120 \cdot 10^6$	$-9,43 \cdot 10^5$	$-2,13 \cdot 10^8$	$-2,41 \cdot 10^8$	- 21,5	+ 11,7

Razlika rezultata je značajna i može se zaključiti kako prisutnost kormila u numeričkim simulacijama utječe na ukupne sile i moment plovila. Bočna sila se razlikuje za oko - 20 %, dok moment ima manje odstupanje rezultata od oko + 11 % za tri ispitivana kuta zanošenja. Također se može primijetiti kako je iznos bočne sile podcijenjen bez kormila, dok je moment precijenjen. Isključivanje kormila iz numeričkih proračuna može dovesti do pogrešnih rezultata, pa je stoga u ovom radu kormilo prisutno u svim simulacijama. Isto tako, preporuča se korištenje kormila u sličnim studijama.

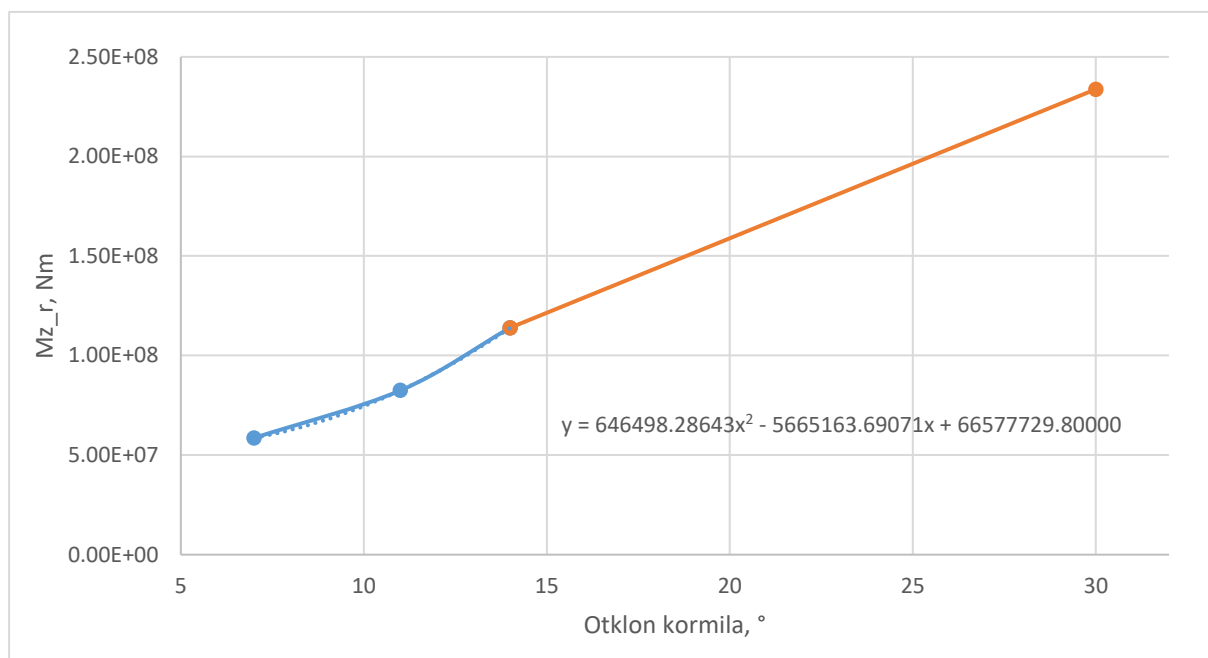
### 7.3. Numeričke simulacije vlastitog pogona s otklonjenim kormilom

U ovom odjeljku provedene su simulacije sa propulzijom pri različitim otklonima kormila. Cilj je izraditi krivulju ovisnosti generiranog momenta kormila o kutu otklona kormila. Strujanje nije otklonjeno dok je kormilo otklonjeno za 7, 11, 14 i 30 stupnjeva. Zbog nastrojavanja fluida s brodskog vijka na otklonjeno kormilo generira se moment na kormilu koji zakreće brod. Bitno je uočiti kako osim otklonjenog kormila značajan moment generira trup broda što proizlazi iz promjene strujanja oko krme zbog djelovanja propulzije. Stoga se moment trupa ne može zanemariti već se računa ukupni moment kormila i trupa  $Mz_r$  kao  $Mz_r = Mz_{trup} + Mz_{kormilo}$ . Izračunati momenti dani su u Tablici 7 i grafički prikazani na Slici 19.

**Tablica 7. Rezultati simulacija sa propulzijom i otklonjenim kormilom.**

Otklon kormila, °	$Mz_{trup}$ , Nm	$Mz_{kormilo}$ , Nm	$Mz_r$ , Nm
7	$1,18 \cdot 10^7$	$4,68 \cdot 10^7$	$5,86 \cdot 10^7$
11	$1,38 \cdot 10^7$	$6,87 \cdot 10^7$	$8,25 \cdot 10^7$
14	$2,08 \cdot 10^7$	$9,32 \cdot 10^7$	$1,14 \cdot 10^8$
30	$5,17 \cdot 10^7$	$1,82 \cdot 10^8$	$2,34 \cdot 10^8$

Slika 19 prikazuje rezultate ovisnosti ukupnog momenta o kutu otklona kormila. Primjećuje se porast ukupnog momenta s povećanjem otklona kormila što se i očekuje. Skok tlaka uzrokovati će usmjereni tok fluida na kormilo koje će svojim otklonom tada generirati moment.



**Slika 19. Ovisnost ukupnog momenta o otklonu kormila.**

Slika 19 prikazuje ovisnost ukupnog momenta o kutu otklona kormila te zamjećujemo dvije krivulje. Plava krivulja nalazi se u rasponu od 7 do 14 stupnjeva otklona kormila što je željeno operativno područje. S otklonom kormila ne želimo preći 15 stupnjeva zbog smanjene mogućnosti manevriranja brodom u mogućim izvanrednim situacijama. Interpolirana je jednadžba krivulje samo za željeno (plavo područje) te Slika 19 prikazuje dobivenu jednadžbu koja će kasnije poslužiti za određivanje potrebnog otklona kormila.

#### **7.4. Numeričke simulacije sa otklonjenim kormilom, bez propulzije**

Simulacije iz prethodnog odjeljka sa otklonjenim kormilom se ponavljaju ali ovoga puta bez propulzije. Svrha je analiza učinka propulzije na sile i momente kormila i trupa broda te moguće izostavljanje vlastitog pogona iz simulacija zbog smanjenja složenosti proračuna. Tablica 8 prikazuje razlike između izračunatih momenata kormila i trupa sa i bez vlastitog pogona za 7 i 14 stupnjeva otklona kormila.



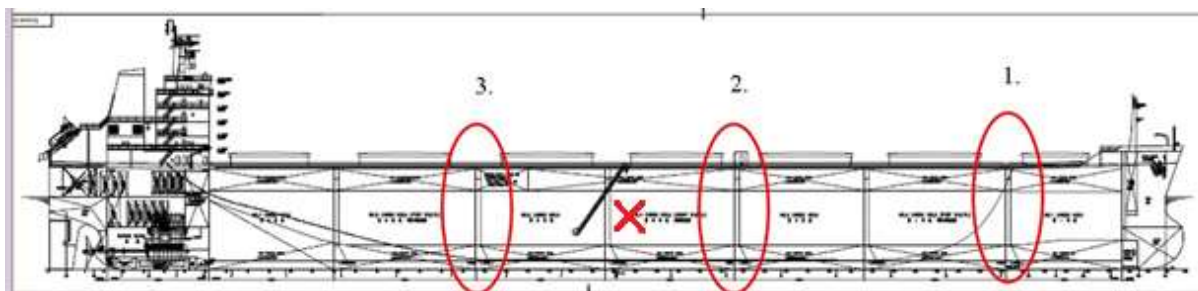
**Tablica 8. Usporedba momenata simulacija sa i bez propulzije**

Otklon kormila, °	$Mz_{trup}$ , Nm Vlastita propulzija	$Mz_{trup}$ , Nm Bez propulzije	$Mz_{kormilo}$ , Nm Vlastita propulzija	$Mz_{kormilo}$ , Nm Bez propulzije	Odstupanje, %
7	$1,18 \cdot 10^7$	$1,39 \cdot 10^6$	$4,68 \cdot 10^7$	$4,61 \cdot 10^6$	- 23,7
14	$2,08 \cdot 10^7$	$1,61 \cdot 10^7$	$9,32 \cdot 10^7$	$5,48 \cdot 10^7$	- 37,8

Podaci iz Tablice 8 pokazuju kako propulzija značajno utječe na hidrodinamičke značajke plovila i posljedično na ukupni moment. Zbrojeni moment trupa i kormila bez propulzije podcijenjen je za oko 24 % pri otklonu kormila od 7 stupnjeva i oko 38 % pri većem otklonu od 14 stupnjeva. Ova velika razlika posljedica je promjene strujanja fluida i raspodjele tlaka na krmi broda gdje se može primijetiti utjecaj propulzije. Također, propulzija ima veliki utjecaj na kormilo jer usmjerava fluid izravno na njega čime se značajno povećava generirani moment. Stoga se propulzija ne može zanemariti te su u ovome radu korišteni proračuni sa uključenom propulzijom što se preporuča za slične studije.

### 7.5. Sile i momenti jedara

Aerodinamička analiza nije dio ovoga rada te su aerodinamičke sile procijenjene od strane firme *Computed Wing Sail* za koju je rađena analiza prezentirana u ovome radu. Bočna sila po jedru iznosi 233398,27 N. Ovaj broj dolazi od grube procjene maksimalnog uzgona jedra koje ono može ostvariti u bočnome smjeru pri relativno visokim iznosima prividnog vjetrova. Mogući položaji jedara definirani su na Slici 20 gdje su označeni crvenim elipsama i numerirani po položajima. Ograničenja prilikom postavljanja jedra na palubu su konstrukcijske prirode te se na ovome brodu mogu postaviti na 3 označena mjesta po dva jedra. Sljedeće ograničenje je induciranje prevelike bočne sile koja će uzrokovati veliki moment koje će se morati kompenzirati velikim otklon kormila. Naravno, prevelik otklon kormila je nepoželjan a fizički najveći otklon kormila kreće oko 30ak stupnjeva. Stoga je radi sigurnosti odabran kriterij od 15 stupnjeva maksimalnog otklona kormila. Razlog tomu je ostavljanje dovoljno prostora za dodatnim manevrom u izvanrednim situacijama.



Slika 20. Moguće pozicije jedara na palubi.

Crveni X na Slici 20 označava položaj težišta broda te uočavamo kako jedra postavljena na pozicije 1 i 2 smanjuju nepovoljan hidrodinamički moment koji uzrokuje skretanja broda prema vjetru dok jedra instalirana na položaju 3 povećavaju taj nepovoljni moment.

Imajući to u vidu, odabrana konfiguracija jedara je sljedeća: na poziciji 1 postavljaju se dva jedra dok se jedno jedro postavlja na poziciji 2. Na poziciju 3 se ne postavlja jedro. Dodavanjem još jednog jedra na poziciju 2 premašit će se otklon kormila od 15 stupnjeva, dok su dva jedra postavljena na poziciju 1 zbog velikog kraka do težišta broda.

Tablica 9 prikazuje zbroj bočnih sila koje stvaraju jedra kao i momente oko vertikalne osi broda u njegovome težištu.

Tablica 9. Bočne sile i momenti jedara po pozicijama i broju jedara.

Pozicije	Broj jedara	$F_{y\_jedra}$ , N	$M_{z\_jedra}$ , Nm
1.	2	$4,67 \cdot 10^5$	$3,56 \cdot 10^7$
2.	1	$2,33 \cdot 10^5$	$4,99 \cdot 10^6$
3.	0	0,0	0,0
$\Sigma$	<b>3</b>	<b><math>7,00 \cdot 10^5</math></b>	<b><math>4,06 \cdot 10^7</math></b>

Iz Tablice 9 se vidi kako jedra postavljena na poziciju 1 (bliže pramcu) generiraju veći moment nego ona na poziciji 2. Važno je napomenuti kako je taj moment poželjan jer je obrnutog predznaka od hidrodinamičkog momenta te će pridonijeti manjem otklonu kormila.

## 7.6. Procjena kuta zanošenja broda i otklona kormila

Zanošenje uzrokuje bočna sila jedara koja je prethodno izračunata u Tablici 9. Kako imamo krivulju ovisnosti bočne sile o kutu zanošenja (Slika 15) potrebno je očitati koji kut zanošenja odgovara bočnoj sili jedara.

Kut zanošenja broda koji kompenzira bočnu silu jedra procijenjen je na 3,19 stupnjeva prema grafičkom prikazu sa Slike 15.

U Tablici 10 hidrodinamičkom momentu uzrokovanom zanošenjem broda (Slika 16) pridodan je moment jedara kako bi dobili realno stanje ukupnog momenta koji djeluje na brod. Kako ne bi došlo do nekontroliranog skretanja broda ukupni moment je potrebno kompenzirati otklonom kormila.

**Tablica 10. Ukupni moment jedara i trupa po kutovima zanošenja broda.**

Kut zanošenja, °	$Mz_{jedra} + Mz_r$ , Nm
1	$-2,24 \cdot 10^6$
3	$-9,31 \cdot 10^7$
5	$-1,72 \cdot 10^8$

Prethodno izračunat kut zanošenja od 3,19 stupnjeva sada uvrštavamo u Tablicu 10 te dobivamo vrijednost ukupnog momenta od  $9,73 \cdot 10^7$  Nm.

Kako bi se kompenzirao ukupni moment zanošenja koji djeluje na brod, kormilo mora biti otklonjeno pod odgovarajućim kutom.

Nadalje, iz Slike 19 koja prikazuje ovisnosti hidrodinamičkog momenta o kutu otklona kormila nakon uvrštavanja ukupnog momenta od  $9,73 \cdot 10^7$  Nm dobiven je prikladan kut otklona kormila od 12,55 stupnjeva.

Tako je za konfiguraciju s tri jedra prilikom vjetrom potpomognute plovidbe potrebno otkloniti kormilo za 12,55 stupnjeva kako bi brod ispravio zakretanje u vjetar i zadržao željeni kurs.

## 7.7. Simulacija vlastitog pogona s vjetrom potpomognutom propulzijom

U posljednjem koraku studije plovilo se postavlja u realne uvjete vjetrom potpomognute propulzije. Sa izračunatim kutom zanošenja uslijed djelovanja bočne sile i kutom otklona kormila koje kompenzira okretanje pramca u vjetar provodi se simulacije propulzije (*Actuator disk*). Poriv propulzije umanjen je za iznos poriva jedara kako bi se simulirali realni uvjeti hibridnog pogona.

Tablica 11 prikazuje konačnu postavu simulacije gdje se poriv u smjeru plovidbe procjenjuje na 5 T po jedru ili 49 033,3 N. Spomenuti iznos dolazi od procijenjenog otpora jedra pri maksimalnom uzgonu te ga je omogućila firma *Computed Wing Sail*.

**Tablica 11. Postavke simulacije.**

Kut zanošenja, °	Poriv jedara, N	Otklon kormila, °
3,19	147 099,8	12,55

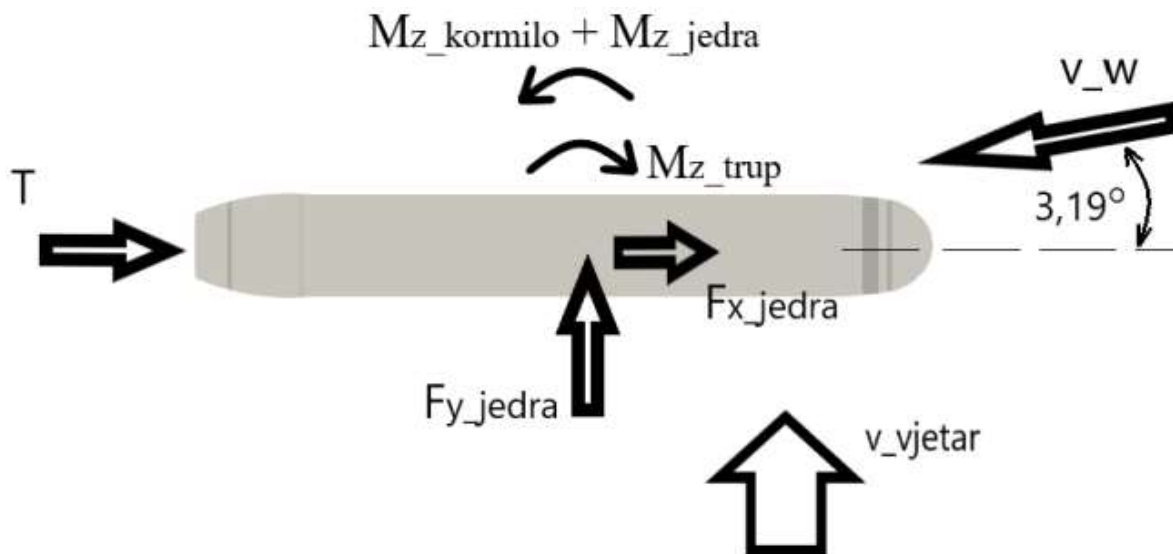
brod je fiksiran u simulaciji te na njega nastrojava fluid pod kutom od 3,19 stupnjeva u odnosu na longitudinalnu os što simulira zanošenje broda. Kormilo je otklonjeno za 12,55 stupnjeva tako da zakreće brod u smjer nastrojavanja fluida odnosno od vjetra.

Tablica 12 prikazuje dobivene momente koji djeluju na trup i kormilo te njihov zbroj kao i ukupni moment koji djeluje na brod kada se uzmu u obzir i jedra.

**Tablica 12. Izračunati momenti u simulaciji vjetrom potpomognute propulzije.**

$Mz_{trup}$ , Nm	$Mz_{kormilo}$ , Nm	$Mz_{tot}$ , Nm	$Mz_{tot} + Mz_{jedra}$ , Nm
$-1,35 \cdot 10^8$	$9,74 \cdot 10^7$	$-3,81 \cdot 10^7$	$2,46 \cdot 10^6$

Kao što je vidljivo iz prikazanih podataka, zbrajanje momenta jedra na hidrodinamički moment trupa i kormila promijenilo je predznak ukupnog hidrodinamičkog momenta koji djeluje na brod iz negativne u pozitivnu vrijednost. To implicira kako trenutna konfiguracija prikazana na Slika 21 daje blagi višak momenta, to jest otklon kormila veći je od potrebnog i potencijalno bi se mogao smanjiti. Tako se prezentiranom metodom nalazimo na strani sigurnosti što ostavlja dovoljno manevarskog prostora na kormilu.



Slika 21. Sile i momenti koje djeluju na brod prilikom vjetrom potpomognute propulzije.

Na Slici 21  $T$  označava poriv konvencionalne propulzije, a  $v_w$  predstavlja nastrojnu brzinu fluida na brod otklonjenu za 3,19 stupnjeva i jednaku brzini plovidbe broda od 12,5 čvorova. Prema prikazanom, trup i jedra broda generiraju  $-9,49 \cdot 10^7$  Nm momenta dok kormilo taj moment poništava sa  $9,74 \cdot 10^7$  Nm. Budući da je ukupni disbalans momenta relativno mali, oko 2,52 % može se zaključiti da je prikazani postupak uspio veoma dobro predvidjeti potrebni kut zanošenja kao i otklon kormila.

### 7.8. Prednosti vjetrom potpomognute propulzije

Kako bi vidjeli prednosti vjetrom potpomognute propulzije provedena je dodatna simulacija konvencionalne propulzije radi usporedbe. Simulacija konvencionalne propulzije predstavlja način plovidbe identičnog broda na pogon propulzorom brzinom od 12,5 čvorova. Simulacija je provedena bez zanošenja, to jest brod je fiksiran a fluid nastrojava na njega bez kuta zanošenja te kormilo nije otklonjeno. Rezultati se uspoređuju sa simulacijom vjetrom potpomognute propulzije prikazane u odjeljku 7.7.

Tablica 13 prikazuje karakteristike pogona za konvencionalnu i vjetrom potpomognutu propulziju kao i postotnu razliku između njih.

**Tablica 13. Usporedba karakteristika vjetrom potpomognutog i konvencionalnog pogona.**

	Vjetrom potpomognuta propulzija	Konvencionalna propulzija	Odstupanje, %
$F_t$ [N]	636917,44	529287,46	16,9 %
$T$ [N]	632958,89	650161,15	-2,7 %
$Q$ [Nm]	480120,92	495443,36	-3,2 %
$P_Q$ [W]	4944862,33	5227028,74	-5,7 %

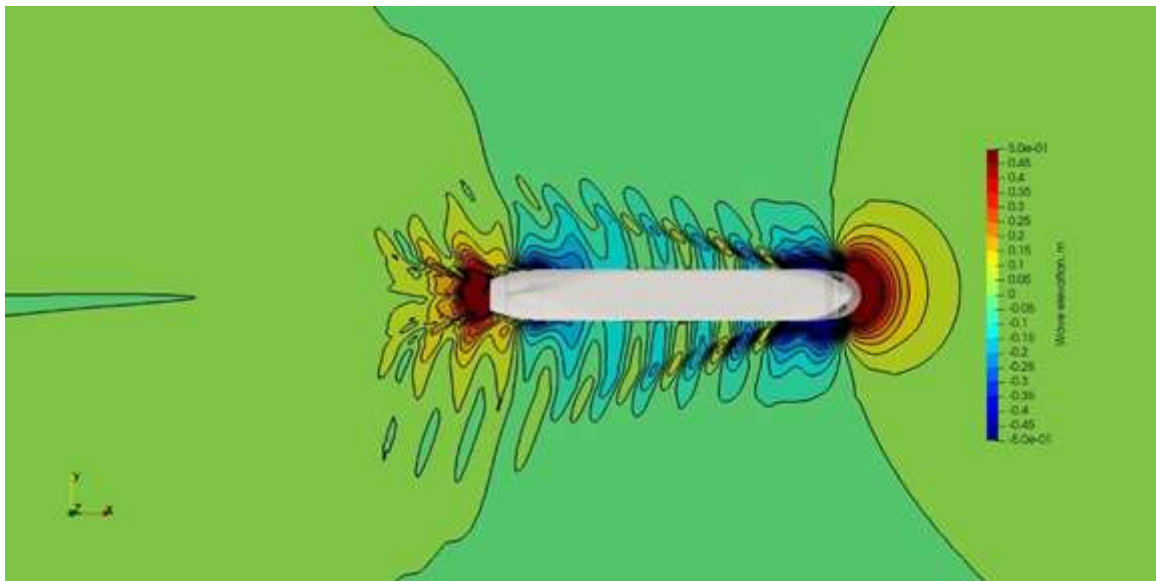
$F_t$  predstavlja otpor broda koji je znatno veći kod broda sa vjetrom potpomognutom propulzijom što je uzrokovano zanošenjem trupa i otklonom kormila. Otpor je povećan za čak 17% te će ga poriv jedara morati kompenzirati.

Poriv  $T$  i okretni moment  $Q$  niži su kod broda čija je propulzija potpomognuta vjetrom za oko -3% što se može pripisati dodatnom potisku kojega stvaraju jedra.

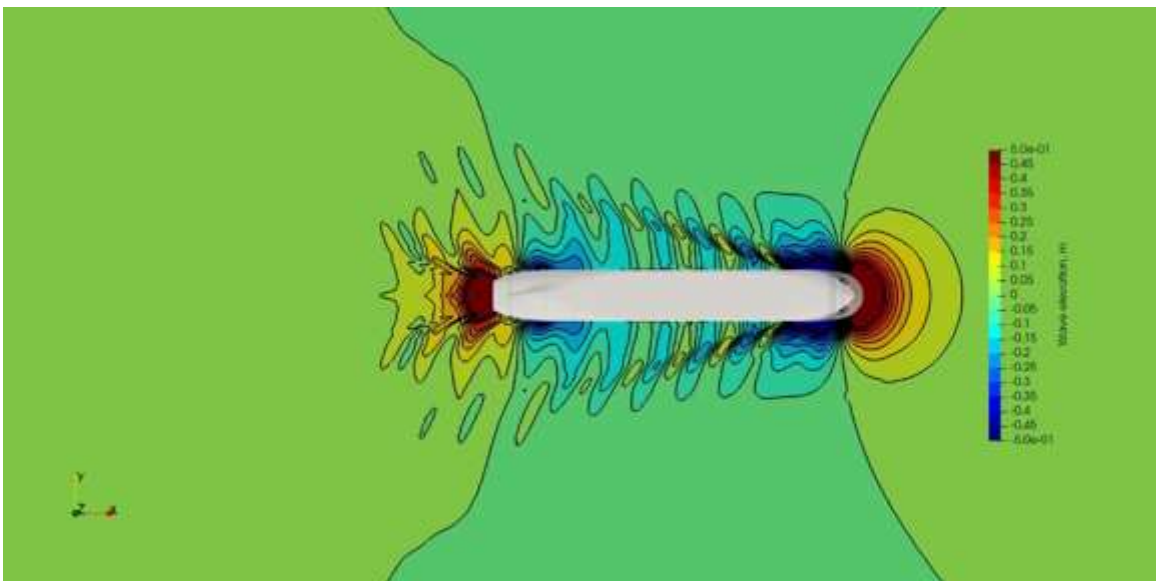
Uspoređujući snagu dovedenu brodskom vijku  $P_Q$  potrebnu za propulziju jednog i drugog plovila pri brzini od 12,5 čvorova, uočavamo kako plovilo sa vjetrom potpomognutom propulzijom troši 5,7 % manje snage u usporedbi s plovilom na konvencionalni pogon.

Zanimljivo je primijetiti kako se najveći dio potiska jedara koristi za kompenzaciju dodatnog otpora nastalog zbog kuta zanošenja i otklonjenog kormila. Unatoč tome, ukupna ušteda je i dalje značajna, a iznosi gotovo 6 % u vidu smanjenja snage dovedene brodskom vijku. Dovedena snaga brodskom vijku direktno je povezana s potrošnjom goriva stoga možemo očekivati smanjenje potrošnje goriva.

Slika 23 prikazuje sliku valova oko broda sa konvencionalnom propulzijom te su valovi potpuno simetrično raspoređeni sa obje strane broda kao što je i očekivano zbog simetričnosti broda i izostanka zanošenja. Slika 22 prikazuje sliku valova broda s vjetrom potpomognutom propulzijom te se može uočiti kako valovi nisu potpuno simetrični sa lijeve i desne strane broda. Razlog tomu je zanošenje broda zbog djelovanja bočne sile jedara.



Slika 22. Polje valova u simulaciji s vjetrom potpomognutom propulzijom.



Slika 23. Polje valova u simulaciji s konvencionalnom propulzijom.

## 8. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu ispitan je utjecaj aerodinamičkih sila jedara na hidrodinamičke sile i momente broda za rasuti teret. Uz povoljnu porivnu silu jedara javlja se i nepovoljna bočna sila kao produkt aerodinamičkog trokuta sila kojeg uzrokuje strujanje vjetra preko jedara. Bočna sila utjecati će na zanošenje broda kojemu se potom mijenja simetrično strujanje fluida oko trupa. Promjenom simetričnog strujanja fluida dolazi do pomaka hvatišta hidrodinamičke sile ispred težišta broda što rezultira njegovim zakretanjem u vjetar. Kako je zakretanje nepoželjno i dovodi do nemogućnosti plovidbe potrebno je zakretanje ispraviti upotrebom kormila. Za tu svrhu unaprijed je određen maksimalan otklon kormila od 15 stupnjeva. Kako je maksimalan fizički otklon kormila oko 30 stupnjeva ostavlja se polovica mogućeg otklona za manevriranje u izvanrednim situacijama. Razrađena je metoda odabira najvećeg broja jedara koja će ostvarivati maksimalan poriv, pazeći pritom da bočna sila koju uzrokuju jedra ne generira preveliki hidrodinamički moment zakretanja koji kormilo neće moći kompenzirati otklonom do 15 stupnjeva. Za određivanje sila i momenata u simulacijama zanošenja preporuča se uključivanje neotklonjenog kormila jer se postižu razlike u rezultatima i do 24% u usporedbi sa simulacijama u kojima nije korišteno kormilo. Isto tako pri procjeni momenta kojega ostvaruje kormilo preporuča se provođenje simulacije vlastitog pogona jer može utjecati na rezultate i do 37% u usporedbi sa simulacijama u kojima nije razmatran vlastiti pogon. Zadana porivna i bočna aerodinamička sila jedara došla je od procjene nepovoljnih uvjeta plovidbe koje je procijenila firma *Computed Wing Sail*. Uzeta je najveća moguća bočna te najmanja porivna sila za plovidbu brzinom od 12,5 čvorova. Za zadanu brzinu plovidbe procijenjeno je zanošenje broda od 3,19 stupnjeva te kut otklona kormila od 12,55 stupnjeva koji će kompenzirati navedeno zanošenje. Naime, moment jedra je promijenio predznak ukupnog hidrodinamičkog moment koji djeluje na brod u pozitivnu vrijednost što implicira kako trenutna konfiguracija daje blagi višak momenta, to jest otklon kormila veći je od potrebnog i potencijalno bi se mogao smanjiti što ovu metodu stavlja na stranu sigurnosti. Poznato je kako zanošenje i otklon kormila utječu na povećanje otpora broda te je za spomenuti režim plovidbe otpor broda veći za 17% u odnosu na isti brod koji plovi konvencionalnom propulzijom identičnom brzinom. Najveći dio potiska jedara koristi se za kompenzaciju dodatnog otpora nastalog zbog kuta zanošenja i otklonjenog kormila. Unatoč tome postignuto je smanjenje dovedene snage brodskom vijku od 5,9%. Dovedena snaga direktno je povezana s potrošnjom goriva iz čega možemo zaključiti kako će vjetrom potpomognuta propulzija donijeti vidljivu uštedu goriva a time smanjiti ispuštanje stakleničkih plinova u atmosferu.



---

**LITERATURA**

- [1] International trade in goods by mode of transport (2022). *Eurostat*, (Pristup: 12. studenoga 2023.). Dostupno: [https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php?title=International\\_trade\\_in\\_goods\\_by\\_mode\\_of\\_transport](https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php?title=International_trade_in_goods_by_mode_of_transport).
- [2] Number of ships in the world merchant fleet as of January 1, 2022, by type. *Statista*, (Pristup: 11. studenoga 2023.). Dostupno: <https://www.statista.com/statistics/264024/number-of-merchant-ships-worldwide-by-type/>.
- [3] Berge bulk unveils the world's most powerful sailing cargo ship (Pristup: 20. studenoga 2023.). Dostupno: <https://www.bergebulk.com/berge-bulk-unveils-the-worlds-most-powerful-sailing-cargo-ship/>.
- [4] Walter H., Scott Jr. (1974). Directional stability and control of sailing yachts. *SNAME 1st Chesapeake sailing yacht symposium*, SNAME-CSYS-1974-011.
- [5] N. A. Odeh and T. T. Cockerill. (2008). Life cycle GHG assessment of fossil fuel power plants with carbon capture and storage. *Energy Policy*, vol. 36, no. 1, pp. 367–380, doi: 10.1016/j.enpol.2007.09.026.
- [6] A. Monteiro, M. Russo, C. Gama, and C. Borrego. (2018). How important are maritime emissions for the air quality: At European and national scale. *Environmental Pollution*, vol. 242, pp. 565–575, doi: 10.1016/j.envpol.2018.07.011.
- [7] The Paris Agreement | UNFCCC. (Pristup: 08. listopada 2023.). Dostupno: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>.
- [8] Perčić, M., Ančić, I., Vladimir, N. (2020). Life-cycle cost assessments of different power system configurations to reduce the carbon footprint in the Croatian short-sea shipping sector. *Renewable & sustainable energy reviews*, Vol. 131, rad br. 110028, 12 str.
- [9] Ančić, I., Perčić, M., Vladimir, N. (2020). Alternative power options to reduce carbon footprint of ro-ro passenger fleet: A case study of Croatia. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 271, rad br. 122638, 15 str.
- [10] Perčić, M., Vladimir, N., Fan, A. (2020). Life-cycle cost assessment of alternative marine fuels to reduce the carbon footprint in short-sea shipping: A case study of Croatia. *Applied Energy*, Vol. 279, rad br. 115848, 18 str.

- [11] Perčić, M., Vladimir, N., Fan, A. (2021). Techno-economic assessment of alternative marine fuels for inland shipping in Croatia. *Renewable & sustainable energy reviews*, Vol. 148, rad br. 111363, 15 str.
- [12] G. P. Gobbi, L. Di Liberto, and F. Barnaba. (2020). Impact of port emissions on EU-regulated and non-regulated air quality indicators: The case of Civitavecchia (Italy). *Science of the Total Environment*, vol. 719, p. 134984, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134984.
- [13] L. Chen, T. L. Yip, and J. Mou. (2018). Provision of Emission Control Area and the impact on shipping route choice and ship emissions. *Transp Res D Transp Environ*, vol. 58, pp. 280–291, doi: 10.1016/j.trd.2017.07.003.
- [14] Emission Standards: IMO Marine Engine Regulations. (Pristup: 07. listopada 2023.). Dostupno: <https://dieselnet.com/standards/inter/imo.php#s>
- [15] IMO 2020 – cutting sulphur oxide emissions. (Pristup: 07. listopada 2023.). Dostupno: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx>
- [16] International Maritime Organization. NOX regulations. (Pristup: 05. listopada 2023.). Dostupno: [https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx).
- [17] IMO, Marine Environment Protection Committee (MEPC) – 79th session, 12-16 December 2022. (Pristup: 13. listopada 2023.). Dostupno: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MEPC-79th-session.aspx>.
- [18] International Maritime Organization (IMO). (2011). *Resolution MEPC. 203(62)*.
- [19] M. Perčić, N. Vladimir, A. Fan, and I. Jovanović. (2022). Holistic Energy Efficiency and Environmental Friendliness Model for Short-Sea Vessels with Alternative Power Systems Considering Realistic Fuel Pathways and Workloads. *J Mar Sci Eng*, vol. 10, no. 5, p. 613, doi: 10.3390/jmse10050613.
- [20] E. A. Bouman, E. Lindstad, A. I. Riialand, and A. H. Strømman. (2017). State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review. *Transp Res D Transp Environ*, vol. 52, pp. 408–421, May 2017, doi: 10.1016/j.trd.2017.03.022.
- [21] J. Hansson, S. Månsson, S. Brynolf, and M. Grahn. (2019). Alternative marine fuels: Prospects based on multi-criteria decision analysis involving Swedish stakeholders. *Biomass Bioenergy*, vol. 126, pp. 159–173, doi: 10.1016/j.biombioe.2019.05.008.

- [22] Fan, A., Wang, Z., Yang, L., Wang, J., Vladimir, N. (2021). Multi-stage decision-making method for ship speed optimization considering inland navigational environment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, Vol. 235, pp. 372-382.
- [23] DNV, Achieving the IMO decarbonization goals. (Pristup: 23. studenoga 2023.). Dostupno: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/How-newbuilds-can-comply-with-IMOs-2030-CO2-reduction-targets.html>.
- [24] DNV, EU ETS: Preliminary agreement to include shipping in the EU's Emission Trading System from 2024, (Pristup: 25. studenoga 2023.). Dostupno: <https://www.dnv.com/news/eu-ets-preliminary-agreement-to-include-shipping-in-the-eu-s-emission-trading-system-from-2024-238068>.
- [25] Gatin I., Vukčević V., Jasak H. & Rusche H. (2017). Enhanced coupling of solid body motion and fluid flow in finite volume framework. *Ocean Engineering*, 143, 295–304.
- [26] Virag, Z., Džijan, I., (2018). *Mehanika fluida II*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.
- [27] Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA journal*, 32(8), 1598-1605.
- [28] N. Ferdelji, *Laminarni granični slojevi*, Interna skripta, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [29] Demirel, Y. K., Khorasanchi, M., Turan, O., Incecik, A., & Schultz, M. P. (2014). A CFD model for the frictional resistance prediction of antifouling coatings. *Ocean Engineering*, 89, 21-31.
- [30] Molland, A. F., Turnock, S. R., & Hudson, D. A. (2011). Components of Hull resistance. *Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Propulsive Power*. Cambridge University Press, Cambridge, 12-68.
- [31] Wang H., Xie Y., Liu J., Zou Z. (2011). Experimental and Numerical Study of Hydrodynamic Forces on Ship in Oblique Motion. *International conference on remote sensing, environment, and transportation engineering*, Nanjing, China.
- [32] ITTC (2011). Recommended Procedures and Guidelines - Practical Guidelines for Ship CFD Applications. (Pristup: 23. studenoga 2023.). Dostupno: <https://ittc.info/media/1357/75-03-02-03.pdf>.
- [33] Iwan M. K., Muhamad S. S., Jonathan B. (2018). A simplified CFD approach for self-propelled ship using Actuator disk theory. *STRUCTMAT*, volume 85.

- 
- [34] Bakica, A., Vladimir, N., Jasak, H., Kim, E.S. (2021). Numerical simulations of hydrodynamic loads on structural responses of a Pre-Swirl Stator. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 13, 804-816.
- [35] Bai G., Li G., Ye Y., Gao T., (2015). Numerical analysis of the hydrodynamic performance and wake field of a horizontal axis tidal current turbine using an actuator surface model. *Ocean Engineering*, 94 (2015) 1-9.
- [36] Bakica A., Gatin I., Vukčević V., Jasak H., Vladimir N., (2019). Accurate assessment of ship-propulsion characteristics using CFD. *Ocean engineering*, 175, 149-162.
- [37] Gatin I. (2015). Cloud-towing-tank Theoretical manual. *Interna skripta*. In silico d.o.o., Zagreb.
- [38] Chen S., Zhong J., Sun P. (2015). Numerical simulation of the stoke wave for the flow around a ship hull coupled with the VOF model. *Journal of marine science and application*, 14, 163-169 (2015).